



Simulation of the groundwater level of Arak Aquifer using MODFLOW model and artificial neural network based on group data classification method (GMDH)

Shahab Naderi¹ , and Saeid Shabanlou² 

1. Department of Civil Engineering, Taft Branch, Islamic Azad University, Taft, Iran. E-mail: sh.naderi66@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: saeid.shabanlou@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 16 August 2024
Received in revised form 25 November 2024
Accepted 21 December 2024
Available online 25 March 2025

Keywords:

groundwater level
fluctuations,
Madflow,
GMDH,
group method of data
processing,
artificial neural network.

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to simulate the fluctuations of the groundwater level of the Arak plain using MODFLOW model and GMDH neural network.

Method: In this paper, MODFLOW transient model is calibrated for an eight-year period (April 2006 to March 2014) with a monthly time step. Then, this model is validated for a two-year period (April 2014 to March 2016). The values of R^2 , NSE, and RMSE indices for the transient model are 0.9081, 0.7390, and 0.9226, respectively, while the values of these indices for the validation stage are 0.6783, 0.8948, and 0.9721, respectively. In the next step, the GMDH model is used to simulate the fluctuations of the groundwater level. In this case, 80% of the data are used for training the GMDH model and 20% of the remaining for testing the GMDH model. The values of R^2 , NSE and RMSE indices are calculated as 0.9319, 0.9192 and 0.2285 for the network training stage and 0.9817, 0.9865 and 0.2542 for the testing stage.

Results: According to the results of this study, even though both models have good efficiency for simulating groundwater level fluctuations, groundwater level fluctuations can be simulated more accurately using GMDH than MODFLOW model. But using the MODFLOW model, hydrogeological analyzes can be done more easily.

Conclusions: The results of this study show that when the purpose of modeling is only to simulate the groundwater level, the GMDH model is more suitable, but when the main purpose of the simulation is to investigate the hydrogeological conditions, the MODFLOW model is more suitable.

Cite this article: Naderi, Sh., & Shabanlou, S. (2025). Simulation of the groundwater level of Arak Aquifer using MODFLOW model and artificial neural network based on group data classification method (GMDH). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 1-15. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11106.1136>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11106.1136>

Publisher: Razi University.

Introduction

Groundwater is one of the main sources of fresh water supply in many parts of the world, that's why it is very important to protect them. Studying of groundwater is one of the important tasks of the integrated management of water resources, because in many cases, these resources are quantitatively, qualitatively and economically better than surface resources. On the other hand, due to the location of groundwater, it is more difficult to monitor them compared to surface sources, and in case of pollution, it is more difficult to improve them. For this reason, it is always tried to use accurate methods for monitoring aquifers. The aim of this study is to simulate the fluctuations of the groundwater level of the Arak plain using MODFLOW model and GMDH neural network.

The area studied in this research is the Arak Plain in the southeast of Central Province. This area with an area of 5510 km² has an average height of 1670 meters above sea level. The direction of the slope gradient in this area is towards the center of the plain. One of the unique features of this area is the existence of Arak lagoon with an area of 120 km² in its central part. This wetland has special ecological features, such as the fact that it hosts a large number of migratory birds every year. The climate of Arak lagoon is hot and dry Mediterranean and its annual precipitation is about 361 mm.

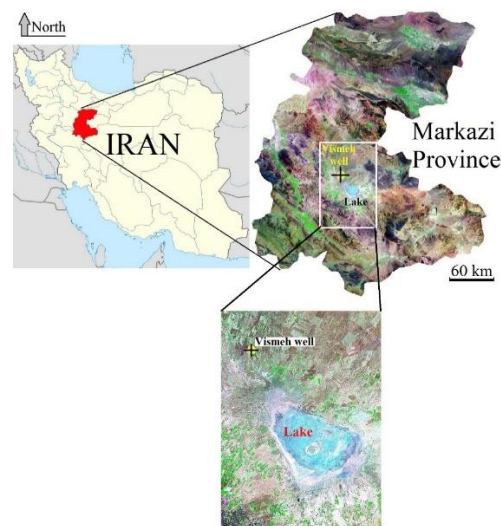


Figure 1. The location of the study area (a- the range of the regulatory dam to Abshirin station b- the range of Harmaleh station to Bamdej station)

Method

MODFLOW numerical model

MODFLOW is a multipurpose computer program that is used to simulate groundwater flow in multilayered porous aquifers. This model simulates one-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional flows with the finite difference center-block method in confined (closed), non-confined (open) aquifers, or a combination of the two. For ease of use in practice, the MODFLOW computer program is set up as a "section by section". This program includes a main program and a number of sub-programs called modules (units). Modules are grouped into packages. Each package is for a specific aspect of system simulation. For example, the well package simulates the effect of wells, the river package models the effect of rivers. Some of the packages are optional and the user can choose to use them or not.

For this purpose, MODFLOW transient model is calibrated for an eight-year period (April 2006 to March 2014) with a monthly time step. Then, this model is validated for a two-year period (April 2014 to March 2016).

In the MODFLOW model, after gridding the model and specifying the boundary conditions and initial conditions, an equation is written for each node based on the equation governing the groundwater flow. Then, a suitable method such as explicit or implicit methods should be used to convert the partial differential equation into algebraic equations. Other methods such as Gauss-Seidel method, Jacobi iteration method should be used to solve these equations so that the water level simulated by MODFLOW model can be identified in the desired node. In the following, it is possible to evaluate the accuracy of the model by comparing this value with the observed value at that point and a suitable performance criterion such as RMSE.

GMDH deep neural network

The values of R^2 , NSE, and RMSE indices for the transient model are 0.9081, 0.7390, and 0.9226, respectively, while the values of these indices for the validation stage are 0.6783, 0.8948, and 0.9721, respectively. In the next step, the GMDH model is used to simulate the fluctuations of the groundwater level. In this case, 80% of the data are used for training the GMDH model and 20% of the remaining for testing the GMDH model. The values of R^2 , NSE and RMSE indices are calculated as 0.9319, 0.9192 and 0.2285 for the network training stage and 0.9817, 0.9865 and 0.2542 for the testing stage.

Results

The values of R^2 , NSE, and RMSE indices for the transient model are 0.9081, 0.7390, and 0.9226, respectively, while the values of these indices for the validation stage are 0.6783, 0.8948, and 0.9721, respectively. In the next step, the GMDH model is used to simulate the fluctuations of the groundwater level. In this case, 80% of the data are used for training the GMDH model and 20% of the remaining for testing the GMDH model. The values of R^2 , NSE and RMSE indices are calculated as 0.9319, 0.9192 and 0.2285 for the network training stage and 0.9817, 0.9865 and 0.2542 for the testing stage.

Conclusions

According to the results of this study, even though both models have good efficiency for simulating groundwater level fluctuations, groundwater level fluctuations can be simulated more accurately using GMDH than MODFLOW model. But using the MODFLOW model, hydrogeological analyzes can be done more easily. Therefore, when the purpose of modeling is only to simulate the groundwater level, the GMDH model is more suitable, but when the main purpose of the simulation is to investigate the hydrogeological conditions, the MODFLOW model is more suitable.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



شبیه سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اراک با استفاده از مدل MODFLOW و شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر روش دسته بندی گروهی داده ها (GMDH)

شهاب نادری^۱، و سعید شعبانلو^۲✉

۱. گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران. رایانامه: sh.naderi66@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saeid.shabanlou@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این مطالعه شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت اراک با استفاده از مدل MODFLOW و شبکه عصبی GMDH استفاده شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶	روش پژوهش: در این تحقیق ابتدا مدل ناپایدار MODFLOW برای یک دوره هشت ساله (فروردین ۱۳۸۵ الی اسفند ۱۳۹۳) با گام زمانی ماهانه واسنجی گردید. سپس این مدل برای یک دوره دو ساله (فروردین ۱۳۹۳ الی اسفند ۱۳۹۵) صحت سنجی شد. در این حالت مقدار شاخص های R^2 ، NSE و RMSE برای مدل ناپایدار به ترتیب ۰/۹۰۸۱، ۰/۷۳۹۰ و ۰/۹۲۲۶ بودند درحالی که مقدار این شاخص ها برای مرحله صحت سنجی به ترتیب ۰/۶۷۸۳، ۰/۸۹۴۸ و ۰/۹۷۲۱ بودند. در گام بعدی از مدل GMDH برای شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی استفاده شد. در این حالت از ۸۰ درصد داده ها برای آموزش مدل GMDH و از ۲۰ درصد داده های باقیمانده برای تست مدل GMDH استفاده شد. مقدار شاخص های R^2 ، NSE و RMSE برای مرحله آموزش شبکه به ترتیب برابر ۰/۹۳۱۹، ۰/۹۱۹۲ و ۰/۲۲۸۵ و برای مرحله تست نیز برابر ۰/۹۸۱۷، ۰/۹۸۶۵ و ۰/۲۵۴۲ محاسبه شدند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵	یافته ها: بر اساس نتایج این مطالعه با وجود اینکه هر دو مدل از کارایی مناسبی برای شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمین برخوردار هستند؛ اما نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از GMDH نسبت به مدل MODFLOW نوسانات سطح آب زیرزمینی را با دقت بیشتری می تواند شبیه سازی شدند. اما با استفاده از مدل MODFLOW راحت تر می توان تجزیه و تحلیل های هیدروژئولوژیکی انجام داد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱	نتیجه گیری: زمانی که هدف از مدل سازی صرفاً شبیه سازی سطح آب زیرزمینی است مدل GMDH مناسب تر است اما زمانی که هدف اصلی از شبیه سازی بررسی شرایط هیدروژئولوژیکی است مدل MODFLOW مناسب تر است.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵	
کلیدواژه ها: نوسانات تراز آب زیرزمینی، مادفلو، GMDH، روش گروهی پردازش داده ها، شبکه عصبی مصنوعی.	

استناد: نادری، شهاب؛ و شعبانلو، سعید. (۱۴۰۴). شبیه سازی سطح آب زیرزمینی آبخوان دشت اراک با استفاده از مدل MODFLOW و شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر روش دسته بندی گروهی داده ها (GMDH). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۱)، ۱-۱۵.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11106.1136>



مقدمه

آب زیرزمینی یکی از آموزش‌های مهم بخش‌های مدیریت یکپارچه منابع آب است. زیرا این منابع در بسیاری از موارد از نظر کمی، کیفی و اقتصادی نسبت به منابع سطحی بهتر هستند (مک لاجلان و همکاران^۱، ۲۰۱۷). از طرفی به دلیل جایگاه آب زیرزمینی پایش آنها نسبت به منابع سطحی دشوارتر است و در صورت آلودگی نیز بهبود آنها دشوارتر است (مزرعه و همکاران^۲، ۲۰۲۴). به همین دلیل نیز همواره تلاش می‌شود که از روش‌های دقیقی برای پایش آبخوان‌ها استفاده گردد (جاکمن و همکاران^۳، ۲۰۱۶). سطح آب زیرزمینی یکی از پارامترهای مهم آموزش است که برای بررسی شاخص‌های پایداری کمی و کیفی آبخوان از آن استفاده می‌شود (احمدی و صدق‌آمیز^۴، ۲۰۰۷). استفاده از این شاخص در تجزیه و تحلیل‌ها را می‌توان به دو بخش کلی تقسیم نمود (موون و همکاران^۵، ۲۰۰۴). در حالت اول می‌توان از اطلاعات GWL آبخوان در گذشته، برای رسم هیدروگراف آبخوان استفاده کرد و سپس بر اساس آن درباره تأثیر فعالیت‌های گذشته بر وضعیت فعلی آبخوان قضاوت نمود (بلووم فیلد و همکاران^۶، ۲۰۱۵). در حالت دوم، به دلیل عدم قطعیت موجود در فرایندهای پیش‌بینی، نسبت به حالت اول چالش‌برانگیزتر است. از اطلاعات حاصل از هیدروگراف آبخوان در گذشته و مدل‌های سری زمانی، سطح ایستابی برای آینده را می‌توان پیش‌بینی کرد (میرزاوند و قاضوی^۷، ۲۰۱۵). همچنین در حالت پیشرفته‌تر می‌توان از اطلاعات هیدروگراف و سایر پارامترهای مؤثر بر آن مانند بارندگی، دما، تبخیر و تعرق و... و با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، نوسانات GWL را شبیه‌سازی نمود (کولیبالی و همکاران^۸، ۲۰۰۱)؛ بنابراین همواره تلاش می‌گردد مدلهایی برای این کار انتخاب شوند که بتوانند این نوسانات را با دقت بیشتری شبیه‌سازی نمایند (چوبین و کالکیان^۹، ۲۰۱۷؛ موون و همکاران^{۱۰}، ۲۰۰۴؛ و ساهو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۷).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

تاکنون شبکه‌های عصبی مختلفی باهدف شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی توسعه پیدا کرده‌اند. به‌عنوان مثال ژانگ و همکاران^{۱۱} (۲۰۲۰) برای مقایسه کارایی مدل‌های داده‌محور و فرایندمحور از مدل MODFLOW و شبکه عصبی بازگشتی NARX استفاده کردند. آنها از این مدل‌ها برای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمین و آبدی چشمه‌ها در یک آبخوان با سیستم هیدرولیکی پیچیده استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل NARX نسبت به مدل MODFLOW توانایی بهتری در شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی دارد به طوری که می‌توان از آن به‌عنوان یک جایگزین مطمئن برای شبیه‌سازی GWL استفاده کرد.

چن و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۰) برای شبیه‌سازی نوسانات GWL چهار مدل MODFLOW, MLP, RBF, SVM را توسعه دادند. آنها در این مطالعه از داده‌های سطح ایستابی و هواشناسی برای آموزش و تست و صحت سنجی مدل‌های مختلف استفاده کردند. بر اساس نتایج این مطالعه این نوسانات توسط مدل‌های MLP و RBF و SVM نسبت به مدل MODFLOW با دقت بیشتری شبیه‌سازی شدند، همچنین از بین شبکه‌های عصبی مختلف، SVM نسبت به سایر مدل‌ها نوسانات سطح ایستابی را با دقت بهتری شبیه‌سازی کرد.

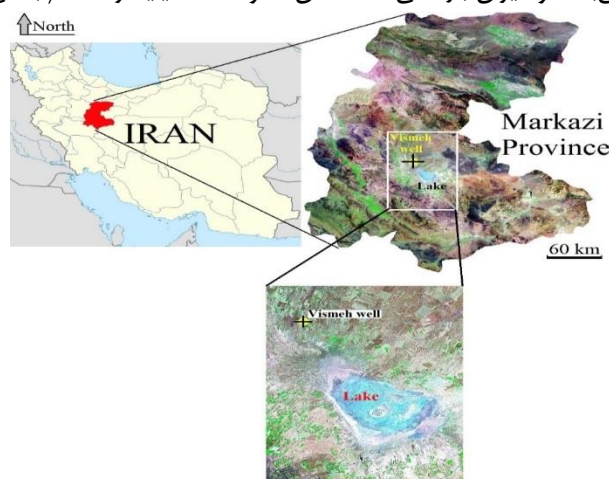
1. McLachlan et al
2. Mazraeh et al
3. Jakeman et al
4. Ahmadi and Sedghamiz
5. Moon et al
6. Bloomfield et al
7. Mirzavand & Ghazavi
8. Coulibaly et al
9. Choubin & Malekian
10. Sahoo et al
11. Zhang et al
12. Chen et al

سیفی و همکاران^۱ (۲۰۲۰) با هدف بررسی کارایی مدل‌های مختلف یادگیری ماشین و بهینه‌سازی نتایج آنها از ۳ مدل مختلف با شش الگوریتم فرا ابتکاری مختلف برای بهینه‌سازی نتایج شبکه‌های عصبی استفاده کردند. آنها ابتدا برای شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی از سه مدل ANN, ANFIS, SVM استفاده نمودند، سپس از شش الگوریتم فرا ابتکاری مختلف برای بهینه‌سازی نتایج این مدل‌ها استفاده کردند. بر اساس نتایج این مطالعه شبکه عصبی SVM و شبکه عصبی ANFIS بهینه شده توسط الگوریتم GOA به آموزش عملکرد را نسبت به همه مدل‌ها داشتند.

از دیگر تحقیقات در زمینه موضوع این تحقیق می‌توان به تحقیقات عزیز و همکاران^۲ (۲۰۲۳)؛ امیری و همکاران^۳ (۲۰۲۱)؛ شعبانلو^۴ (۲۰۱۸)؛ اسماعیلی و همکاران^۵ (۲۰۲۱)؛ فلاحی و همکاران^۶ (۲۰۲۳) و پناهی و همکاران^۷ (۲۰۲۲) اشاره کرد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش دشت اراک در جنوب شرق استان مرکزی است. این منطقه با مساحت 5510 Km^2 بین طول‌های " ۴۸ '۵۴ ۴۸" الی " ۰۲ '۰۳ ۵۱" و عرض جغرافیایی " ۱۷ '۲۳ ۳۳" الی " ۳۳ '۳۵" قرار دارد. متوسط ارتفاع این منطقه از سطح دریا ۱۶۷۰ متر است. جهت‌گردایان شیب در این منطقه به طرف مرکز دشت است. از ویژگی‌های منحصر به فرد این منطقه وجود تالاب اراک با مساحت 120 Km^2 در بخش مرکزی آن است. این تالاب دارای ویژگی‌های بوم‌شناسی خاصی است، از جمله اینکه سالانه میزان تعداد زیادی از پرندگان مهاجر از جمله درناهاست (عربگل و همکاران^۸، ۲۰۱۶). آب‌وهوای تالاب اراک، مدیترانه‌ای گرم و خشک می‌باشد و میزان بارندگی سالانه آن حدود ۳۶۱ میلی‌متر است (جلالی و همکاران^۹، ۲۰۱۶).



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

۱. مدل عددی MODFLOW

اساس همه معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل قانون داری و معادله پیوستگی است (تود و میز^{۱۰}، ۲۰۰۴). با این حال معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی را می‌توان با توجه به نوع آبخوان و ویژگی‌های محیط متخلخل به انواع مختلفی تقسیم کرد (بیر، ۲۰۱۲). بر اساس نتایج آزمون‌های ژئوفیزیکی و مطالعه لاگ چاه‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه،

1. Seifi et al
2. Azizi et al
3. Amiri et al
4. Shabanlou
5. Esmacili et al
6. Fallahi et al
7. Panahi et al
8. Arabgol et al
9. Jalali et al
10. Todd & Mays

آبخوان دشت اراک از نوع آزاد است. در همین راستا رابطه (۱) معادله جریان ناپایدار آب زیرزمینی برای یک آبخوان باز در یک محیط غیرهمسو و ناهمگن را نشان می‌دهد. در چنین محیطی محورهای اصلی هدایت هیدرولیکی با محورهای مختصات همسو هستند (تود و میز، ۲۰۰۴). وجود مقدار صفر در سمت راست این رابطه به معنای پایدار بودن جریان آب زیرزمینی نیست، بلکه به معنای ناچیز بودن مقدار ضریب ذخیره در این نوع آبخوان است ($0 \sim S_s$) زیرا برعکس آبخوان‌های تحت فشار مقدار آب خروجی از آبخوان آزاد وابستگی بسیار کمی به تراکم پذیری آن دارد (هالک و سویچ، ۲۰۱۱).

(۱)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

به دلیل نوسانات زمانی و مکانی سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های آزاد، از نظر ریاضی حل معادلات آنها نسبت به معادلات آبخوان‌های تحت فشار بسیار دشوارتر است (نیومن، ۱۹۷۲). این مسئله برای مدت‌ها یک چالش اساسی برای حل این معادلات بود، تا این که بوسینسک در سال ۱۹۰۴ بر اساس فرضیات معادله دوپویی - فورشه‌ایمر این معادله را حل کرد (رابطه (۲)) (بیر، ۲۰۱۲).

(۲)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S_y}{bK} \frac{\partial h}{\partial t}$$

در این معادله K ، h ، S_y و t به ترتیب هدایت هیدرولیکی آبخوان، سطح آب زیرزمینی در نقطه موردنظر، آبدهی ویژه و ضخامت آبخوان است.

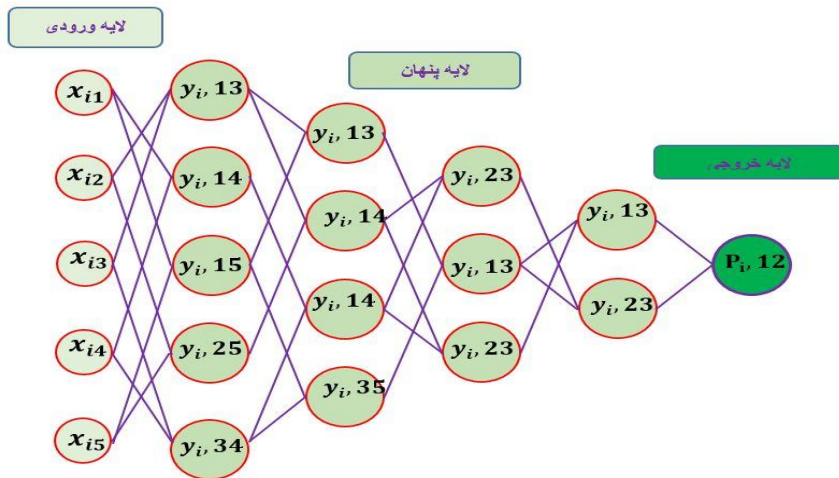
در مدل MODFLOW بعد از شبکه‌بندی مدل و مشخص‌شدن شرایط مرزی و شرایط اولیه، بر اساس معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی برای هر گره یک معادله نوشته می‌شود. سپس باید از یک روش مناسب مانند روش‌های صریح یا ضمنی برای تبدیل معادله دیفرانسیل جزئی به معادلات جبری استفاده کرد (وانگ و اندرسون، ۱۹۹۵). باید از روش‌های دیگری مانند روش گاوس - سایدل، روش تکرار ژاکوبی برای حل این معادلات استفاده نمود تا سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل MODFLOW در گره موردنظر مشخص گردد (پرکت و لاکوئیست، ۱۹۷۱). در ادامه می‌توان با مقایسه این مقدار با مقدار مشاهده‌ای در آن نقطه و یک معیار عملکرد مناسب مانند RMSE دقت مدل را ارزیابی نمود (وانگ و اندرسون، ۱۹۹۵).

۲. شبکه عصبی عمیق GMDH

اولین نسخه الگوریتم GMDH در سال ۱۹۶۶ توسط ایواخنکو برای حل چند جمله‌ای‌های مرتبه بالا ارائه شد و بعد از آن نسخه‌های دیگری توسط دانشمندان دیگر توسعه داده شدند (ایواخنکو، ۱۹۹۵). از دیدگاه ریاضی GMDH نوعی الگوریتم خود سازمانده می‌باشد که می‌توان از آن برای تحلیل سیستم‌های غیرخطی مرتبه بالا استفاده کرد (فارلو، ۱۹۸۱). اما از دیدگاه یادگیری ماشین، GMDH نوعی الگوریتم یادگیری عمیق است که می‌توان از آن برای اهداف مختلفی مانند شناسایی الگو، خوشه بندی و برازش تابع استفاده کرد (اسچمیدهوربر، ۲۰۱۵). بر اساس این شبکه از نظر ساختار بسیار شبیه به شبکه عصبی پرسپترون چند لایه است با این تفاوت که اولاً برعکس شبکه عصبی MLP در شبکه عصبی GMDH تنها اطلاعات مفید هر

1. Hálek & Švec
2. Neuman
3. Bear
4. Prickett & Lonquist
5. Wang & Anderson
6. Ivakhnenko
7. Farlow
8. Schmidhuber

لایه به لایه بعد منتقل می‌شوند (شکل (۱)) (مزرعه و همکاران^۱، ۲۰۲۳). دوما در شبکه عصبی GMDH ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها توسط چند جمله‌ای کولموگروف-گابو انجام می‌شود (رابطه (۳)) (غضنفری و همکاران^۲، ۲۰۱۷).



شکل ۲. ساختار شبکه عصبی GMDH

$$G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2 \quad (3)$$

در این رابطه $x_i x_j$ به ترتیب نشان دهنده متغیر اول و دوم مورد استفاده برای تشکیل چند جمله‌ای ایوآخنکو هستند. اکنون با توجه اندازه بردار متغیرهای ورودی، رابطه (۳) برای همه جفت متغیرها توسعه داده می‌شود. مجموع رابطه‌های تشکیل شده برای همه متغیرهای خروجی را می‌توان به صورت یک ماتریس واحد نوشت. سپس برای هر سطر از ماتریس M یک رابطه دیگر توسعه داده می‌شود.

$$Aa = y \quad (4)$$

$$y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_m\}^T \quad (5)$$

$$a = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}^T \quad (6)$$

در این معادله، a بردار ضرایب مجهول و y بردار خروجی‌های مطلوب است. یکی از بخش‌های اصلی آموزش شبکه عصبی GMDH محاسبه ضرایب رابطه (۳) است. برای محاسبه این ضرایب می‌توان از روش‌های مختلفی مانند تجزیه مقادیر منفرد^۳، گرادیان کاهشی^۴ استفاده کرد. صرف نظر از تفاوت‌های موجود میان همه این روش‌ها در همه آنها هدف کاهش اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر محاسبه شده است (رابطه (۷)) (ابتهاج و همکاران^۵، ۲۰۱۸). در این مطالعه از روش SVD برای آموزش شبکه عصبی GMDH استفاده شد (SVD-GMDH).

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - G_i(0))^2}{\sum_{i=1}^M y_i^2} \rightarrow \min \quad (7)$$

تجزیه مقادیر منفرد (SVD) روشی قدرتمند برای تجزیه و تحلیل مجموعه‌ای از معادلات خطی است. SVD روش توسعه‌یافته‌ای از روش تجزیه مقادیر ویژه اپراتورهای مربعی است، با این تفاوت که با استفاده از روش SVD هر ماتریس صرف نظر از ابعاد آن را می‌توان به حاصل ضرب یک ماتریس قطری در دو ماتریس معکوس‌پذیر تجزیه کرد. به عبارت دیگر در این روش هر ماتریس را می‌توان حداقل به دو ماتریس دیگر تجزیه کرد به طوری که با اعمال این دو ماتریس از سمت چپ و راست یک ماتریس قطری حاصل شود. از این روش به طور عمده در مسائل شناسایی الگو، ترکیب تصویر، فشرده‌سازی تصویر و

1. Mazraeh et al
 2. Ghazanfari et al
 3. Singular Value Decomposition (SVD)
 4. Gradient Descent (GD)
 5. Ebtehaj et al

پردازش سیگنال استفاده می‌شود. باتوجه به اینکه برای محاسبه SVD از ماتریس کوواریانس متغیرهای ورودی استفاده می‌شود؛ لذا اندازه بردار مقادیر منفرد حاصل از آن به همبستگی بین داده‌ها بستگی دارد؛ بنابراین با افزایش ضریب همبستگی بین داده‌ها اندازه مقادیر منفرد نیز بزرگ‌تر می‌شود و با کاهش آن اندازه این بردار کوچک‌تر می‌شود. برای استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد در مسائل مربوط به پردازش سیگنال اگر A یک ماتریس $m \times n$ باشد به طوری که $A \in R^6$ ، در این صورت می‌توان با استفاده از تجزیه مقادیر منفرد می‌توان این ماتریس را به سه ماتریس تجزیه کرد (رابطه (۸)).

$$A=UWV^T \quad (8)$$

در رابطه V ماتریس بردار منفرد چپ و U ماتریس منفرد راست هستند و W یک ماتریس قطری است، باتوجه به این که این بردارها متعامد هستند؛ بنابراین می‌توان نوشت:

$$UU^T=VV^T=I \quad (9)$$

در نهایت برای محاسبه ضرایب رابطه (۳) با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

$$y(10)a=V \left[\text{diag} \left(\frac{1}{w_i} \right) \right] U^T \quad (10)$$

۳. ارزیابی عملکرد مدل

یکی از مراحل مهم آموزش توسعه مدل‌های یادگیری ماشین، ارزیابی آنها می‌باشد. در این مرحله باید با استفاده از شاخص‌های مناسبی میزان دقت مدل ارزیابی شود. در این مطالعه بعد از توسعه مدل MODFLOW و SVD-GMDH برای ارزیابی مدل‌ها از شاخص‌های R^2, NSC, RMS استفاده شد. در این رابطه N تعداد مشاهده‌ها است، F_i مقدار پیش‌بینی شده است، O_i مقدار مشاهده‌ای است و \bar{F} و \bar{O} به ترتیب متوسط مقادیر F_i و O_i هستند.

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - F_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \left[\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O}) \right]^2 \left[\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{-1} \quad (13)$$

یافته‌های پژوهش

۱. مدل عددی

اولین گام برای شبیه‌سازی جریان زیرزمینی توسط مدل MODFLOW تشکیل یک دیتاست کامل و سپس توسعه مدل مفهومی است (هرباگ و همکاران^۱، ۲۰۰۰). برای این کار از اطلاعات DEM منطقه و نقشه ۱/۲۵۰۰۰ برای تعیین مرز فیزیکی آبخوان و توپوگرافی دشت و از نقشه جهت جریان برای مشخص کردن مرزهای هیدروژئولوژیکی استفاده شد. بر اساس این اطلاعات جهت جریان آب زیرزمینی در این آبخوان عمدتاً به سمت مرکز دشت است. برای تهیه نقشه عمق سنگ کف اطلاعات لاگ چاه‌های اکتشافی و مقاطع ژئوالکتریک استفاده شد. بر اساس این اطلاعات عمق سنگ کف در حاشیه دشت حداکثر است و با حرکت به سمت مرکز دشت عمق آن کمتر می‌شود. در این آبخوان ۸۸۶ چاه بهره‌برداری وجود دارد که میزان برداشت سالانه آب از آنها بیش از یک میلیارد مترمکعب است. بسیاری از این چاه‌ها در بخش‌های جنوبی و جنوب غرب دشت قرار دارند. بررسی نقشه‌های هم عمق نشان می‌دهد که عمق برخورد به سطح آب زیرزمینی در این آبخوان از متوسط ۵ متر در حاشیه دشت تا نزدیک ۱ متر در مرکز دشت متغیر است. برای بررسی آینده ویژه و هدایت هیدرولیکی آبخوان نتایج آزمون پمپاژ

و اطلاعات لاگ چاه‌ها اکتشافی و مقاطع ژئوالکتریک استفاده شد. بر اساس این اطلاعات و باتوجه به تنوع رسوبات و لایه‌های چینه‌شناسی در منطقه دامنه تغییرات هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در بخش‌های مختلف آبخوان متغیر است؛ اما به‌طور کلی مقدار آن در بخش‌های غربی و جنوب شرقی نسبت به بخش‌های دیگر دشت بیشتر است. بررسی بیلان منطقه نیز نشان می‌دهد که اصلی‌ترین جریان‌های ورودی به آبخوان بارندگی، آب رودخانه‌های فصلی و آب برگشتی کشاورزی هستند درحالی‌که برداشت از چاه‌های بهره‌برداری اصلی‌ترین جریان خروجی از آبخوان است. در این مطالعه بر اساس اطلاعات حاصل از هیدروگراف ۲۰ساله و کیفیت داده‌های موجود از اطلاعات فروردین سال ۱۳۸۵ برای توسعه مدل پایدار و از اطلاعات ۸ سال (فروردین ۱۳۸۵ الی اسفند سال ۱۳۹۳) با گام زمانی ماهانه برای توسعه مدل ناپایدار استفاده شد. همچنین برای صحت سنجی مدل از اطلاعات دو سال (فروردین سال ۱۳۹۳ تا اسفند سال ۱۳۹۵) استفاده شد.

۲. توسعه مدل MODFLOW

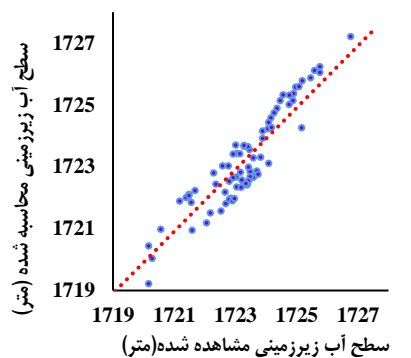
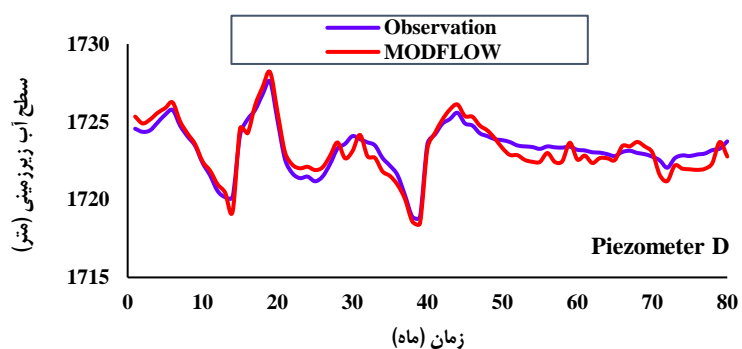
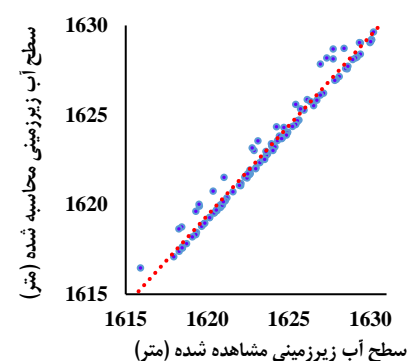
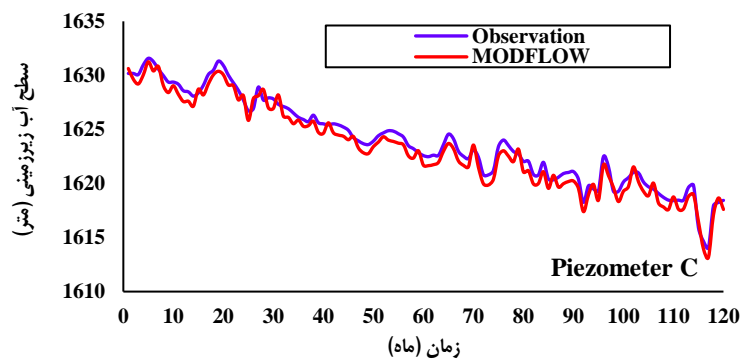
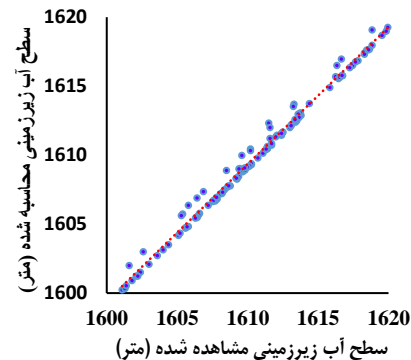
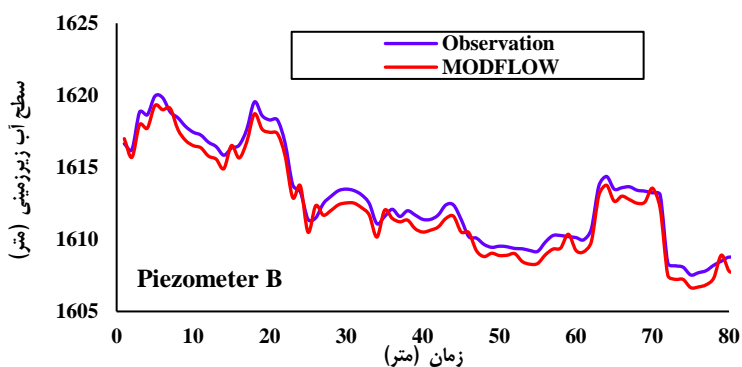
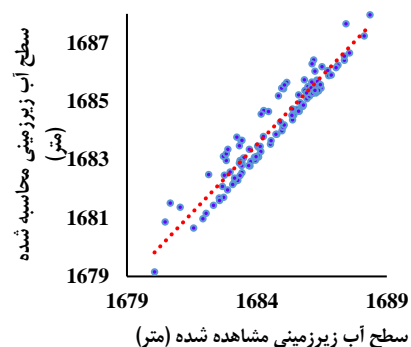
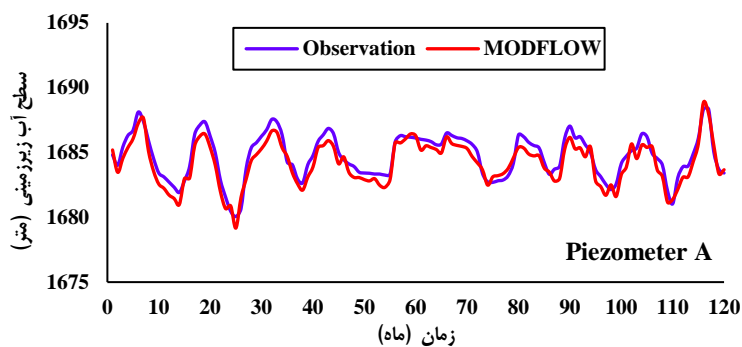
باتوجه به این که آبخوان دشت اراک از نوع آزاد است در این مطالعه از مدل MODFLOW-NWT برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده شد. همچنین برای تبدیل مدل مفهومی به مدل عددی در این مدل از بسته مرز با بار هیدرولیکی عمومی، تبخیر و تعرق، زهکش، دریاچه، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های مشاهده‌ای، تغذیه استفاده شد. همچنین برای حل مجموع معادلات مدل MODFLOW-NW از پکیج Stochastic Simulation استفاده شد، ویژگی این روش نسبت به روش‌های دیگر مانند Forward Run استفاده از روش مونت‌کارلو برای تخمین پارامترهاست (سانتوس و همکاران^۱، ۲۰۱۸). همچنین برای کالیبره کردن پارامترهای ضریب ذخیره ویژه و هدایت هیدرولیکی ابتدا از روش سعی و خطا استفاده شد. سپس برای بهبود دقت مدل از روش PEST استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از مدل کالیبره شده میزان RMSE مدل پایدار ۰/۸۸۴۷ و مدل ناپایدار ۰/۷۹۲۶ است. همچنین میزان این شاخص برای مرحله صحت سنجی برابر ۰/۸۴۲۱ است (جدول ۱). همچنین بررسی RMSE برای پیژومترهای مختلف نشان می‌دهد با وجود اینکه در بسیاری از موارد این شاخص برای پیژومترهای مختلف مقادیر قابل قبولی دارد؛ اما برای برخی پیژومترها مقدار بالایی دارد. در شکل (۴) سری زمانی ۴ از پیژومترهایی که بیش آموزش RMSE را در مرحله صحت سنجی نسبت به سایر پیژومترها دارند نشان داده شده است. (جدول ۲)

جدول ۱. میزان خطای مدل MODFLOW برای مرحله پایدار، ناپایدار و مرحله صحت سنجی

Efficiency criteria	پایدار	ناپایدار	صحت سنجی
RMSE	0.9447	0.9226	0.9721
NSE	0.7043	0.7390	0.6783
R ²	0.8962	0.9081	0.8948

جدول ۲. پیژومترهای داری بیشترین میزان خطا در مرحله صحت سنجی مدل MODFLOW

Piz. No	RMSE	R ²	NSE
A	0.9822	0.8703	0.6427
B	0.9443	0.9006	0.7038
C	0.8917	0.9170	0.7481
D	0.9714	0.8927	0.6811



شکل ۶. مقایسه سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل MODFLOW برای پیزومترهای دارای بیش آموزش میزان خطا در مرحله صحت سنجی

۳. مدل GMDH

اولین گام برای توسعه مدل‌های شبکه عصبی شناخت متغیرهای ورودی و خروجی شبکه است (سنتس و همکاران^۱، ۲۰۱۸). در این مطالعه برای شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی در گام زمانی t از پارامترهای سطح آب زیرزمینی، بارندگی، سطح آب دریاچه، دما، تبخیر استفاده شد.

یکی از چالش‌های اساسی در توسعه مدل‌های شبکه عصبی ترکیب داده‌های ورودی است، در بسیاری از تحقیقات از روش سعی و خطا برای انتخاب ترکیب ورودی‌ها استفاده می‌شود، اما در این مطالعه از تابع خودهمبستگی^۲ (ACF) و تابع خودهمبستگی جزئی^۳ (PACF) استفاده شد. بر اساس این نتایج، ۱۴ متغیر برای تشکیل ماتریس ورودی شبکه عصبی SVD-GMDH انتخاب شدند ($P_{t-2}, HL_t, HL_{t-1}, HL_{t-2}, HL_{t-3}, T_t, T_{t-1}, E_t, E_{t-1}, GWL_{t-1}, GWL_{t-2}, GWL_{t-3}, P_t, P_{t-1}$).

بنابراین، بردار ورودی شبکه عصبی SVD-GMDH شامل ۱۴ متغیر مستقل است، سپس باتوجه به این متغیرها و رابطه (۳) ترکیب دوتایی مختلفی تشکیل و عملکرد آن‌ها در توسعه مدل GMDH ارزیابی شد. در این حالت در هر نرون از روش SVD برای محاسبه ضرایب رابطه (۳) استفاده شد. سپس بر اساس معیار خطا نرون‌های منتخب به لایه بعد منتقل شدند و این فرایند دوباره در لایه دوم تکرار شد، در نهایت این فرایند تا لایه آخر و انتخاب یک نرون ادامه پیدا کرد. به‌عنوان مثال معادله (۱۴) رابطه مورد استفاده در آخرین نرون شبکه عصبی SVD-GMDH برای محاسبه GWL در پیژومتر ۱۸ را نشان می‌دهد. در این مطالعه از ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی و از سایر داده‌ها برای تست استفاده شد. بعد از آموزش و تست شبکه معیارهای خطا محاسبه شدند (جدول (۴)). مقدار RMSE برای مرحله آموزش و تست شبکه به ترتیب برابر است با 0.2542 و 0.2285 است، میزان شاخص NSE نیز برای این مراحل به ترتیب برابر 0.9065 و 0.9192 است. شاخص R^2 نیز در مرحله آموزش و تست برای همه پیژومترها مقادیر مناسبی دارد. مقدار این شاخص برای مرحله آموزش و تست به ترتیب برابر 0.9217 و 0.9319 است. بر اساس این نتایج نوسانات GWL در منطقه مورد مطالعه به خوبی توسط مدل SVD-GMDH شبیه‌سازی شده اند. در شکل (۷) نتایج مدل SVD-HMDH برای ۴ تا از پیژومترهای منطقه که میزان RMSE آنها در مدل MODFLOW نسبت به سایر پیژومترهای منطقه بیشتر بود نشان داده شده است.

(۱۴)

$$GWL_t^{18} = -0.2373 - 0.0322a_0 - 0.0879a_1 + 0.1012a_0a_1 + 0.3402a_0^2 + 0.7841a_1^2$$

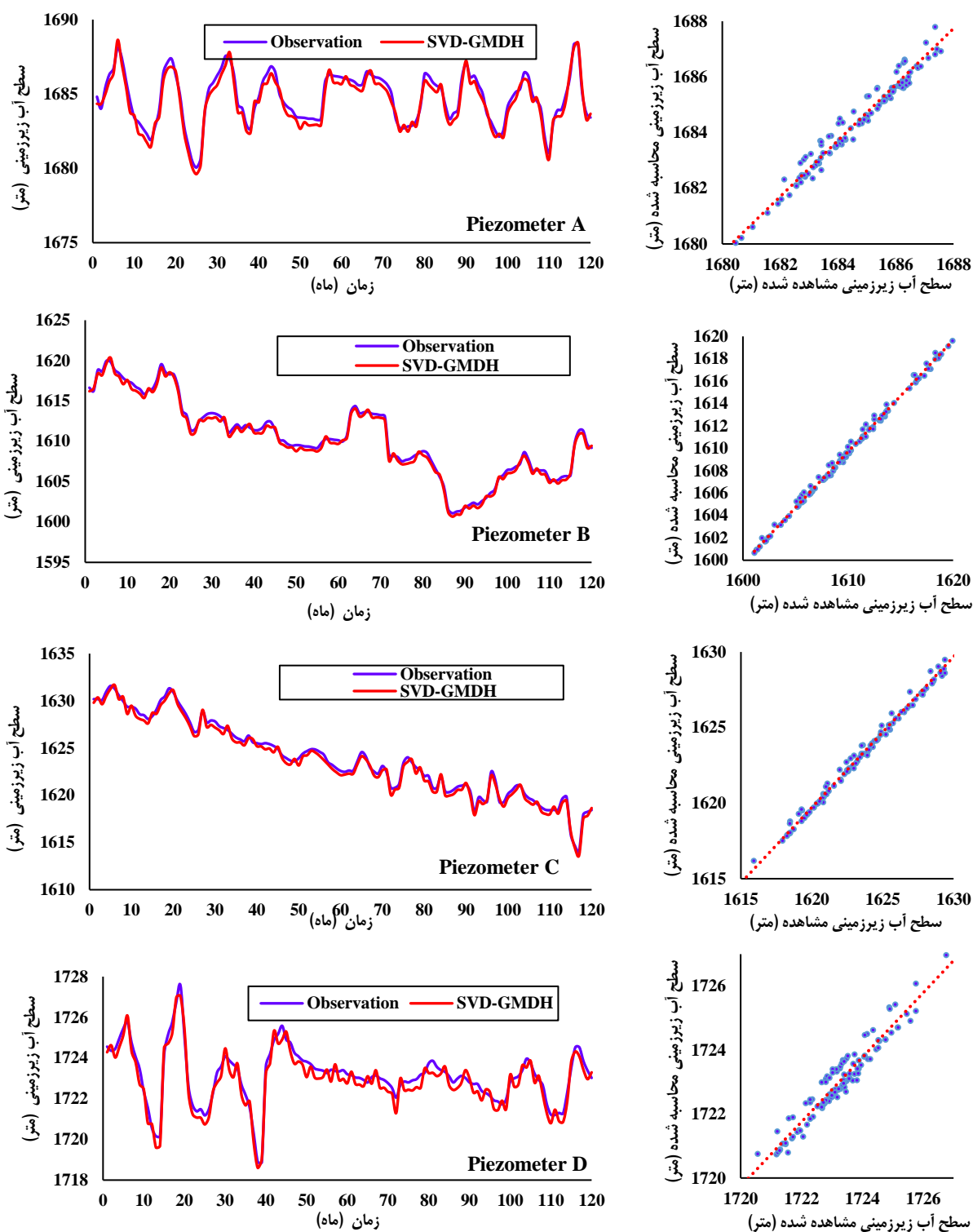
جدول ۴. نتایج شاخص‌های آماری برای مدل SVD-GMDH

معیار ارزیابی	آموزش	آزمایش
RMSE	0.2285	0.2542
NSE	0.9192	0.9065
R^2	0.9319	0.9217

جدول ۵. پیژومترهای دارین بیشترین میزان خطا در مرحله صحت سنجی مدل SVD-GMDH

پیژومتر	RMSE	R^2	NSE
a	0.2462	0.9365	0.8763
B	0.2086	0.9509	0.9021
C	0.1880	0.9641	0.9275
D	0.2214	0.9444	0.8987

1. Santos et al
2. Autocorrelation function
3. Partial autocorrelation function



شکل ۷. مقایسه سطح آب زیرزمینی مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل SVD-GMDH برای پیزومترهای دارای بیشترین میزان خطا در مرحله صحت سنجی

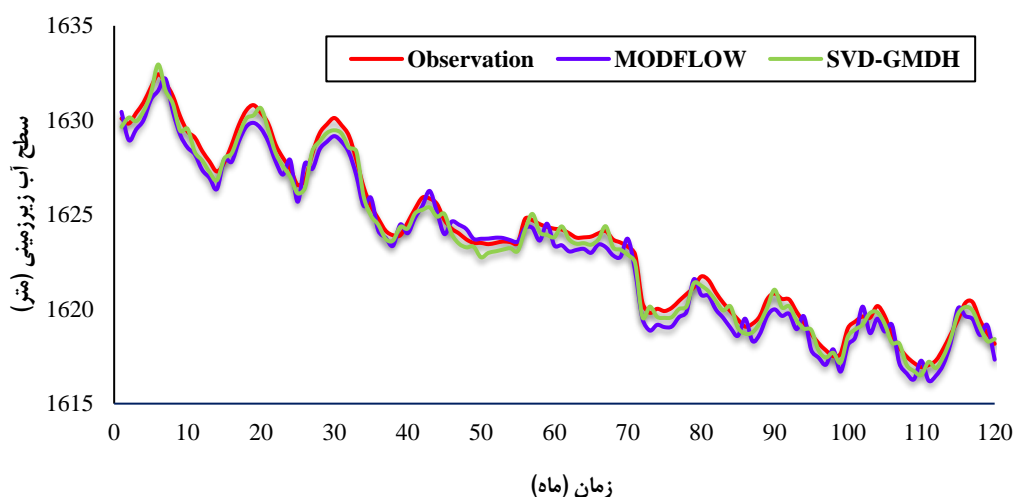
۴. بررسی هیدروگراف آبخوان

بعد از شبیه سازی GWL برای همه پیزومترها از هیدروگراف واحد آبخوان برای مقایسه نتایج مدل های مختلف استفاده شد. بعد از شبیه سازی نوسانات GWL برای منطقه مورد مطالعه توسط مدل های SVD-GMDH و MODFLOW-NW و ترسیم هیدروگراف آبخوان از شاخص های R^2 ، NSE و RMSE برای مقایسه نتایج این مدل ها استفاده شد. مقایسه نتایج

مدل‌های مختلف نشان داد که هر سه مدل نوسانات سطح آب زیرزمینی را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرده‌اند. با این حال نگاه دقیق‌تر به فراز و فرودهای سری زمانی شبیه‌سازی شده توسط این مدل‌ها تفاوت‌های مهمی را نشان می‌دهد. مدل SVD-GMDH نسبت به مدل MODFLOW سطح آب زیرزمینی را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرده است. بطوری که میزان شاخص‌های R^2 ، NSE و RMSE برای مدل MODFLOW به ترتیب ۰/۹۸۸۷، ۰/۹۶۸۳ و ۰/۳۲۹۷ هستند. در حالی که این مقادیر برای مدل SVD-GMDH به ترتیب برابر ۰/۹۸۸۷، ۰/۹۶۸۳ و ۰/۳۲۹۷ هستند. دلیل این مسئله قابلیت مناسب مدل GMDH در یافتن ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌های مدل است. چیزی که باعث می‌شود این مدل‌ها نسبت به مدل‌های MODFLOW در مقابل عدم قطعیت‌ها موجود در داده‌ها مقاومت‌تر باشند. این در حالی است که کمترین عدم قطعیت در داده‌ها و ورودی می‌تواند تأثیر مهمی در نتایج مدل‌های فرایندمحور مانند MODFLOW داشته باشد. بنابراین مدل SVD-GMDH نسبت به مدل MODFLOW هر نوسانات سطح آب زیرزمینی را با دقت بهتری شبیه‌سازی می‌کند.

جدول ۷. مقایسه نتایج مدل‌های MODFLOW و SVD-GMDH

معیار خطا	MODFLOW	SVD-GMDH
RMSE	0.8749	0.3297
NSE	0.7405	0.9683
R^2	0.9886	0.9887



شکل ۸. مقایسه هیدروگراف‌های واحد مشاهده شده و محاسبه شده بر اساس نتایج مدل‌های MODFLOW، SVD-GMDH

بحث

هدف این مطالعه شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت اراک با استفاده از مدل MODFLOW و شبکه عصبی GMDH استفاده شد. در این تحقیق ابتدا مدل ناپایدار MODFLOW برای یک دوره هشت‌ساله (فروردین ۱۳۸۵ الی اسفند ۱۳۹۳) با گام زمانی ماهانه واسنجی گردید. سپس این مدل برای یک دوره دو ساله (فروردین ۱۳۹۳ الی اسفند ۱۳۹۵) صحت‌سنجی شد.

نتیجه‌گیری

هدف این مطالعه شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمین با استفاده از مدل‌های عددی و شبکه عصبی عمیق است. هر کدام از این مدل‌ها ویژگی‌های منحصر به فردی دارند. به عنوان مثال مدل‌های عددی هم‌زمان با شبیه‌سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی

توانایی محاسبه بیلان آبخوان و تأثیر آن بر این نوسانات را دارند، این مسئله باعث می شود به راحتی بتوان تأثیر عوامل مختلف مانند تغییرات آب و هوا بر این نوسانات را ارزیابی کرد. از طرف دیگر بر خلاف مدل های عددی، شبکه های عصبی برای شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی وابسته به شرایط فیزیکی آبخوان و پارامترهای هیدروژئولوژیکی مانند هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه نیستند. این مسئله باعث می شود بتوان با استفاده از اطلاعات کمتر و درعین حال بادقت بیشتری نوسانات سطح آب زیرزمینی را شبیه سازی کرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Ahmadi, S. H., & Sedghamiz, A. (2007). Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Environmental monitoring and assessment*, 129(1), 277-294. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9361-z>
- Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. *Earth Sci Inform*, 16, 3227–3241. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1>
- Arabgol, R., Sartaj, M., & Asghari, K. (2016). Predicting nitrate concentration and its spatial distribution in groundwater resources using support vector machines (SVMs) model. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(1), 71-82. <https://doi.org/10.1007/s10666-015-9468-0>
- Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2023) Modelling and prediction of groundwater level using wavelet transform and machine learning methods: A case study for the Sahneh Plain, Iran. *Irrigation and Drainage*, 72(3), 747–762. <https://doi.org/10.1002/ird.2794>
- Bear, J. (2012). *Hydraulics of groundwater*. Courier Corporation, Mineola, New York. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2874426>
- Bloomfield, J., Marchant, B., Bricker, S., & Morgan, R. (2015). Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4327-4344. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4327-2015>
- Chen, C., He, W., Zhou, H., Xue, Y., & Zhu, M. (2020). A comparative study among machine learning and numerical models for simulating groundwater dynamics in the Heihe River Basin, northwestern China. *Scientific reports*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60698-9>
- Choubin, B., & Malekian, A. (2017). Combined gamma and M-test-based ANN and ARIMA models for groundwater fluctuation forecasting in semiarid regions. *Environmental Earth Sciences*, 76(15), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6870-8>
- Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., & Bobée, B. (2001). Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resources Research*, 37(4), 885-896. <https://doi.org/10.1029/2000WR900368>
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H., & Gharabaghi, B. (2018). Development of more accurate discharge coefficient prediction equations for rectangular side weirs using adaptive neuro-fuzzy inference system and generalized group method of data handling. *Measurement*, 116, 473-482. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.11.023>
- Esmaili, F., Shabanlou, S., & Saadat, M. (2021). A wavelet-outlier robust extreme learning machine for rainfall forecasting in Ardabil City, Iran. *Earth Sci Inform*, 14(4), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00681-8>
- Fallahi, M.M., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & IzadBakhsh, M.A. (2023). Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Appl Water Sci*, 13(143). <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8>
- Farlow, S. J. (1981). The GMDH algorithm of Ivakhnenko. *The American Statistician*, 35(4), 210-215. <https://doi.org/10.1080/00031305.1981.10479358>
- Ghazanfari, N., Gholami, S., Emad, A., & Shekarchi, M. (2017). Evaluation of GMDH and MLP networks for prediction of compressive strength and workability of concrete. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 86, 855-868. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.7032>

- Hálek, V., & Švec, J. (2011). Groundwater hydraulics. *Elsevier Science imprintation*, Amsterdam, Netherlands. <https://shop.elsevier.com/books/groundwater-hydraulics/halek/978-0-444-99820-0>
- Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C., & McDonald, M. G. (2000). Modflow-2000, the u. s. geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. *Open-file report. U. S. Geological Survey publications*, Washington, United States of America. <https://doi.org/10.3133/ofr200092>
- Ivakhnenko, A., & Ivakhnenko, G. (1995). The review of problems solvable by algorithms of the group method of data handling (GMDH). *Pattern recognition and image analysis c/c of raspoznavaniye obrazov i analiz izobrazhenii*, 5, 527-535. <https://articles.gmdh.net/review/algorithm.pdf>
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J.-D., & Ross, A. (2016). Integrated groundwater management. *Springer Open publications*, New York City, United States of America. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9>
- Jalali, M., Karami, S., & Marj, A. F. (2016). Geostatistical evaluation of spatial variation related to groundwater quality database: case study for Arak plain aquifer, Iran. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(6), 707-719. <https://rd.springer.com/article/10.1007/s10666-016-9506-6>
- Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2023). A hybrid machine learning model for modeling nitrate concentration in water sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(11), 721. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06745-3>
- Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101062. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062>
- McLachlan, P., Chambers, J. E., Uhlemann, S. S., & Binley, A. (2017). Geophysical characterisation of the groundwater–surface water interface. *Advances in Water Resources*, 109, 302-319. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.016>
- Mirzavand, M., & Ghazavi, R. (2015). A stochastic modelling technique for groundwater level forecasting in an arid environment using time series methods. *Water resources management*, 29(4), 1315-1328. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0875-9>
- Moon, S.-K., Woo, N. C., & Lee, K. S. (2004). Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. *Journal of hydrology*, 292(1-4), 198-209. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.030>
- Neuman, S. P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4), 1031-1045. <https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031>
- Panahi, J., Mastouri, R., & Shabanlou, S. (2022). Insights into enhanced machine learning techniques for surface water quantity and quality prediction based on data pre-processing algorithms. *Journal of Hydroinformatics*, 24(4), 875–897. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.022>
- Prickett, T. A., & Lonquist, C. G. (1971). Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation. *Bulletin (Illinois State Water Survey) no. 55*, Urbana-Champaign, Chicago. <https://hdl.handle.net/2142/94585>
- Sahoo, S., Russo, T., Elliott, J., & Foster, I. (2017). Machine learning algorithms for modeling groundwater level changes in agricultural regions of the US. *Water Resources Research*, 53(5), 3878-3895. <https://doi.org/10.1002/2016WR019933>

- Santos, S., Gaspar, A. T. F., & Schiozer, D. J. (2018). Comparison of risk analysis methodologies in a geostatistical context: Monte Carlo with joint proxy models and discretized latin hypercube. *International Journal for Uncertainty Quantification*, 8(1). <https://doi.org/10.1615/Int.J.UncertaintyQuantification.2018019782>
- Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural networks*, 61, 85-117. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2014.09.003>
- Seifi, A., Ehteram, M., Singh, V. P., & Mosavi, A. (2020). Modeling and uncertainty analysis of groundwater level using six evolutionary optimization algorithms hybridized with ANFIS, SVM, and ANN. *Sustainability*, 12(10), 4023. <https://doi.org/10.3390/su12104023>
- Shabanlou, S. (2018). Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on the end of circular channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.003>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). Groundwater hydrology. *John Wiley & Sons publications*, New York City, United States of America. <https://www.wiley.com/en-us/Groundwater+Hydrology%2C+3rd+Edition-p-9780471059370>
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1995). Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. *Academic Press*, Cambridge, Massachusetts, United States of America. https://books.google.com/books/about/Introduction_to_Groundwater_Modeling.html?id=uJT-jwTZQW8C
- Zhang, A., Winterle, J., & Yang, C. (2020). Performance comparison of physical process-based and data-driven models: a case study on the Edwards Aquifer, USA. *Hydrogeology Journal*, 28(6), 2025-2037. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02169-z>



Study of the effect of subsurface slot on reducing scour at the base of a square nose bridge

Samira Farhadi¹ , Mehdi Asadi-Aghbolaghi² , Elham Ghanbari-Adivi³ , and Ali Raeisi⁴ 

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: samira.farhadiii.s@gmail.com
2. Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mahdi.asadia@gmail.com
3. Corresponding author, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: ghanbariadi@sku.ac.ir
4. Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: ali.raeisi@sku.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 23 July 2024
Received in revised form 18 October 2024

Accepted 23 November 2024
Available online 25 March 2025

Keywords:

scour control,
bridge pier,
slot,
floating object.

ABSTRACT

Objective: The objectives of this research were: Investigating the effect of the presence of floating objects on scour around the bridge piers. 2- Laboratory investigation of the effect of a gap below the bed surface in a square bridge pier on reducing scour depth in the presence of floating objects. 3- Presenting an equation to consider the effect of a gap below the bed surface on reducing scour depth in the presence of floating objects.

Method: In this study, the effect of creating a subsurface gap in a square pier with a sharp tip on reducing the scour around the bridge pier, where a rectangular floating object is trapped behind the pier, was experimentally investigated. The study was conducted on 2 piers, one with a gap and one without, 3 floating objects (in positions above the water surface, at the water level, and below the water surface), and 4 flow rates (10, 20, 30, and 40) liters per second. A gap of (18+7 cm) was created in the pier, with 7 centimeters of the gap length placed within the bed.

Results: For the base without a gap without the presence of an object, the depth of the washout pit increased with the increase in flow rate, and after placing the object behind the base, it was observed that the increase in the flow rate increases the depth of the washout. The closer the object is to the water surface, the scour around the base decreases and vice versa. The closer the object is to the surface of the bed, the deeper the scour increases. The scour depth increased with the increase in flow rate, and in examining the effect of the size of the floating object, the scour depth increased as the size of the floating object increased. Increasing the flow rate enhances both the depth and volume of the sinkhole. Accumulation of floating objects around the bridge base increases the depth and volume of the sinkhole compared to the absence of floating objects. Creating a gap is an efficient method to control erosion around the bridge pier. The pier, with a gap of 7 cm below the surface of the bed up to 40.8% compared to the control sample, controls erosion around the base.

Conclusions: The results from 80 experiments indicate a reduction in scour by up to 40.8 percent compared to the control sample; therefore, the use of the gap helps control scour around the pier.

Cite this article: Frahadi, S., Asadi-Aghbolaghi, M., Ghanbari-Adivi, E., & Raeisi, A. (2025). Study of the effect of subsurface slot on reducing scour at the base of a square nose bridge. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 16-34. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11120.1138>



Introduction

Bridges are known as important structures all over the world, and the importance of these structures becomes more apparent during floods. Unfortunately, due to various reasons, including the problems caused by the destructive effects of erosion around the bridge foundations, incidents such as bridge failure occur. These incidents cause irreparable damage and it is in this situation that the importance of knowing the important factors of the bridge failure threat becomes more important. Erosion is the movement of bed sediments in the direction of water flowing from one place to another. Washing in the river bed is either due to natural factors such as collisions with foliage and tree trunks, etc., which are in the path of the flow, or due to human factors such as the creation of structures. It is like a bridge in the path of a stream. Used to control the local erosion around the bridge foundations, the direct method is to strengthen the bed through protection stones, etc., and the indirect method is to change the pattern. The current formed around the base of the bridge is like creating a collar and gap, etc.

Method

In this research, by creating a gap in the base of the square bridge with a sharp nose and by placing a floating object behind the base, the depth of local water-wash around the base has been investigated. The experiments were carried out in the hydraulic laboratory of Shahrekord university, in a laboratory flume with a length of 20 meters, width and height of 60 cm and in clear water conditions. The bed materials were used from uniform sediments passed through sieve No. 16 and remaining on sieve 25. By drawing the grading curve, the average diameter of the bed sediments was 0.85 mm. The length of the test bed was 4 meters and the width of the bed was the same as the width of the flume (60 cm), and the bed height was 16 cm. A square base with a sharp nose without a gap was used for the witness and a square base with a sharp nose with a gap, with dimensions of 25 cm in length (18 cm above the bed surface + 7 cm below the bed surface) and 2.55 cm in width were used. Floating objects were designed in 3 different sizes (10x15x20 cm) for object M1, 25x10x10 cm for object M2, and 10x20x30 cm (10x20x30 cm) for object M3. The height of all 3 objects is 10 cm, but the width of the objects from small to large was 20, 25 and 30 cm, which are proportionally larger than each other, but the most important factor is the length of the floating object, which in this examination was selected from small to large object, 15, 12 and 20 cm respectively, and the length of object M2 is smaller than M1. The floating objects were placed behind the foundations in 3 positions: the object is above the water level, the object is at the same level as the water, and the object is below the water level. For each foundation, the washing was first checked without the presence of the floating object and then with the presence of the floating object. Experiments were performed for 4 flow rates (10, 20, 30 and 40 L/s) and the height of water on the bed surface was 20 cm and considered constant. For each footing, the effect of flow rate, the effect of the size of the floating object, and the effect of the position of the object behind the bridge footing were investigated.

Results

By examining the results of 80 tests, for the base without a gap without the presence of an object, the depth of the washout pit increased with the increase in flow rate, and after placing the object behind the base, it was observed that the increase in the flow rate increases the depth of the washout. In the investigation of the size of the floating object behind the base, as the length and width of the floating object increased, the scour pit became wider, and in the investigation of the effect of the position of the floating object, it was observed that the closer

the object is to the water surface, the scour around the base decreases and vice versa. The closer the object is to the surface of the bed, the deeper the scour increases. For the cracked base, a gap was observed 7 cm below the surface of the bed without a floating object. The scour around this base was not observed without the presence of a floating object for the flow rate of 10, 20 and 30 liters per second, but for the flow rate of 40 liters per second. The scour depth was reported to be 1.3 cm, which reduced the scour around the base by 72.3 percent compared to the control base without a gap, which was 4.7 cm. After placing the floating object behind the base, by examining the effect of flow rate, it was observed that the scour depth increased with the increase in flow rate, and in examining the effect of the size of the floating object, the scour depth increased as the size of the floating object increased. And in the investigation of the position of the floating object at the flow rate of 10 and 20 liters per second, no scour was observed around the base of the bridge in any of the investigation modes. At a flow rate of 30 liters per second with object M1 present, scouring around the base of the bridge has intensified as the object descends relative to the water level. However, for objects M2 and M3, when positioned at the same water level, the scouring depth is greater than when the object is submerged. At a flow rate of 40 liters per second, for all three floating objects, scouring is more pronounced when the object is at the water level compared to when it is below the surface. Increasing the flow rate enhances both the depth and volume of the sinkhole. Accumulation of floating objects around the bridge base increases the depth and volume of the sinkhole compared to the absence of floating objects.

Conclusions

Increasing the length of the floating object reduces the scour around the bridge base. Placing floating objects above the water surface causes less washing than placing them below the surface. In the base without the presence of the floating object, the maximum scour depth was formed next to the square rib of the base, and after the presence of the object behind the base, the maximum scour depth was formed near the tip of the nose. Creating a gap in the base of the bridge at low flow rates, 10 and 20 liters per second, controlled the erosion around the base. Creating a gap is an efficient method to control erosion around the bridge pier. The pier, with a gap of 7 cm below the surface of the bed up to 40.8% compared to the control sample, controls erosion around the base.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Acknowledgements

This research has been conducted with the support of Shahrekord University, and we hereby express our gratitude for this support.

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش آبشستگی پایه پل مربعی دماغه تیز، در حضور جسم شناور

سمیرا فرهادی^۱، مهدی اسدی آقبلاغی^۲، الهام قنبری عدیوی^۳، و علی رئیسی^۴

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: samira.farhadiii.s@gmail.com

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mahdi.asadia@gmail.com

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: ghanbariadi@sku.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: ali.raeisi@sku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: هدف از این تحقیق موارد زیر است:	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
بررسی اثر حضور اجسام شناور بر آبشستگی اطراف پایه پل ۲- بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف زیر سطح بستر در پایه پل مربعی شکل بر کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور ۳- ارائه یک معادله برای در نظر گرفتن اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۲
روش پژوهش: در این تحقیق از ایجاد شکاف در پایه کمک گرفته شده است. در این پژوهش اثر ایجاد شکاف زیر سطح بستر در یک پایه مربعی دماغه تیز بر کاهش آبشستگی اطراف پایه پل که یک جسم شناور مکعب مستطیلی در پشت پایه گرفتار شده است به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵
یافته‌ها: افزایش دبی جریان باعث افزایش عمق و حجم چاله آبشستگی می‌شود. تجمع اجسام شناور حول پایه پل باعث افزایش عمق و حجم چاله آبشستگی نسبت به عدم حضور اجسام شناور می‌شود. افزایش طول جسم شناور باعث کاهش آبشستگی حول پایه پل می‌شود. قرار گرفتن اجسام شناور در بالای سطح آب، آبشستگی کمتری نسبت به قرار گیری در حالت زیر سطح ایجاد می‌کنند. پایه بدون حضور جسم شناور، بیشترین عمق آبشستگی در کنار ضلع مربعی پایه شکل می‌گرفت و بعد از حضور جسم پشت پایه بیشترین عمق آبشستگی در نزدیکی نوک دماغه شکل می‌گرفت. ایجاد شکاف در پایه پل در دبی‌های کم، ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه موجب کنترل فرسایش حول پایه بود. ایجاد شکاف یک روش کارآمد برای کنترل آبشستگی حول پایه پل است. پایه با شکاف ۷ سانتی متر زیر سطح بستر تا ۴۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد موجب کنترل آبشستگی حول پایه می‌شود.	کلیدواژه‌ها: کنترل آبشستگی، پایه پل، شکاف، جسم شناور
نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از ۸۰ آزمایش نشان دهنده کاهش آبشستگی تا ۴۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد است؛ بنابراین استفاده از شکاف موجب کنترل آبشستگی حول پایه می‌شود.	

استناد: فرهادی، سمیرا؛ اسدی آقبلاغی، مهدی؛ قنبری عدیوی، الهام؛ و رئیسی، علی. (۱۴۰۴). بررسی اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش آبشستگی پایه پل مربعی دماغه تیز، در حضور جسم شناور. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۱)، ۱۶-۳۴.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11120.1138>



© نویسنده گان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

آبشستگی یکی از مخرب‌ترین عوامل شکست پایه پل در طبیعت به شمار می‌آید. همه ساله در سراسر جهان موضوع شکست پل و عوامل تخریب آن مهم‌ترین مسئله به‌ویژه در زمان بروز سیل‌های ویرانگر به شمار می‌آید، این موضوع دانشمندان و پژوهشگران را به تکاپو برای ارائه راه‌حل مطمئن وا می‌دارد؛ بنابراین تلاش برای حفاظت از پل‌ها در برابر آبشستگی امری ضروری است. آبشستگی حرکت و جاداشدن ذرات بستر توسط جریان و انتقال آن‌ها به مکان دیگر است که حاصل اندرکنش نیروی محرک ایجاد شده توسط جریان و نیروی مقاوم ناشی از وزن ذرات و اصطکاک میان ذرات بستر است (ماهان، ۱۳۹۱).

هنگام برخورد آب به دماغه پایه پل، سرعت ناشی از جریان تبدیل به فشار روی پایه می‌شود، سرعت از سطح آب به سمت کف بستر کاهش می‌یابد، همچنین فشار دینامیکی روی پایه از بالا به پایین هم کاهش می‌یابد و این گرادیان فشار باعث به‌وجود آمدن جریانی به سمت کف بستر خواهد شد. بعد از برخورد جریان به کف بستر، جریان در جهت‌های مختلف پراکنده شده و باعث ایجاد حفره‌هایی در محل برخورد به بستر شده و در ادامه مقداری از این جریان که به سمت بالا پراکنده شده در برخورد با جریان عمومی مجبور به ادامه مسیر در جهت این جریان شده و مجدد به پایه برخورد کرده و در داخل حفره ایجاد شده گردابی تشکیل می‌دهد که در دو طرف پایه به شکل نعل اسب^۱ جریان می‌یابند که باعث انتقال مصالح در دو طرف پایه می‌شوند. در برخورد جریان آب با کناره‌های پایه (به جز دماغه) خطوط جریان منحرف شده و از بدنه جدا شده و در نتیجه گردابی در پشت پایه به وجود می‌آورد که محور این جریان قائم است و به اسم گردابه‌های برخاستگی^۲ شناخته می‌شوند، این گردابه‌ها رسوبات کنده شده حفره آبشستگی را به پایین دست پایه انتقال می‌دهند (رحیمی، ۱۳۹۶).

در سال‌های اخیر به‌وفور سیل‌های غیرقابل کنترل رخ داده است که باعث فرسایش ساحل رودخانه‌ها و ریشه‌کن شدن درختان می‌شود. اجسام شناور مانند برگ، سرشاخه‌ها و قطعات بزرگ چوب که طی یک سیلاب از بالادست حرکت کرده در اطراف پایه پل تجمع می‌یابند. زمانی که یک توده از اجسام شناور جلوی پایه شکل می‌گیرد، فضاهای خالی آن توسط برگ، سرشاخه‌ها، علف‌ها، و رسوبات پر می‌شود و باعث مسدود شدن بخشی از دهانه پل و یا بستن کامل آن می‌شود که در ادامه این انسداد و تنگ‌شدگی، آشفته‌گی جریان در جلوی پایه پل و باعث افزایش عمق حفره آبشستگی خواهد شد (مشعشی و اسدی، ۱۳۹۴).

اجسام شناور چوبی در جلوی پایه‌ها به شکل‌های مختلفی روی هم انباشته می‌شوند که بیشتر به شکل مکعب‌مستطیل مشاهده می‌شوند (ابوسعیدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ و لاگاس و همکاران^۳، ۲۰۱۰). آورده‌های شناور چوبی بزرگ، سطح مقطع جریان را کاهش داده، جریان را منحرف کرده و سرعت را در برخورد با پایه پل افزایش خواهد داد (پاگلیارا و کارناسینا^۴، ۲۰۱۱).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

روش‌های مختلفی تا کنون برای کاهش آبشستگی پایه پل به کار گرفته شده است که یا به‌صورت مستقیم با استفاده از سنگ‌ریز حفاظتی، تشک حفاظتی و منحرف‌کننده‌ها بستر را مقاوم‌سازی می‌کنند (بیات، ۱۳۷۹) و یا به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از طوق و شکاف و شمع‌های حفاظتی نیروهای مخرب کاهش داده می‌شوند و الگوی جریان اصلاح می‌شود (اردلانی و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های پیشنهادی محققان برای کنترل و کاهش آبشستگی موضعی اطراف پایه‌های پل استفاده از شکاف در پایه پل است. برای اینکه این شکاف حداکثر کارایی را در کاهش عمق آبشستگی داشته باشد، لازم است تا مشخصات این شکاف از منظر سطح شکاف، تراز شکاف نسبت به بستر و... تعیین گردد. در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

1. Horseshoe Vortex
2. Wake Vortex
3. Lagasse et al
4. Pagliara and Carnacina

۱. مطالعات داخلی

مشعشی و اسدی (۱۳۹۴) در پژوهشی آب‌شستگی اطراف پایه پل با دماغه سهمی شکل در حضور اجسام شناور چوبی در جلوی پایه را بررسی نمودند، در این مطالعه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در دو حالت وجود اجسام شناور و یا نبود آن‌ها در سه دبی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه و ابعاد مختلف اجسام شناور انجام شد. در این آزمایش‌ها از یک پایه مربعی با دماغه سهمی شکل به ضلع ۹ سانتیمتر و ارتفاع دماغه سهمی ۱۵ سانتیمتر استفاده شد. نتیجه مشاهدات نشان داد که وقتی اجسام شناور بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب قرار بگیرند عمق چاله آب‌شستگی به ترتیب $۲/۲،۳۶/۲$ و $۱/۴۴$ برابر نسبت به نمونه شاهد که بدون اجسام شناور است است. که بیشترین مقدار مربوط به تجمع اجسام شناور هم سطح آب و جلو پایه مربعی بادماغه سهمی شکل برابر $۲/۳۶$ بود.

رحیمی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی اطراف پایه پل را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش اثر دبی جریان، عمق آب روی سطح بستر، شکل و ضخامت اجسام شناور و موقعیت اجسام شناور در طی ۴۵ آزمایش بررسی شد. بر اساس نتایج هرچه میزان عمق آب روی بستر بیش‌تر باشد باعث کاهش آب‌شستگی اطراف پایه پل می‌شود، با افزایش دبی فرسایش بستر و آب‌شستگی حول پایه بیشتر شده و با بررسی اثر شکل‌ها به ترتیب شکل‌های مستطیلی، استوانه‌ای و مثلثی باعث افزایش آب‌شستگی می‌شود و قرارگیری اجسام شناور در نزدیکی سطح بستر سبب افزایش آب‌شستگی حول پایه پل می‌شوند

ابوسعیدی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی پایه و تکیه‌گاه پل در شرایط آب زلال نشان دادند که هرچه فاصله بین پایه‌ها و همچنین با تکیه‌گاه کمتر باشد افزایش عمق آب‌شستگی در اطراف پایه و تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد و هرچه ضخامت و طول مؤثر اجسام شناور بیشتر باشد عمق آب‌شستگی بیشتر خواهد شد. همچنین شکل اجسام شناور نیز بر عمق آب‌شستگی مؤثر خواهند بود. اشکال مستطیلی، استوانه‌ای و مثلثی به ترتیب بیشترین آب‌شستگی را به وجود آوردند. مقایسه نهایی توپوگرافی بستر رسوبی نشان داد که در حضور اجسام شناور افزایش $۴۷/۶$ درصد در حجم آب‌شستگی نسبت به آزمایش شاهد (بدون حضور اجسام شناور) رخ داده است.

اردلانی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی اثر مساحت سطح شکاف در پایه در کاهش آب‌شستگی موضعی اطراف پایه پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش در شرایط آب زلال و برای چهار دبی ۳۲، ۲۹، $۲۵/۶$ و $۲۱/۲$ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که عمق آب‌شستگی رابطه مستقیمی با عدد فرود و تراز شکاف نسبت به بستر و رابطه عکس با مساحت سطح شکاف دارد. بهترین کارایی ایجاد شکاف در پایه، در بیشترین ابعاد شکاف، در تراز زیر بستر و در شرایط کمترین عدد فرود، عمق آب‌شستگی در اطراف پایه‌ها، $۵۵/۴$ درصد کاهش داشته است. پس به‌طور کلی استفاده از شکاف عملکرد مثبتی برای کاهش آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل به حساب می‌آید و با افزایش عدد فرود و قرارگرفتن شکاف در بالاتر از تراز بستر افزایش عمق آب‌شستگی را مشاهده کرد.

حیدری و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی استفاده از شکاف در پایه پل برای کاهش عمق آب‌شستگی پایه پل را به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با استفاده از چهار شکاف با اشکال دوزنقه‌ای، دوزنقه‌ای برعکس، مثلثی، مثلثی برعکس و سطح مقطع یکسان و در شرایط هیدرولیکی با اعداد فرود $۰/۳$ ، $۰/۲۷$ ، $۰/۲۴$ ، $۰/۲$ انجام شد. در نتایج حاصل مشخص شد که در پایه بدون شکاف با افزایش عدد فرود به میزان ۵۰ درصد، حداکثر عمق آب‌شستگی و حجم چاله آب‌شستگی به ترتیب $۳/۱$ و ۹ برابر می‌شود. باتوجه به نتایج، عمق و حجم گودال آب‌شستگی در شکاف دوزنقه‌ای و در عدد فرود $۰/۲$ بهترین عملکرد و کاهش تقریبی $۷۳/۵۸$ ، $۸۱/۵۹$ را داشته است. و شکاف مثلثی در شرایط یکسان و عدد فرود $۰/۳۰$ کاهش تقریبی $۱۵/۵$ ، $۴۲/۸۱$ در عمق و حجم گودال آب‌شستگی، و کمترین عملکرد را داشته است. افزایش عدد فرود جریان، تغییرات توپوگرافی بستر کانال و همچنین افزایش حجم گودال آب‌شستگی را به همراه داشت. با قرارگیری تراز شکاف بالاتر از بستر، عمق آب‌شستگی افزایش یافت.

کاظمیان و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی اثر شکاف در کاهش آبشستگی پایه پل در بستر با رسوب‌های یکنواخت و غیر یکنواخت را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از ۴ پایه استوانه‌ای به‌عنوان مدل آزمایشگاهی که یک‌پایه به‌عنوان نمونه شاهد بدون شکاف و ۳ پایه استوانه‌ای شکاف‌دار با شکافی به ارتفاع b و فاصله b از بستر، شکافی به ارتفاع b و هم سطح بستر و شکافی به ارتفاع b و بالای بستر و $1/55$ برابر b زیر بستر استفاده شد. بر اساس نتایج، هرچه شکاف به کف بستر نزدیکتر باشد موجب کاهش آبشستگی اطراف پایه پل می‌شود، در بستر یکنواخت ۴۷ درصد و در بستر غیریکنواخت ۷۷ درصد باعث کاهش آبشستگی حول پایه پل می‌شود و نتیجه گرفتند که هرچه بستر غیریکنواخت‌تر باشد به دلیل ایجاد لایه سپری در حول پایه پل، آبشستگی اطراف پایه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۲. مطالعات خارجی

پاگلیارا و کارناسینا (۲۰۱۰) در پژوهشی اثر زبری و تخلخل خرده‌های چوب بر آبشستگی پایه پل را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه در مرکز تحقیقات دانشگاه پیزا ایتالیا و در شرایط آب زلال انجام شد، کانال آزمایش دارای $7/6$ متر طول و $0/61$ متر عرض و $0/5$ متر عمق که از جنس فولاد و شیشه تشکیل شده بود. شدت جریان از ۶۵ تا ۱۰۰ درصد سرعت آستانه متغیر بود و تا ۱۸ درصد مساحت کل جریان را در بر گرفت. عمق جریان از $2/67$ تا $5/67$ برابر قطر پایه متغیر بود. در این پژوهش اثرات زبری و تخلخل خرده‌های چوب از نظر تکامل زمان آبشستگی و مورفولوژی آبشستگی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که عمق آبشستگی در حضور تجمع خرده‌های چوب تا سه برابر افزایش می‌یابد، زبری نسبی خرده‌های چوب رابطه مستقیمی با آبشستگی پایه پل دارد و پارامترهای مؤثر بر تکامل زمان آبشستگی، شدت جریان و نسبت انسداد است.

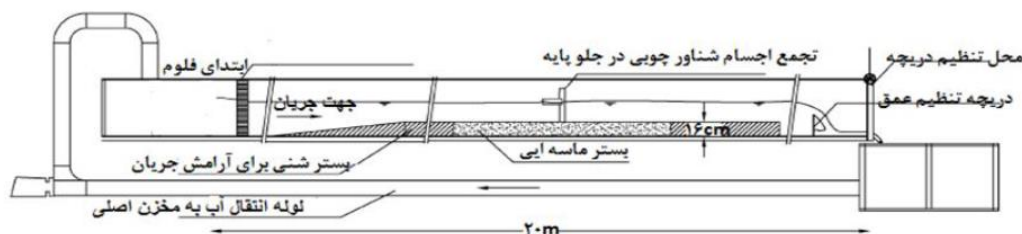
پاگلیارا و کارناسینا (۲۰۱۱) در پژوهشی تأثیر خرده‌های بزرگ چوبی بر آبشستگی رسوبات در پایه‌های پل را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این مقاله تحلیل تأثیر سطح حاصل از اجسام تجمع اجسام شناور چوبی بر آبشستگی پایه پل است. اندازه‌های مختلف پایه، عرض کانال و مواد رسوبی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. حداکثر حفره آبشستگی در حضور تجمع اجسام شناور با حداکثر حفره آبشستگی برای یک‌پایه مجزا مقایسه شده است. در نهایت، داده‌ها با یافته‌های تحقیقات قبلی مقایسه شده‌اند که گسترش آبشستگی در پایین دست پایه پل در حضور تجمع اجسام شناور را نشان می‌دهند. همچنین روابط جدیدی برای پیش‌بینی اثر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی پایه پل، هم از نظر آبشستگی ماکزیمم نسبی و هم تکامل آبشستگی زمانی ارائه شده است. اثر تجمع رسوبات بر اساس مقایسه بین تکامل آبشستگی حداکثر زمانی برای آزمایش در حضور تجمع اجسام شناور بزرگ (LWD) ^۱ و تکامل آبشستگی حداکثر زمانی برای پایه جدا ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌داد که هر دو طول تجمع (LWD) در امتداد پایین دست پایه تأثیر زیادی بر آبشستگی پایه پل دارند. ماسه برای حفاظت از پایه در برابر آب-شستگی مؤثرتر از حالت تنها با طوقه بود.

باتوجه به اهمیت مسئله آبشستگی اطراف پایه‌های پل و همچنین باتوجه به مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه، لزوم یک بررسی متمرکز بر روش‌های کاهش آبشستگی کاملاً آشکار است. طبق مطالعات انجام شده، تا کنون تحقیقی در مورد کاهش عمق آبشستگی پایه پل مربعی‌شکل با دماغه تیز دارای شکاف زیر سطح بستر که در جلوی پایه تجمع اجسام شناور رخ داده باشد، به‌صورت هم‌زمان انجام نشده است؛ لذا در این پژوهش با استفاده از تعبیه شکاف زیر سطح بستر در پایه در حضور اجسام شناور، کارایی این روش در کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ها به‌صورت مدل فیزیکی بررسی گردید و هندسه گودال آب-شستگی ایجاد شده با نمونه شاهد مقایسه و تحلیل شد.

هدف از این تحقیق، بررسی اثر حضور اجسام شناور بر آبشستگی اطراف پایه پل ۲- بررسی آزمایشگاهی اثر شکاف زیر سطح بستر در پایه پل مربعی‌شکل بر کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور ۳- ارائه یک معادله برای در نظر گرفتن اثر شکاف زیر سطح بستر در کاهش عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور است.

روش پژوهش

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. تمام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در بستر رسوبی به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر، در طول ۴ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. پایه در وسط فلوم و در فاصله ۱۰ متر از حوضچه آرامش قرار داده شد و برای جلوگیری از فروریختن ابتدا و انتهای بستر رسوبات و آرامش جریان از سنگ‌ریزه در ابتدا و انتهای بازه بستر رسوبی استفاده شد که در شکل (۱) نشان داده شده است. تجهیزات آزمایشگاه شامل یک فلوم به طول ۲۰ متر و عرض و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر که دیواره‌ها از پلی‌گلاس ساخته شده و امکان داده برداری در حین آزمایش فراهم بود. ابتدای فلوم یک حوضچه آرامش تعبیه شده است و سه ورق فلزی پوشیده از پوشال برای آرامش بیشتر جریان در حوضچه قرار داده شده و انتهای فلوم، یک دریچه برای تنظیم عمق جریان قرار دارد که جریان بعد از خروج از دریچه انتهایی به یک چاهک که در فاصله کمی از دریچه قرار دارد می‌ریزد و دوباره توسط سیستم چرخش آب به ابتدای فلوم و لوله ورودی منتقل می‌شود. بر روی لوله ورودی جریان به حوضچه آرامش یک دبی سنج جهت قرأت دبی نصب شده و یک شیر برای تنظیم جریان ورودی به حوضچه قرار دارد. دو کلید روی یک صفحه کنترل برای روشن و خاموش شدن پمپ قرار دارد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از فلوم آزمایشگاه

مواد بستر باید به گونه‌ای انتخاب شود که از تشکیل ریبیل جلوگیری شود، ریبیل یا فرم بستر در شرایطی شکل می‌گیرد که سرعت جریان از سرعت بحرانی آستانه حرکت مواد بستر بیشتر باشد در این حالت مواد بستر از بالادست کنده شده و در گودال آبخستگی جایگزین ذرات بستر که در اثر برخورد جریان به پایه شکل گرفته می‌شوند، و کل بستر هم‌زمان دچار فرسایش و آبخستگی می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است.



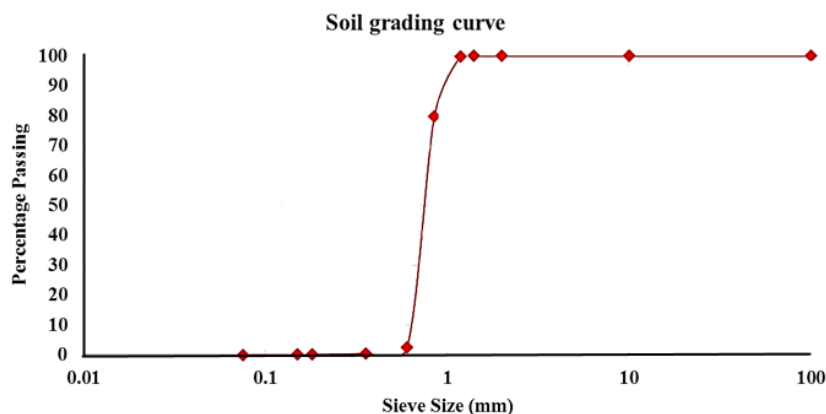
شکل ۲. فرم بستر شکل گرفته در تحقیق حاضر

رادکیوی و اتما (۱۹۸۳) برای جلوگیری از تشکیل ریبیل پیشنهاد دادند که قطر متوسط ذرات رسوبی کمتر از ۰/۷ میلی‌متر نباشد و از طرفی برای جلوگیری از تأثیر اندازه ذرات رسوبی بر عمق آبخستگی باید در رابطه زیر صدق کند.

$$0.7 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 3.6 \text{ mm} \quad (۱)$$

برای انجام آزمایش ابتدا مصالح موردنیاز بستر با استفاده از الک‌های شماره ۱۶ و ۲۵ فراهم شد. در مرحله بعد برای رسم منحنی دانه بندی و یافتن قطر متوسط ذرات بستر مقداری از ماسه‌های الک شده را وزن کرده و در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه مورد آزمایش قرار داده، به این صورت که ابتدا الک‌ها به ترتیب روی دستگاه لرزاننده چیده شد و سپس نمونه وزن شده را روی بالاترین الک ریخته و دستگاه را روشن کرده تا ماسه‌ها در الک به لرزه درآیند و به الک‌های پایین منتقل شوند و به مدت

ده دقیقه این عمل لرزش الکها توسط دستگاه انجام شد بعد از به اتمام رسیدن زمان دستگاه را خاموش کرده و با دقت زیاد وزن باقی مانده ماسه روی هر الک را یک به یک به ترتیب از بالا با برداشتن الکها از روی هم روی ترازو وزن کرده و در یک دفترچه یادداشت کرده و در اکسل نمودار دانه بندی را با استفاده از داده‌های ثبت شده رسم شده است و به این ترتیب اندازه D_{50} رسوبات مشخص شده است.



شکل ۳. منحنی دانه بندی

آزمایش‌ها در شرایط آب زلال انجام شد، به این دلیل که بیش‌ترین آب‌شستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد برای تعیین سرعت بحرانی، از رابطه ارائه شده توسط نیل (۱۹۷۳) استفاده می‌شود:

$$U_c = 31.08 \theta_c^2 k_{U,h} d_{50}^3 \quad (2)$$

در رابطه فوق، U_c سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت رسوبات) برحسب (m/s)، h عمق آب برحسب (m)، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی برحسب متر (m) و $k_{U,h}$ ضریب ثابتی است که مقدار آن در سیستم آمریکایی ۱ و در سیستم ۱/۸ می‌باشد. و همچنین برای محاسبه پارامتر شیلدز (θ_c) توسط رابطه پیشنهاد شده مولر (۱۹۹۶) تخمین زده می‌شود:

$$\theta_c = 0.0019 d_{50}^{-0.384} \quad \text{و} \quad d_{50} \leq 0.0009 \quad (3)$$

با استفاده از رابطه فوق مقدار پارامتر بی‌بعد شیلدز برابر با 0.286 به دست آمد که با قرار دادن در رابطه (۲) مقدار سرعت بحرانی برای تحقیق حاضر 0.391 به دست آمد. ۲ پایه مربعی دماغه تیز با طول ضلع $8/5$ سانتی‌متر و ارتفاع 60 سانتی‌متر که شامل یک‌پایه بدون شکاف (شاهد) و یک‌پایه شکاف‌دار، شکاف 7 سانتی‌متر زیر سطح بستر انتخاب شد، بر اساس پیشنهاد کومار و همکاران (۱۹۹۹) و گرمالدی و همکاران (۲۰۰۹)، راندمان شکاف در شرایطی که بخشی از شکاف داخل بستر قرار گیرد افزایش می‌یابد. آقاخانی و همکاران (۱۳۹۰)، انتخاب عرض شکاف، 0.3 قطر پایه (D) و در حالتی که شکاف داخل بستر قرار بگیرد $72/5$ درصد باعث کاهش عمق آب‌شستگی می‌شود. حیدر پور و همکاران (۱۳۸۲)، انتخاب طول شکاف 2 برابر قطر پایه که داخل بستر قرار گیرد بیشترین اثر را در کاهش آب‌شستگی دارد، بنابراین ابعاد شکاف 18 در $2/55$ سانتی‌متر ایجاد شد، بر اساس پیشنهاد دیپل (۱۹۹۷) اجسام شناور در طبیعت به شکل مکعب‌مستطیل دیده می‌شوند و با گذشت زمان این اجسام شناور به سمت پایین و پشت پایه تجمع می‌یابند در این مطالعه از سه جسم شناور به شکل مکعب‌مستطیل با ابعاد ($20 \times 15 \times 10$ cm) ابعاد جسم M1، ($25 \times 12 \times 10$ cm) ابعاد جسم M2 و ($30 \times 20 \times 10$ cm) ابعاد جسم M3، در ۳ موقعیت قرارگیری بالاتر از سطح آب (۵ سانتی‌متر بالای سطح آب)، هم سطح آب و زیر سطح آب (۵ سانتی‌متر بالای سطح بستر) استفاده شد. آزمایش‌ها شامل

۸۰ آزمایش شامل، ۲ پایه، ۴ دبی (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰)، ۳ جسم شناور و ۳ موقعیت قرارگیری جسم و برای هر پایه یک نمونه شاهد با ۴ دبی بدون حضور جسم شناور انجام گرفت. برای انجام آزمایش ابتدا یک ورق فلزی در پایین دست حوضچه آرامش در فاصله ۳ متری ابتدای بستر برای آرامش جریان قرار داده شد و دریچه انتهایی کانال، جهت به عمق رسیدن جریان به صورت کامل بسته شد. بعد از روشن شدن پمپ دبی جریان در حالت ۲ لیتر بر ثانیه تنظیم شد و تا به عمق رسیدن جریان صبر کرده در این مرحله خیلی آهسته ورق فلزی بالادست بستر را برداشته و سپس با افزایش دبی و قرأت توسط دبی سنج نصب شده روی لوله جریان ورودی به حوضچه آرامش، دبی مورد نظر را تنظیم کرده و دریچه انتهایی را همزمان با افزایش دبی با دقت و سرعت کم باز کرده تا به عمق ۲۰ سانتی متر روی سطح بستر برسد در اینجا شرایط آزمایش به حالت ایده آل رسیده و با دقت داده برداری حین آزمایش انجام می شود و بعد از به تعادل رسیدن آبشستگی حول پایه دستگاه پمپ را می توان خاموش کرد و بیشینه عمق آبشستگی و توپوگرافی بستر را توسط دستگاه عمق سنج (کولیس) اندازه گیری کرد و این دستگاه عمود بر کف کانال و روی لبه های بالایی کانال سوار شده و به راحتی در طول و عرض کانال حرکت می کند و نوک دستگاه عمق سنج تیز است که برای داده برداری دقت کار بالا میرفت و راحت تر داده برداری انجام میشد.

۱. آنالیز ابعادی

بیشترین عمق آبشستگی، d_s ، در محاسبات اطراف پایه های پل، تابعی از عوامل زیر است:

$$f(D, b, w, L_b, H_b, h, U, \sigma_g, D_{50}, U_c, \mu, \rho, g, W_d, L_d, d_s, S) = 0 \quad (۴)$$

در این رابطه D قطر پایه، L_b فاصله بین پایه و یا انتهای عرض فلوم، H_b ارتفاع پایه، b عرض فلوم، w عرض شکاف، d_s عمق آبشستگی، σ_g انحراف معیار مصالح رسوبی بستر، ρ چگالی، μ ویسکوزیته دینامیکی آب، U سرعت متوسط جریان، U_c سرعت آستانه، g شتاب گرانش، h ارتفاع آب، D_{50} میانگین قطر ذرات، W_d عرض جسم شناور، L_d طول جسم شناور و S مساحت سطح شکاف است. با به کارگیری تئوری باکینگهام و انتخاب ρ, U, h به عنوان متغیرهای تکراری، معادله (۴) را می توان به صورت رابطه بی بعد زیر نوشت:

$$\frac{d_s}{h} = f\left(\frac{h}{D_{50}}, \frac{h}{b}, \frac{h}{D}, \frac{h}{w}, \frac{h}{L_b}, \frac{h}{H_b}, \frac{h}{L_d}, \frac{h}{W_d}, \frac{U}{U_c}, \frac{\rho U h}{\mu}, \frac{U}{\sqrt{gh}}, \sigma_g, \frac{S}{h.D}\right) \quad (۵)$$

عدد رینولدز در دبی های مورد بررسی در آزمایش ها بر اساس شرایط هیدرولیکی تعریف شده در این پژوهش، بزرگتر از ۲۰۰۰ است که بیانگر این است که اثر نیروی لزجت ناچیز است و به این علت عدد رینولدز از محاسبات حذف می شود. مصالح مورد استفاده یکنواخت و ثابت می باشند؛ بنابراین فاکتور D_{50} و σ_g نیز حذف می شوند و با پارامترهایی که بیشترین تأثیر را دارند معادله (۶) که یک معادله رگرسیونی است و برای به دست آوردن عمق آبشستگی در پایه شکاف دار در حضور اجسام شناور است به دست آمد.

$$\frac{d_s}{h} = 1.319 \left(\frac{u}{u_c}\right)^{4.575} + 0.001 \left(\frac{h}{b}\right)^{.001} + 0.001 \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{.001} + 0.001 \left(\frac{L_d}{D}\right)^{.016} + 973.739 (\% \Delta A)^{4.182} + 0.048 \left(\frac{S_1}{hD}\right)^{166.486} + 0.027 \left(\frac{S_2}{hD}\right)^{210.459} \quad (۶)$$

۲. معیارهای ارزیابی

در نهایت نتایج به دست آمده از رابطه استخراج شده با نتایج واقعی مقایسه شد و با کمک معیارهای ارزیابی زیر (معادلات (۷) و (۸)) دقت این رابطه بررسی گردید.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (۷)$$

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (۸)$$

در معادله (۷)، R^2 مقدار ضریب تبیین، SSR مجموع مربعات رگرسیون و SST مجموع کل مربعات است. در معادله (۸)، MFE میانگین مجموع خطای پیش‌بینی شده است.

یافته‌های پژوهش

۱. نتایج تغییرات آبشستگی برای پایه بدون شکاف بدون حضور جسم (نمونه شاهد)

اثر دبی جریان

با بررسی نتایج آزمایش‌های مربوط به پایه بدون شکاف، مشاهده شد آبشستگی حول پایه پل بدون شکاف در حالت شاهد یعنی بدون حضور اجسام شناور حول پایه، با افزایش دبی جریان، تغییرات گودال گسترده خواهد شد که در شکل (۴) نشان داده شده است. این تغییرات برای افزایش دبی از ۲۰ به ۳۰ لیتر، عمق آبشستگی به میزان ۴۲/۸ درصد افزایش یافته است. افزایش دبی از ۳۰ به ۴۰ لیتر، موجب افزایش آبشستگی به میزان ۵۵/۳ درصد است.



ب



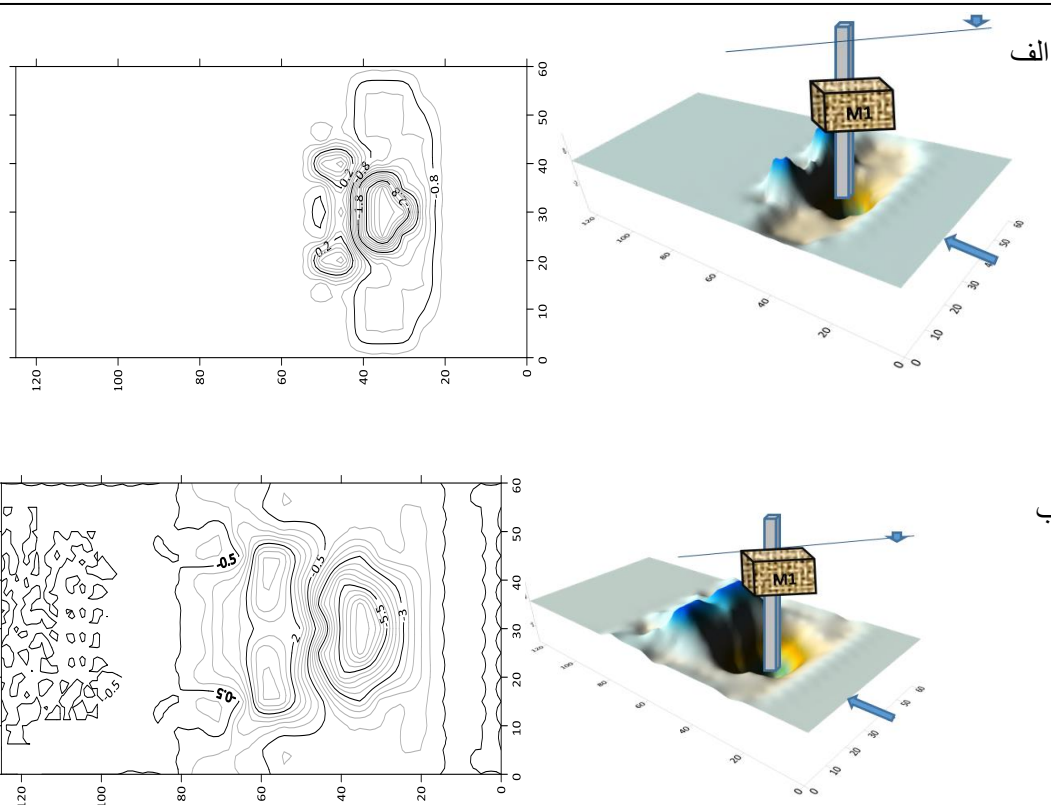
الف

شکل ۴. مقایسه گودال آبشستگی حول پایه بدون شکاف (الف) بدون جسم شناور، (ب) در حضور جسم شناور

۲. نتایج تغییرات آبشستگی برای پایه بدون شکاف در حضور جسم (نمونه شاهد)

اثر دبی جریان

شکل (۵)، مقایسه اثر افزایش دبی از ۳۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه بر آبشستگی حول پایه پل بدون شکاف در حضور جسم شناور M1 و حالت قرارگیری جسم هم‌سطح آب انجام شده است. بر اساس نتایج به دست آمده عمق آبشستگی برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه ۴/۵ سانتی‌متر و برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه به ۷/۸ سانتی‌متر رسیده است که ۴۲/۳ درصد افزایش یافته است. بر اساس شکل نیز کاملاً مشهود است که با افزایش دبی گودال آبشستگی عمیق و گسترده شده است.

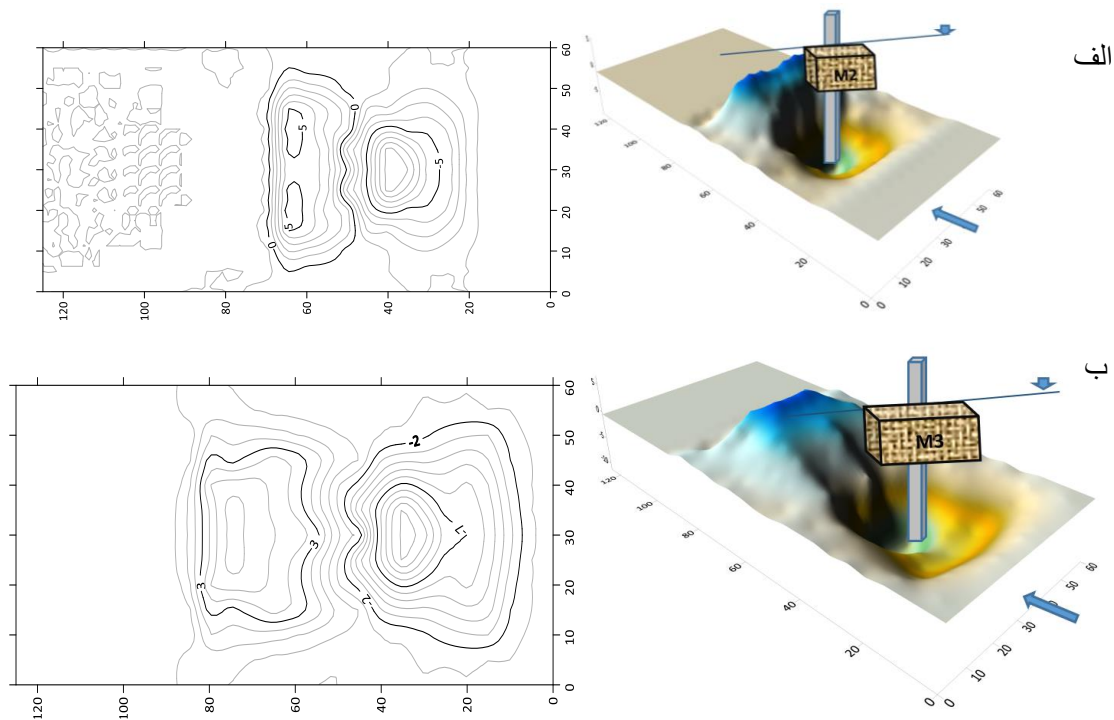


شکل ۵. مقایسه گودال آب‌شستگی حول پایه بدون شکاف در حضور جسم شناور M1 هم سطح آب برای دبی ۳۰ و ۴۰ (الف) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه (ب)، دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

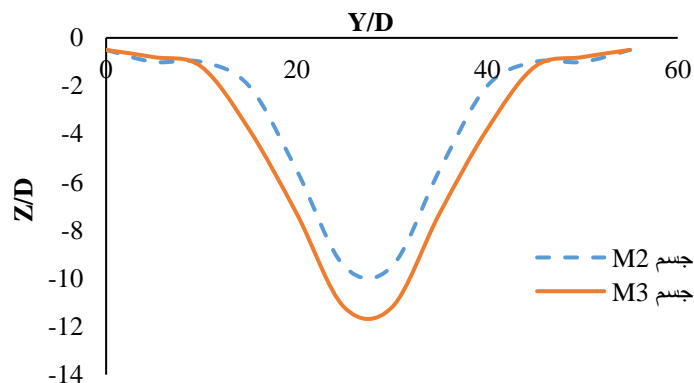
اثر اندازه جسم شناور

بررسی اثر اندازه جسم شناور، وابسته به اندازه طول، عرض و ارتفاع جسم است. در این پژوهش اجسام شناور در ۳ اندازه متفاوت (۲۰×۱۵×۱۰cm) برای M1، (۲۵×۱۲×۱۰cm) برای M2 و (۳۰×۲۰×۱۰cm) برای M3 طراحی شدند. ارتفاع هر ۳ جسم ۱۰ سانتی‌متر است؛ اما عرض اجسام از کوچک به بزرگ ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر انتخاب شد که به یک نسبت از هم بزرگ‌تر هستند و اما مهم‌ترین فاکتور بررسی طول جسم شناور است که در این بررسی به ترتیب از جسم کوچک به بزرگ ۱۵، ۱۲ و ۲۰ سانتی‌متر انتخاب شد و طول جسم M2 کوچکتر از M1 است.

با بررسی نتایج حاصل مشاهده شد با بزرگ‌شدن جسم شناور گودال آب‌شستگی افزایش می‌یابد. شکل (۶ و ۷)، اثر افزایش اندازه جسم شناور برای پایه بدون شکاف را نشان می‌دهد. در این مقایسه جسم M2 و M3 در حالت قرارگیری جسم زیر سطح آب و برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی عمق آب‌شستگی برای جسم M2، ۹/۵ سانتی‌متر و برای جسم M3، ۱۱/۲ سانتی‌متر مشاهده شد که ۱۵/۱ درصد افزایش یافته است و با مشاهده شکل نیز با بزرگ‌شدن جسم عمق و حجم گودال آب‌شستگی افزایش یافته است.



شکل ۶. مقایسه گودال آبشستگی حول پایه بدون شکاف با دبی 40 لیتر بر ثانیه و جسم زیر سطح آب، الف) جسم M2، ب) جسم M3



شکل ۷. تغییرات عرضی گودال آبشستگی حول پایه بدون شکاف با دبی 40 لیتر بر ثانیه برای اجسام شناور M2 و M3 در حالت قرارگیری زیر سطح آب

در بررسی شکل (۷) با بزرگ شدن جسم شناور سطح مقطع جریان کاهش یافته است و جریان آب برای عبور با سطح مقطع کم تر روبه رو است که همین موضوع موجب اغتشاش بیش تر جریان و در نتیجه افزایش گودال آبشستگی حول پایه شده است.

اثر موقعیت جسم شناور

بعد از پایان یافتن آزمایش های مربوط به پایه بدون شکاف شاهد، اجسام شناور در سه موقعیت قرارگیری بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب قرار داده شدند و به ترتیب آزمایش ها انجام گرفتند. برای دبی 40 لیتر بر ثانیه و جسم شناور M3 در موقعیت جسم بالای سطح آب، عمق گودال آبشستگی $8/5$ سانتی متر، برای موقعیت جسم هم سطح آب، عمق آبشستگی 9 سانتی متر و برای موقعیت جسم زیر سطح آب، عمق آبشستگی $11/2$ سانتی متر ثبت شد. بنابر نتایج به دست آمده نتیجه شد با

قرارگرفتن اجسام در پشت پایه پل بدون شکاف، عمق آبشستگی با افزایش دبی جریان افزایش می‌یابد و با تغییر موقعیت قرارگیری جسم پشت پایه، عمق آبشستگی نیز تغییر خواهد کرد. پایه پل به‌عنوان یک مانع در مسیر جریان قرار گرفته است و سبب انسداد مسیر جریان است با حضور جسم شناور این انسداد بیش‌تر می‌شود و در لحظه برخورد جریان آب به جسم شناور سرعت جریان کاهش می‌یابد و جریان در اطراف جسم شناور به دنبال تغییر مسیر است که باعث اغتشاش جریان حول جسم می‌شود و به این علت هرچه جسم شناور نزدیک سطح بستر باشد دامنه این اغتشاشات به سطح بستر کشیده شده و آبشستگی افزایش می‌یابد پس هرچه جسم شناور به سطح آب نزدیک‌تر باشد آبشستگی حول پایه کاهش می‌یابد و بالعکس هرچه جسم شناور نزدیک به سطح بستر باشد عمق آبشستگی افزایش می‌یابد.

۳. نتایج تغییرات آبشستگی برای پایه شکاف‌دار شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، بدون حضور جسم شناور

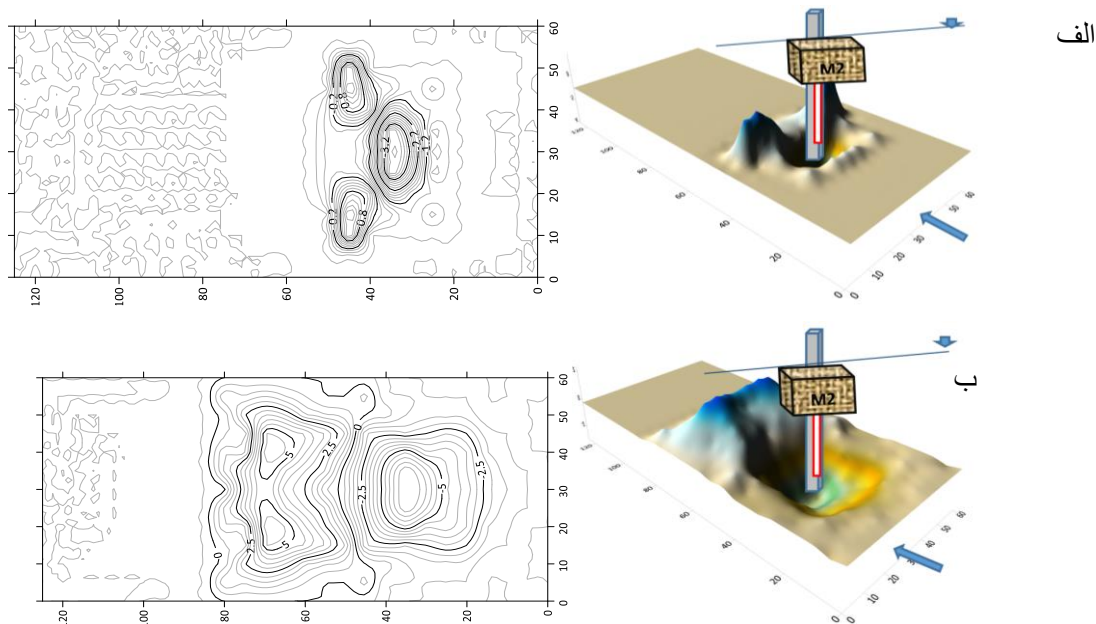
اثر دبی جریان

آبشستگی حول این پایه بدون حضور جسم شناور برای دبی ۱۰،۲۰ و ۳۰ لیتر بر ثانیه دیده نشد؛ ولی برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه عمق آبشستگی ۱/۳ سانتی‌متر گزارش شد که در مقایسه با پایه شاهد بدون شکاف که ۴/۷ سانتی‌متر بود ۷۲/۳ درصد باعث کاهش آبشستگی حول پایه شد.

۴. نتایج تغییرات آبشستگی برای پایه شکاف‌دار شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، در حضور جسم شناور

اثر دبی جریان

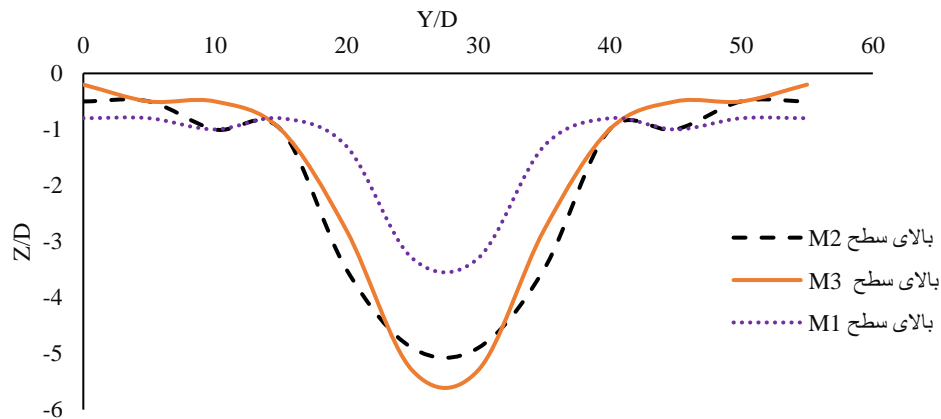
آبشستگی حول این پایه برای دبی ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه برای هر ۳ جسم در هر ۳ موقعیت قرارگیری جسم نسبت به پایه مشاهده نشد. برای دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه فقط در حالت قرارگیری جسم بالای سطح برای هر ۳ جسم شناور آبشستگی مشاهده نشد و اما برای دبی ۴۰ لیتر برای هر سه جسم آبشستگی دیده شد. باتوجه‌به شکل (۸، ۹ و ۱۰)، افزایش حجم و عمق چاله آب-شستگی با افزایش دبی از ۳۰ به ۴۰ لیتر بر ثانیه به‌وضوح مشخص است.



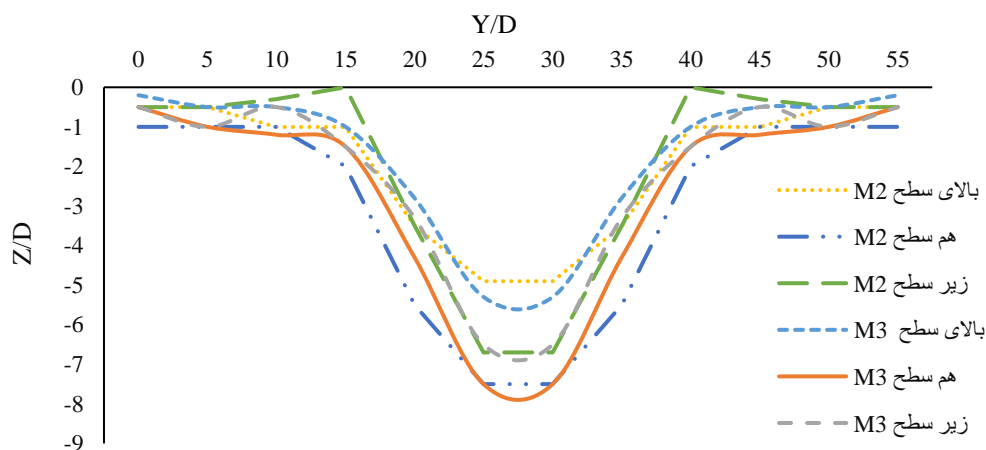
شکل ۸. مقایسه گودال آبشستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، جسم M2 هم سطح آب دبی ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه (الف) دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه (ب) دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه

اثر اندازه جسم شناور

با بررسی نتایج آزمایش‌ها مربوط به این پایه مشخص شد با بزرگ شدن جسم شناور آبشستگی حول پایه پل افزایش می‌یابد که در اشکال (۸) و (۹) نشان داده شده‌اند.



شکل ۹. تغییرات عرضی گودال آبشستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتیمتر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه برای جسم M1، M2 و M3 در حالت قرارگیری بالای سطح بستر

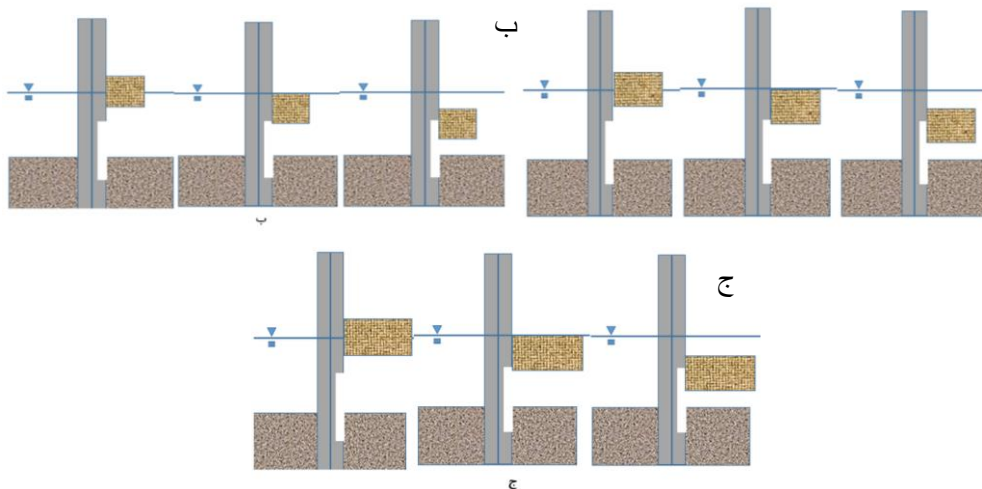


شکل ۱۰. تغییرات عرضی گودال آبشستگی حول پایه شکاف‌دار، شکاف ۷ سانتیمتر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، جسم M2 و M3، در حالت قرارگیری بالای سطح، هم سطح و زیر سطح

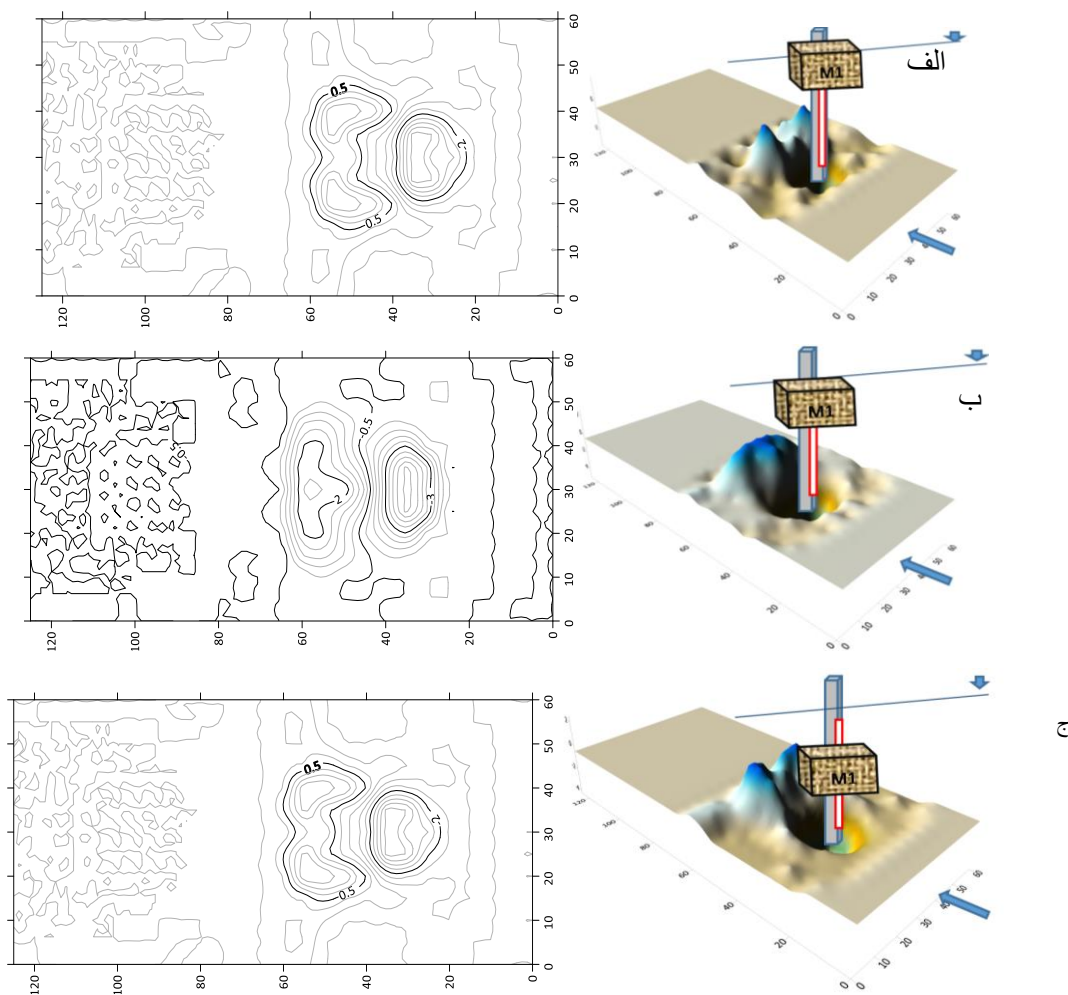
اثر موقعیت جسم شناور

باتوجه به اشکال (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) برای دبی ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه در هیچکدام از حالت‌های بررسی، آبشستگی حول پایه پل مشاهده نشد. در دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در حضور جسم M1، با پایین رفتن جسم نسبت به سطح آب، آبشستگی حول پایه پل افزایش یافته است و اما برای جسم M2 و M3 در حالت قرارگیری جسم هم سطح آب عمق آبشستگی بیش‌تر از حالت قرارگیری زیر سطح است. برای دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه، در هر ۳ جسم شناور با قرارگیری جسم در حالت هم سطح آب، آبشستگی بیش‌تر از حالت قرارگیری جسم زیر سطح است. به دلیل قرارگرفتن جسم در عمقی از جریان که بیشترین سرعت را دارد و همچنین بخشی از ارتفاع شکاف ایجاد شده در پایه به دلیل فضای خالی ایجاد شده داخل پایه با مواجه شدن با جریان آب دچار فرسایش شده و با حضور جسم در حالت هم سطح به دلیل اغتشاش بیشتر جریان این امکان فرسایش بیش‌تر از حالت‌های دیگر قرارگیری جسم پشت پایه است.

الف

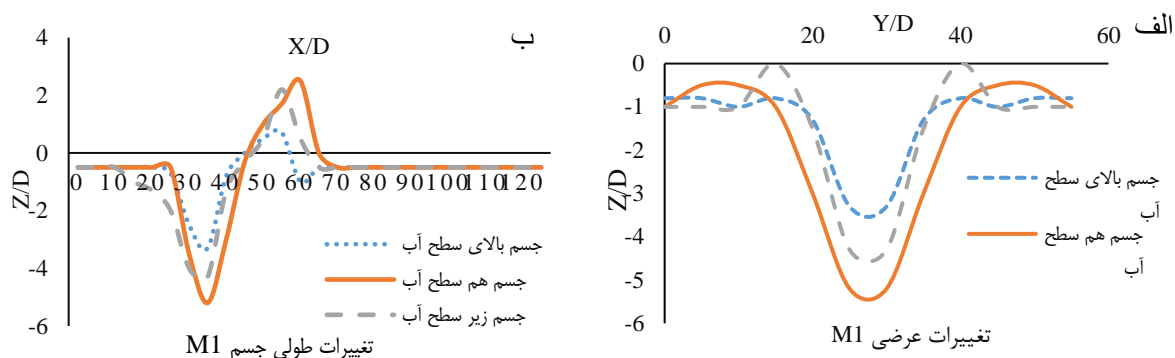


شکل ۱۱. شماتیک قرارگیری اجسام شناور پشت پایه پل شکافدار، شکاف ۷ سانتیمتر زیر سطح بستر، (الف) جسم M1، (ب) جسم M2، (ج) جسم M3



شکل ۱۲. مقایسه گودال آب شستگی حول پایه شکافدار، شکاف ۷ سانتی متر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و در حضور جسم M1، (الف) جسم بالای سطح آب، (ب) جسم هم سطح آب، (ج) جسم زیر سطح آب

در شکل (۱۳) تغییرات عرضی و طولی گودال آبشستگی حول پایه در حضور جسم شناور M1 نشان داده شده است. با دقت در نمودار تغییرات عرضی و طولی، جسم در حالت قرارگیری هم سطح آب، آبشستگی بیش تری نسبت به حالت قرارگیری بالای سطح و زیر سطح ایجاد کرده است به این دلیل که جسم در حالت هم سطح آب در عمقی از جریان قرار گرفته است که بیشترین سرعت را دارد و از طرفی بعد از برخورد جریان با جسم شناور، جریان برای ادامه مسیر، در دو طرف و قسمت پایین جسم راه فرار بیشتری دارد و همین سبب اغتشاش در زیر جسم و آبشستگی بیشتر شده است و اما در حالت قرارگیری جسم زیر سطح آب، جسم پایین تر از عمق حساس که بیشترین سرعت را دارد قرار می‌گیرد و باعث کاهش اغتشاش جریان در زیر جسم شناور شده است و آبشستگی کم تر از حالت قرارگیری جسم هم سطح آب می‌شود.



شکل ۱۳. تغییرات عرضی و طولی گودال آبشستگی حول پایه شکافدار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر، با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و در حضور جسم M1 (الف) تغییرات عرضی، (ب) تغییرات طولی

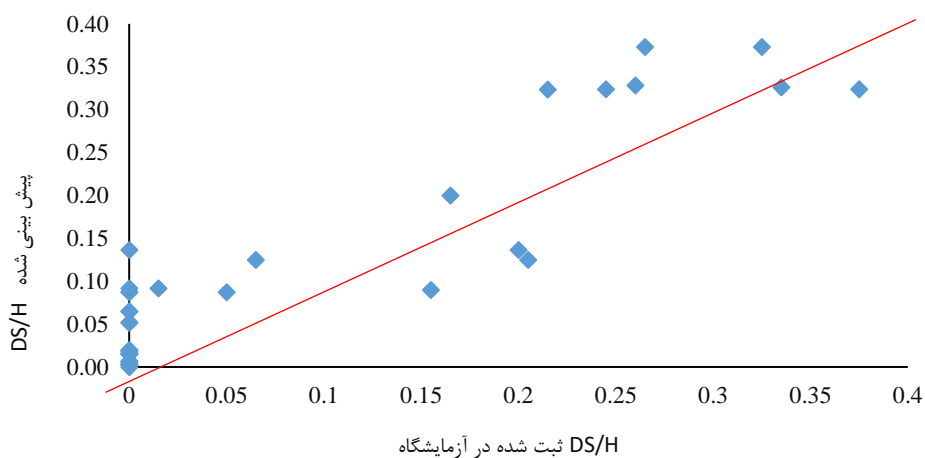
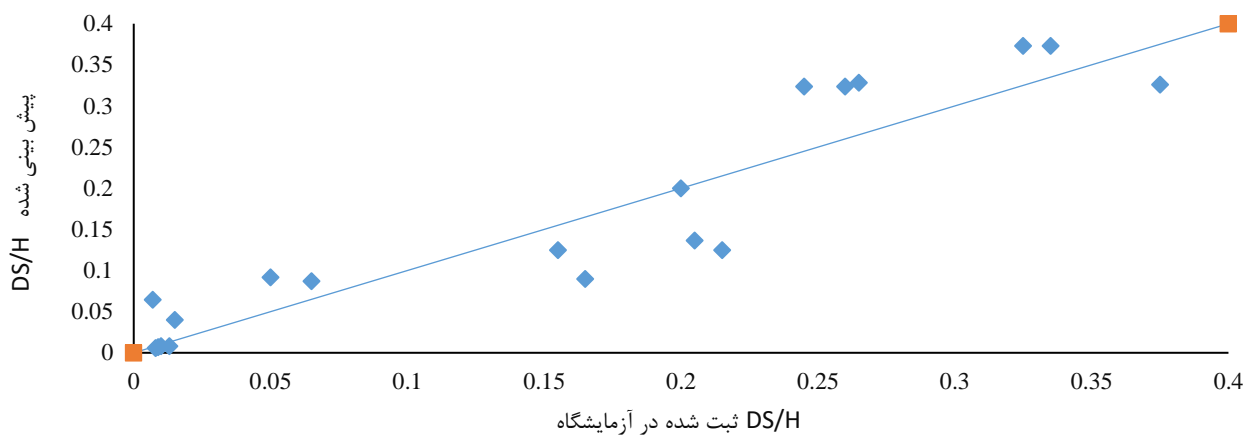
رابطه عمق آبشستگی در حضور جسم شناور

معادله حداکثر عمق آبشستگی در پایه شکافدار، شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر و در حضور جسم شناور، با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر و با کمک آنالیز ابعادی با استفاده از داده‌های ثبت شده آزمایشگاهی استخراج و به شکل رابطه (۶) ارائه شده در بخش قبلی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین قابل تأکید است که با کمک معادله (۷) و (۸) به ترتیب ضریب تبیین و میانگین مجموع خطای پیش‌بینی شده برای رابطه استخراج شده محاسبه و در جدول (۱) به شرح زیر ارائه شده است.

جدول ۱. میزان خطای محاسبه شده

نوع پایه	مقدار R^2	مقدار MFE محاسبه شده
پایه شکافدار ۷ سانتی‌متر زیر بستر	۸۱/۹	۰/۱۶۸۸

در شکل (۱۴) تغییرات عمق آبشستگی محاسبه شده در مقابل عمق آبشستگی پیش‌بینی شده مورد بررسی قرار گرفته است که نزدیک بودن نقاط در شکل به خط ترسیم شده نشان دهنده دقت مدل است.



شکل ۱۴. نمایش حداکثر عمق آب‌شستگی محاسبه شده در برابر حداکثر عمق آب‌شستگی پیش‌بینی شده

بحث

هدف از این پژوهش بررسی اثر ایجاد شکاف در پایه پل مربعی دماغه تیز در حضور جسم شناور پشت پایه در کاهش آب‌شستگی حول پایه پل است. این مطالعه به صورت آزمایشگاهی انجام گرفت و به صورت مفصل در بخش‌های قبل به این موضوع پرداخته شده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. تمام آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در بستر رسوبی به ارتفاع ۱۶ سانتی‌متر، در طول ۴ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. پایه در وسط فلوم و در فاصله ۱۰ متر از حوضچه آرامش قرار داده شد و برای جلوگیری از فروریختن ابتدا و انتهای بستر رسوبات و آرامش جریان از سنگ‌ریزه در ابتدا و انتهای بازه بستر رسوبی استفاده شد.

نتیجه‌گیری

در این بخش با جمع‌بندی نتایج حاصل روش‌هایی برای کاهش آب‌شستگی ذکر می‌شود. نتایج حاصل عبارت‌اند از:

- افزایش دبی جریان باعث افزایش عمق و حجم چاله آب‌شستگی می‌شود.
- تجمع اجسام شناور حول پایه پل باعث افزایش عمق و حجم چاله آب‌شستگی نسبت به عدم حضور اجسام شناور می‌شود.
- افزایش طول جسم شناور باعث کاهش آب‌شستگی حول پایه پل می‌شود.

قرارگرفتن اجسام شناور در بالای سطح آب، آبشستگی کمتری نسبت به قرار گیری در حالت زیر سطح ایجاد می‌کنند. پایه بدون حضور جسم شناور، بیش‌ترین عمق آبشستگی در کنار ضلع مربعی پایه شکل می‌گرفت و بعد از حضور جسم پشت پایه بیش‌ترین عمق آبشستگی در نزدیکی نوک دماغه شکل می‌گرفت. ایجاد شکاف در پایه پل در دبی‌های کم، ۱۰ و ۲۰ لیتر بر ثانیه موجب کنترل فرسایش حول پایه بود. ایجاد شکاف یک روش کارآمد برای کنترل آبشستگی حول پایه پل است. پایه با شکاف ۷ سانتی‌متر زیر سطح بستر تا ۴۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد موجب کنترل آبشستگی حول پایه می‌شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت دانشگاه شهرکرد انجام شده است بدین‌وسیله از این حمایت قدردانی می‌گردد.

منابع

- ابوسعیدی، زهرا، قادری، کورش، رحیم پور، مجید، و احمدی، محمد مهدی. (۱۳۹۷). بررسی آزمایشگاهی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی پایه و تکیه گاه پل. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۵(۲)، ۲۸۲-۲۶۷. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12472.2714>
- اردلانی، اعظم، بختیاری، مرتضی، صانعی، مجتبی، و کاشفی پور، سید محمود. (۱۳۹۸). بررسی آزمایشگاهی اثر مساحت سطح شکاف در بدنه ی پایه روی کاهش آب‌شستگی موضعی پایه پل. نشریه دانش آب و خاک، ۳۹(۳)، ۶۷-۷۹. <https://faculty.kmsu.ac.ir/bakhtiari/fa/articlesInPublications/221>
- بیات، حبیب الله. (۱۳۷۹). اندرکنش سازهای آبی و فرسایش. انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران. <https://www.iranketab.ir/book/96580-sazehaye-aabi>
- حیدری بنی، مهناز، بختیاری، مرتضی، صانعی، مجتبی، و کاشفی پور، سید محمود. (۱۳۹۹). بررسی آزمایشگاهی استفاده از شکاف در پایه جهت کنترل آب‌شستگی پایه پل. مجله‌ی مهندسی منابع آب، ۱۳(۴۵)، ۳۸-۲۳. https://wej.marvdasht.iau.ir/article_4224.html
- رحیمی، ابراهیم. (۱۳۹۶). بررسی آزمایشگاهی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آب‌شستگی موضعی گروه پایه و تکیه گاه پل. رساله دکتری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. <https://elmnet.ir/doc/11244311-84226>
- کاضمیان، میلاد، گوهری، سعید، و شاهوردی، کاظم. (۱۴۰۰). تأثیر شکاف در کاهش آب‌شستگی پایه پل در بستر با رسوب-های یکنواخت و نایکنواخت. نشریه علمی - پژوهشی هدرولیک، ۱۶(۴)، ۳۷-۴۸. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81358>
- ماهان، ناصر. (۱۳۹۱). بررسی مقایسه ای تأثیر شکل شکاف بر آب‌شستگی پایه‌های پل. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران. <https://elmnet.ir/doc/10599347-94122>
- مشعشعی، میثم، و اسدی آق‌بلاغی، مهدی. (۱۳۹۴). آب‌شستگی در اطراف پایه مربعی با دماغه سهمی شکل در حضور اجسام شناور چوبی در جلوی پایه. مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۵(۴)، ۸۵-۹۶. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-2041-fa.html>

References

- Abu Saidi, Z., Kadri, K., Rahimpour, M., & Ahmadi, M. M. (2017). Laboratory investigation of the effect of accumulation of floating objects on the local scouring of bridge foundations and supports. *Journal of water and soil protection research*, 25(2), 267-282. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12472.2714> (In Persian)
- Ardlani, A., Bakhtiari, M., Sanei, M., & Kashfipour, S.M. (2018). Laboratory examination of the effect of the surface area of the crack in the body of the foundation on the reduction of local scouring of the bridge foundation. *Water and Soil Science Journal*, (39), 67-79. <https://faculty.kmsu.ac.ir/bakhtiari/fa/articlesInPublications/221> (In Persian)
- Bayat, H. (2000). Interaction of water bodies and erosion. *Amir Kabir University of Technology Publications* (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. <https://www.iranketab.ir/book/96580-sazehaye-aabi> (In Persian)
- Diehl, T. (1997), Potential drift accumulation at bridges. U.S. *Department of Transportation Federal Highway Administration Research and Development Turner-Fairbank Highway Research Center 6300 Georgetown Pike McLean, Virginia, 22101-2296*. <https://tn.water.usgs.gov/publications/FHWA-RD-97-028/FHWA-RD-97-028>
- Grimaldi, C., Gaudio, R., & Calomino, F. (2009). Control of scour at bridge piers by a downstream bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(1), 13–21. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:1(13))
- Heydari Bani, M., Bakhtiari, M., Sanei, M., & Kashfipour, S.M. (2019). Laboratory examination of using a gap in the foundation to control the erosion of the bridge foundation. *Journal of Water Resources Engineering*, 13(45), 23-38. https://wej.marvdasht.iau.ir/article_4224.html (In Persian)
- Kazmian, M., Gohri, S., & Shahvardi, K. (2021). The effect of the gap in reducing the scour of the bridge foundation in the bed with uniform and uneven sediments. *Journal of Hydraulics*, 16(4), 37-48. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2018.81358> (In Persian)
- Kumar, V., Ranga raju, K.G., & Vittal, N. (1999). Reduction of local scour around bridge piers using slots and collars. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(12), 1302-1305. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:12\(1302\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:12(1302))
- Lagasse, P.F., Cloper, P.E., Zevenbergen, P.E., Spitz, W.J., & Girard, L.G. (2010). Effects of Debris on Bridge Pier Scour. *Transportation Research Board*, 10, 854-863. [https://doi.org/10.1061/41147\(392\)85](https://doi.org/10.1061/41147(392)85)
- Mahan, N. (2012). A comparative study of the effect of the shape of the gap on the erosion of bridge foundations. Master's thesis, *Islamic Azad University of central Tehran branch*, Tehran, Iran. <https://elmnnet.ir/doc/10599347-94122> (In Persian)
- Moshashii, M., & Asadi Aghbalaghi, M. (2014). Wash around a square base with a sagittal nose in the presence of floating wooden objects in front of the base. *Scientific-research journal of Modares Civil Engineering*, 15(4), 85-96. <https://mcej.modares.ac.ir/article-16-2041-fa.html> (In Persian)
- Pagliara, S., & Carnacina, I. (2010). Temporal scour evolution at bridge piers: Effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*, 48(1), 3-13. <https://doi.org/10.1080/00221680903568592>
- Pagliara, S., & Carnacina, I. (2011). Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers. *International Journal of Sediment Research*, 26(2), 121-136. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(11\)60081-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(11)60081-4)

- Rahimi, I. (2016). Laboratory investigation of the effect of accumulation of floating objects on the local scouring of the foundation group and bridge support. Ph.D. Thesis, *Shahid bahonar University of Kerman*, Kerman, Iran. <https://elmnet.ir/doc/11244311-84226>(In Persian)
- Raudkivi, A., & Ettema, R. (1983). Clear water scour at cylindrical piers. *J. Hydr. Engin. ASCE*, 103(10). 1209-1213. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))



Locating potential zones prone to cultivation of olive, pomegranate and citrus using GIS for proper planning in the cultivation and water resources allocations in Kermanshah province

Houshang Ghamarnia¹, and Mahtab Nekokish²

1. Corresponding author, Department of Water Science and engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir
2. Department of Water Science and engineering, Campus of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. Iran. E-mail: nekookish@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 01 July 2024

Received in revised form 07
November 2024

Accepted 05 December 2024

Available online 25 March
2025

Keywords:

climate,

Pomegranate,

zoning,

Olives,

citrus,

GIS.

ABSTRACT

Objective: The purpose of this research was to separate the suitable areas from the unsuitable for cultivating olive, pomegranate, and citrus orchards and zoning the suitable areas for proper planning of water resources in the region.

Method: In this study, using information and digital maps and with the specialized analysis of each layer of information, a part of the study area that lacks defined facilities and potential has been removed from the study area and priority has been found in the prone areas. In this section, the natural environment of Kermanshah province, i.e. climatic factors, soil, and topography was studied and analyzed. Also, among the climatic parameters of annual rainfall, average annual temperature, average minimum temperature of the coldest month of the year, and average maximum temperature of the hottest month of the year were studied. According to the required climatic elements and using the GIS software and the method (IDW), the required maps were drawn, and then, using the Overlay method, the map of the susceptible areas was drawn.

Results: According to the obtained results, Kermanshah province can be divided into five areas for the cultivation of olive and pomegranate orchards: very suitable, suitable, relatively suitable, slightly suitable and unsuitable, and three suitable, unsuitable and uncultivable areas for citrus cultivation. According to the regionalization, the most suitable area for olive cultivation was about 9000 hectares (90 square kilometers) in the cities of Paveh, Javanrood, and Salas, Babajani, and also about 322,400 hectares (3224 square kilometers) of suitable areas for pomegranate cultivation in the cities of Paveh, Javanrood, Salas, Islamabad and Gilan-e-Gharb in the west part of the province. Also, about 163,800 hectares (1638 square kilometers) of land in the districts of Gilan Gharb, Qhaser Shirin, and Somar were identified as suitable for citrus cultivation.

Conclusions: The obtained results indicated the talent of the Kermanshah province in producing horticultural products. Therefore, according to the suitable climatic conditions throughout the province and with proper planning of cultivation and water resources in zoned areas, Kermanshah province can be self-sufficient in each of those products and export to neighboring cities and provinces and even the country of Iraq. Undoubtedly, the increase in those above-mentioned production and export to other parts of the country as well as the neighboring country of Iraq can provide a huge tool in creating jobs and increasing the income of the villagers in Kermanshah province.

Cite this article: Ghamarnia, H., & Nekokish, M. (2025). Locating potential zones prone to cultivation of olive, pomegranate and citrus using GIS for proper planning in the cultivation and water resources allocations in Kermanshah province. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 35-50. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11172.1141>



Introduction

Climatic potentials and limitations in ecological units and the need to consider these conditions in regionalization of agriculture with regard to the discussion of sustainable development and food security will force us to study and do research on the ability of continuous production of agricultural products in ecological units from various aspects before any developed investment. Determining the appropriate climatic potential for a specific the product is also an introduction and prerequisite for land use planning regionalization of agricultural products and cultivation pattern studies. One of the practical methods to improve agricultural production is to match the product with the prevailing climate in the region in order to make optimal use of it. This is possible through understanding the prevailing agricultural climate in the region. The diversity of the country's climate has provided unique opportunities for the production of various products in all seasons of the year. Establishing relative stability for the supply of agricultural products to the market requires accurate knowledge of the weather conditions of various regions and micro climates in the corners of the country. Knowing the right time to plant, grow and harvest horticultural products in different regions and knowing the climatic indicators, makes it possible for planners to think about the correct allocation of resources to different products.

Method

In this research, the method of removing inappropriate ranges and selecting appropriate ranges with compatibility criteria and indicators were used. In addition, by using information and digital maps and with the specialized analysis of each layer of information, a part of the study area that lacks the defined facilities and potential was removed from the study area and priority has been found in the prone areas. Also, the natural environment of Kermanshah province, i.e. climatic factors, soil and topography, has been studied and analyzed. Among the climatic factors considered in this research, were the factors of annual rainfall, average annual temperature, average minimum temperature of the coldest month of the year and the average maximum temperature of the hottest month of the year. In this research, by using GIS software, according to the required climatic elements, the required maps were drawn with the Inverse Distance Weighted (IDW) method, and then, by using the Overlay method, a map of the areas prone to planting drawn.

Results

According to the regionalization, the most suitable area for olive cultivation in Kermanshah province were about 9000 hectares in the cities of Paveh, Javanrood and Salas Babajani, and also about 322,400 hectares of suitable areas for pomegranate cultivation in the cities of Paveh, Javanrood, Salas, Islamabad and Gilan-e-Gharb in the west part of province. Moreover, about 163,800 hectares of lands in the districts of Gilan Gharb, Qhaser Shirin and Somar were identified suitable for citrus cultivation. Therefore, proper planning of cultivation and water resources in those areas seems necessary.

Conclusions

As it can be seen from the results of this research, Kermanshah province has a high potential in terms of the cultivation of gardens as well as the cultivation of crops. In this research, the potential of Kermanshah province for three cultivations of olive, pomegranate and citrus was evaluated carefully. The obtained results indicated the talent of the Kermanshah province in producing horticultural products. Therefore, according to the suitable climatic conditions throughout the province and with proper planning of cultivation and water resources in zoned

areas, Kermanshah province can be self-sufficient in each of those products and export to neighboring cities and provinces and even the country of Iraq. Undoubtedly, the increase in those above-mentioned production and export to other parts of the country as well as the neighboring country of Iraq can provide a huge tool in creating jobs and increasing the income of the villagers in Kermanshah province.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Acknowledgements

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

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مکان‌یابی پهنه‌های مستعد کشت زیتون، انار و مرکبات با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) جهت برنامه‌ریزی صحیح کشت و اختصاص منابع آب در استان کرمانشاه

هوشنگ قمرنیا^۱، و مهتاب نکوکیش^۲

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

۲. گروه علوم و مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: nekookish@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف از این تحقیق تفکیک پهنه‌های مناسب از نامناسب برای کشت باغات زیتون، انار و مرکبات و اولویت‌بندی در پهنه‌های مناسب جهت برنامه‌ریزی صحیح منابع آب در منطقه است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱	روش پژوهش: در این مطالعه با استفاده از اطلاعات و نقشه‌های رقومی و با تجزیه و تحلیل تخصصی هر لایه اطلاعاتی، بخشی از محدوده مطالعاتی را که فاقد امکانات و پتانسیل تعریف شده است از محدوده مطالعاتی حذف و اولویت‌بندی در پهنه‌های مستعد ادامه پیدا کرده است. در این بخش، محیط طبیعی استان کرمانشاه یعنی عوامل اقلیمی، خاک و توپوگرافی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. ضمناً در این رابطه از میان پارامترهای اقلیمی بارندگی سالانه، متوسط درجه حرارت سالانه، متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال و متوسط حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال مورد بررسی قرار گرفته‌اند. باتوجه به عناصر اقلیمی مورد نیاز، با استفاده از نرم‌افزار GIS و به روش درون‌یابی نقشه‌های مورد نیاز ترسیم و سپس با استفاده از روش Overlay نقشه مناطق مستعد کاشت و ترسیم گردیدند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۷	یافته‌ها: باتوجه به نتایج حاصل شده می‌توان استان کرمانشاه را برای کشت باغ زیتون و انار به پنج ناحیه خیلی مناسب، مناسب، نسبتاً مناسب، کمی مناسب و نامناسب و برای کشت مرکبات به سه ناحیه مناسب، نامناسب و غیرقابل کشت تقسیم‌بندی نمود. باتوجه به ناحیه بندی، ناحیه خیلی مناسب برای کشت زیتون در حدود ۹۰۰۰ هکتار (۹۰ کیلومترمربع) در شهرستان‌های پاوه، جوانرود و ثلاث باباجانی بوده و همچنین در حدود ۳۲۲۴۰۰ هکتار (۳۲۲۴ کیلومترمربع) ناحیه مناسب کشت انار در شهرستان‌های پاوه، جوانرود، ثلاث، اسلام‌آباد و گیلان‌غرب و در حدود ۱۶۳۸۰۰ هکتار (۱۶۳۸ کیلومترمربع) از اراضی نواحی شهرستان‌های گیلان‌غرب، قصرشیرین و سومار در منطقه مناسب کشت مرکبات شناسائی گردیدند؛ لذا، برنامه‌ریزی مناسب کشت و منابع آب در این مناطق ضروری به نظر می‌رسد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۵	نتیجه‌گیری: نتایج به‌دست آمده حاکی از استعداد استان در تولید محصولات باغی است؛ لذا، باتوجه به شرایط اقلیمی مناسب موجود در سراسر استان و با برنامه‌ریزی مناسب کشت و منابع آب در مناطق پهنه‌بندی شده، استان کرمانشاه می‌تواند در هریک از این محصولات خودکفا و صادرکننده به شهرستان‌ها و استان‌های هم‌جوار و حتی کشور عراق باشد.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵	
کلیدواژه‌ها: آگروکلیمایی، انار، پهنه‌بندی، زیتون، مرکبات، GIS.	

استناد: قمرنیا، هوشنگ؛ و نکوکیش، مهتاب. (۱۴۰۴). مکان‌یابی پهنه‌های مستعد کشت زیتون، انار و مرکبات با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) جهت

برنامه‌ریزی صحیح کشت و اختصاص منابع آب در استان کرمانشاه. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵(۱)، ۳۵-۵۰.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11172.1141>



مقدمه

استان کرمانشاه در غرب کشور و در دل رشته‌کوه‌های زاگرس واقع گردیده است. مساحت استان ۲۴۵۰۰ کیلومترمربع و از نظر تقسیمات کشوری شامل شهرستان‌های قصرشیرین، اسلام‌آباد غرب، سرپل ذهاب، دالاهو، گیلان‌غرب، پاوه، ثلاث باباجانی، روانسر، جوانرود، صحنه، هرسین، کنگاور، سنقر کلیایی و کرمانشاه است. استان کرمانشاه منطقه‌ای است نیمه‌کوهستانی که بین ایران و جلگه بین‌النهرین قرار گرفته است و ارتفاعات آن موازی یکدیگر در جهت شمال غربی جنوب شرقی کشیده شده‌اند. رشته ارتفاعات دالاخانی، پراو، شاهو، کوه سفید و دالاهو از مهم‌ترین کوه‌های استان هستند و مجموعاً زاگرس شمال غربی را تشکیل می‌دهند. مزارع و دشت‌های کشاورزی از رودخانه‌های قره‌سو، گاماسیاب، مرک، راوند، خرم رود، زمکان، الوند و نیز سراب‌ها یا سرچشمه‌های متعدد منطقه سیراب می‌گردد. به همین دلیل استان دارای استعدادهای فراوان کشاورزی و دامپروری است. اقلیم استان کرمانشاه بسیار متنوع و آب‌وهوایی گرمسیر، معتدل، کوهستانی و سرد در ارتفاعات دارد. باتوجه‌به وجود شیب نسبتاً زیاد در اراضی استان و وجود منابع آب کافی، مکان‌یابی محدوده‌هایی از گستره اراضی استان که بالقوه دارای قابلیت توسعه باغ هستند ضروری به نظر می‌رسد؛ لذا، هدف از این تحقیق نیز تفکیک پهنه‌های مناسب از نامناسب برای کشت باغات زیتون، انار و مرکبات و اولویت‌بندی در پهنه‌های مناسب جهت برنامه‌ریزی صحیح منابع آب در منطقه است.

پتانسیل‌ها و محدودیت‌های اقلیمی در واحدهای اکولوژی و ضرورت ملاحظه این شرایط در کشاورزی منطقه‌ای باتوجه‌به بحث توسعه پایدار و امنیت غذایی موجب می‌گردد تا قبل از هر گونه سرمایه‌گذاری توسعه‌ای، توان تولید مستمر محصولات کشاورزی در واحدهای اکولوژیکی از جهات گوناگون مورد مطالعه و تحقیق قرار گیرد. تعیین پتانسیل اقلیمی مناسب محصول مورد نظر، مقدمه و پیش‌نیاز آمایش سرزمین و مطالعات الگوی کشت منطقه‌ای نیز است. یکی از روش‌های کاربردی برای بهبود تولیدات کشاورزی، هماهنگی با آب‌وهوای غالب در منطقه به‌منظور استفاده بهینه از آن است. این کار از طریق درک اقلیم کشاورزی غالب در منطقه امکان‌پذیر است (ضیائی‌ان فیروزآبادی، ۱۳۸۹). در حال حاضر کشاورزی یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی کشور به شمار می‌آید تا جایی که می‌توان گفت که رشد اقتصادی کشور بدون رشد کشاورزی امکان‌پذیر نیست. از آنجایی که هر یک از محصولات کشاورزی شرایط اقلیمی و محیطی خاصی را می‌طلبند، لذا، محققان و کارشناسان منابع طبیعی و اقلیم‌شناسان توجه ویژه‌ای به آمایش سرزمین داشته و بر پایه مدل‌های اکولوژیکی - کشاورزی، منابع اکولوژیکی زمین را با روش‌های مناسب شناسایی، ارزیابی و به‌منظور اهداف خاصی قابلیت سنجی می‌نمایند (محمدی و همکاران، ۱۳۸۶). از طرفی دیگر برنامه‌ریزی‌های کشاورزی در ارتباط با مسائل کاشت، داشت و برداشت، آفات، آبیاری و غیره بدون شناخت تأثیر و کنترل ماهیت اقلیم، توفیق چندانی نخواهد داشت (کاویانی و علیجانی، ۱۳۷۹)؛ لذا، برای شناخت مشکلات و مسائل موجود در رابطه با اقلیم و کشاورزی، تعیین نواحی اقلیم کشاورزی الزامی است. تنوع آب‌وهوایی کشور امکانات کم‌نظیری برای تولید محصولات متنوع در کلیه فصول سال را فراهم نموده است. ایجاد ثبات نسبی برای عرضه محصولات کشاورزی به بازار، مستلزم شناخت دقیق وضعیت آب‌وهوایی مناطق و میکروکلیمای متنوع در گوشه‌وکنار کشور است. آگاهی از زمان مناسب کاشت، داشت و برداشت محصولات باغی مناطق مختلف و شناخت شاخص‌های اقلیمی، این امکان را برای برنامه‌ریزان فراهم می‌سازد تا بتوانند در مورد تخصیص صحیح منابع به محصولات مختلف بیندیشند. بررسی اقلیم و عوامل محیطی در تعیین گونه‌های باغی هر منطقه به‌صورت یک امر ضروری درآمده است. امروزه مدیریت زراعی و باغی و افزایش تولید در واحد سطح استفاده بهینه از منابع طبیعی و شناخت هر چه بیشتر این‌گونه منابع را می‌طلبند (نوری، ۱۳۸۳).

کشور ایران جزء واردکنندگان عمده روغن خوراکی بوده، به‌طوری‌که هم‌اکنون بیش از ۹۰٪ نیاز کشور از خارج وارد می‌شود (آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۳۸۰). توسعه کشت درختان زیتون می‌تواند منبع بسیار خوبی برای تأمین روغن خوراکی موردنیاز کشور باشد (درویشیان، ۱۳۸۰). باتوجه‌به خصوصیات فیزیولوژی، درختان زیتون می‌توانند در زمین‌های کوهپایه‌ای که مناسب کشت انواع زراعت‌ها مخصوصاً زراعت دانه‌های روغنی نمی‌باشد، رشد نموده و عملکرد قابل‌قبولی را داشته باشد (صادقی، ۱۳۸۱).

کشور ایران با ۲۰۸۶۹۹ هکتار اراضی زیر کشت مرکبات، ۳ درصد از کل زمین‌های زیر کشت مرکبات در جهان را در اختیار داشته و مقام هشتم را داراست. از نظر سطح زیر کشت استان مازندران مقام اول و استان فارس، هرمزگان، کرمان و گیلان در مقام‌های بعد قرار دارند؛ بنابراین با علم به این که ایران دارای مناطق مستعد بسیار برای پرورش این محصول است و استعداد مناطق مرکبات خیز کشور برای ارقام صادراتی نظیر گریپ فروت، لیموترش، پرتغال والنسیا فراهم است. در مورد ویژگی‌های فنولوژیکی مرکبات ذکر نیازهای آب‌وهوایی و خاک، طی مراحل رشد ضروری است و ذکر این نکات قابل توجه است. مرکبات در بخش گسترده‌ای از جهان (۱۱۳ کشور) از ۴۰ درجه شمالی تا ۴۰ درجه عرض جنوبی و در نقاطی که شرایط آب‌وهوایی بسیار خشک و زیاد سرد نباشد (نقاط دارای آب‌وهوای گرمسیری و نیمه گرمسیری) کاشته می‌شود. به همین دلیل انواع مرکبات را میوه‌های نیمه گرمسیری می‌نامند که عموماً دمای ۰ تا ۴۰ درجه را تحمل می‌کنند. مرکبات به طور کلی بومی آسیای شرقی و مجمع‌الجزایر مالایا است. لیکن به نظر می‌رسد در سطوح تجاری مناطق عمده تولید مرکبات در نواحی نیمه گرمسیری بالاتر از ۳۰ درجه شمالی و جنوبی قرار گیرد. اصولاً بهترین مکان کشت مرکبات در مناطقی است که دارای ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر با مجموعه حرارتی حدود ۳۵۰۰ ساعت است و از نظر دمایی نیز متوسط دمای مناسب جهت رشد مطلوب مرکبات ۱۸/۵ درجه سانتیگراد است. لیکن در مرکبات رشد و نمو متشکل از مراحل پیچیده‌ای است و آب و هوا از مهم‌ترین عوامل کنترل کننده آن است (ضیائیان فیروزآبادی، ۱۳۸۹).

در این تحقیق از روش حذف محدوده‌های نامناسب و انتخاب محدوده‌های مناسب با معیارها و شاخص‌های سازگاری استفاده شده است. ضمناً با استفاده از اطلاعات و نقشه‌های رقومی و با تجزیه و تحلیل تخصصی هر لایه اطلاعاتی، بخشی از محدوده مطالعاتی را که فاقد امکانات و پتانسیل تعریف شده بوده از محدوده مطالعاتی حذف و اولویت‌بندی در پهنه‌های مستعد ادامه پیدا کرده است. همچنین، محیط طبیعی استان کرمانشاه یعنی عوامل اقلیمی، خاک و توپوگرافی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. از عوامل اقلیمی در نظر گرفته شده در این تحقیق، می‌توان عوامل بارندگی سالانه، متوسط درجه حرارت سالانه، متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال و متوسط حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال را نام برد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار GIS باتوجه به عناصر اقلیمی مورد نیاز و روش وزن معکوس فاصله (IDW) Inverse Distance Weighted، نقشه‌های مورد نیاز ترسیم و سپس با استفاده از روش Overlay نقشه مناطق مستعد کاشت ترسیم گردیده‌اند.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

محمدی و همکاران (۱۳۸۶) در تحقیقی به امکان سنجی کشت زیتون در استان اصفهان پرداختند. در این تحقیق پس از مطالعه شرایط اقلیمی استان و مقایسه آن با ایستگاه شاخص رودبار و با استفاده از دو مدل وزن‌دهی رتبه بندی و سلسله مراتبی AHP به تخصیص ارزش و تلفیق نقشه‌های حاصله در محیط GIS پرداخته‌اند. در پهنه‌بندی اراضی مستعد مرکبات در استان لرستان، ضیائیان و همکاران (۱۳۸۹) از داده‌های ۶ ایستگاه سینوپتیک در سطح استان و همچنین پارامترهای محیطی ارتفاع، خاک، شیب و جهت آن، فاصله از شبکه هیدروگرافی استفاده کرده‌اند. سپس با استفاده از روش‌های مختلف درون‌یابی در محیط GIS نقشه‌های همپوشانی تهیه نموده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد نقش هر یک از عناصر اقلیمی و زمینی متناسب با مراحل مختلف رشد در استان متفاوت بوده و از طریق تلفیق لایه‌های مؤثر در فرآیند کاشت مرکبات در محیط GIS امکان شناخت مناطق جهت کاشت مرکبات وجود دارد.

میر موسوی و اکبری (۱۳۸۹) با بررسی داده‌های هواشناسی و اقلیمی در استان کرمانشاه امکان سنجی کشت زیتون در این استان را بررسی نمودند. در این روش با استفاده از روش فائو-پنمن-مانیتث نیاز آبی، درجه حرارت تراکمی و نیاز سرمایی محصول

محاسبه گردید که از این میان دما مهم‌ترین عامل محدودکننده کشت گیاه زیتون است. در تحقیق کوزه‌گران و همکاران (۱۳۹۰)، آمار و اطلاعات ۲۰ ساله ایستگاه‌های هواشناسی استان خراسان جنوبی و عملکرد محصول انار در مناطق مورد مطالعه، در یک دوره ده ساله، گردآوری و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

در تحقیق قنبری و کریمی (۱۳۹۱) محصول انار در استان اصفهان با استفاده از نرم‌افزار GIS و باتوجه به عناصر اقلیمی مورد نیاز این محصول و به روش Kriging نقشه‌های مورد نیاز ترسیم و مناطق مستعد کاشت انار، ارائه گردید. نتایج حاکی از آن بود که نواحی غربی، شرقی و محدوده‌های اردستان و کاشان، دارای شرایط نامساعد جهت کشت انار و تنها محدوده مرکزی استان، دارای شرایط مساعد جهت کشت انار برخوردار هستند. همچنین نظری پور و همکاران (۱۳۹۲) مراحل فنولوژی انار همراه با درجه روز رشد در مراحل مختلف نمو تهیه و مخاطرات جوی مؤثر بر این محصول نیز مورد بررسی قرار دادند. با تحلیل نقشه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS مشخص شد نزول دمای هوا به زیر صفر درجه سانتیگراد در مراحل رسیدن میوه موجب ترکیبگی انار گشته و باعث افت کیفیت و عدم بازارپسندی میوه انار می‌شود.

در تحقیق موغلی (۱۳۹۳)، کشت زیتون در شهرستان بوبر احمد مورد بررسی قرار گرفت که با تلفیق نقشه‌های مربوط به عوامل محیطی، مناطق غرب و شمال غرب و همچنین محدوده‌های از قسمت‌های شمالی و جنوبی در گروه مناطق با استعداد بسیار مناسب بوده و در مقابل نواحی شمالی و شمال شرقی برای کشت این محصول مقرون به صرفه نمی‌باشند. کیانیان و همکاران (۱۳۹۵) جهت بررسی و شناسایی نواحی مستعد کشت انار در استان خراسان رضوی پارامترهای آب‌وهوایی در دوره ۲۵ ساله (۲۰۱۰-۱۹۸۶) را بررسی کردند. سپس با استفاده از نرم‌افزار GIS و باتوجه به عناصر اقلیمی مورد نیاز درخت انار، با روش IDW نقشه‌های مورد نیاز ترسیم نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد کاشمر و گناباد مستعدترین نواحی آب‌وهوایی به عنوان جهت کشت انار هستند.

در پهنه‌بندی اقلیمی کشت مرکبات توسط برنا و علیزاده (۱۳۹۵) به روش AHP در استان خوزستان انجام شد و در بازه زمانی بیست ساله در ۴ کلاس اهمیت (ضعیف، متوسط، خوب و عالی) طبقه‌بندی گردید. نتایج تحقیق نشان داد که این روش با بکارگیری همزمان معیارهای کمی و کیفی و قابلیت کاربرد مطلوب در برنامه‌ریزی اقلیمی - محیطی، توانایی تعیین و تفکیک مناطق مستعد کشت مرکبات در خوزستان را دارد. در این استان مناطق شمالی و شرقی از شرایط خوب تا عالی جهت کشت مرکبات برخوردار است و مناطق محدودیت دار استان با پتانسیل ضعیف، بخش‌های جنوبی و مرکزی و غربی را در برمیگیرد. همچنین در تحقیقی دیگر در استان خراسان رضوی، دلیری و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند که با استفاده از پارامترهای اقلیمی در محیط GIS کاشمر، سرخس، تربت حیدریه و سبزوار مستعدترین نواحی آب‌وهوایی به عنوان جهت کشت انار هستند.

در تحقیق برنا و همکاران (۱۳۹۶) به پهنه‌بندی آگروکلیمایی کشت مرکبات در خوزستان بر اساس مدل AHP در محیط GIS پرداخته شد و بر اساس اعمال وزن نهایی هر یک از زیر معیارهای محیطی و اقلیمی مؤثر در کشت مرکبات مناطق مستعد شناسایی گردید. سبحانی (۱۳۹۶) با استفاده از پایگاه داده‌های اقلیمی و منابع فیزیوگرافی شامل درجه حرارت، بارش، تعداد روزهای یخبندان، رطوبت نسبی، تبخیر و تعرق از ۲۸ ایستگاه سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران سنجی در استان مازندران به پهنه‌بندی مناطق مستعد کشت زیتون در این استان پرداخت. در نهایت با تهیه نقشه‌های GIS در منطقه اعلام نمود که مناسبترین مناطق برای کشت زیتون میان بندها یا کوه پایه‌های استان که ارتفاعشان تا ۹۰۰ متر از سطح دریا است است.

۲. مطالعات خارجی

یاداغ و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۳ در سانگولا^۲ در منطقه سولاپور^۳ به منظور بررسی مناسب بودن زمین برای تولید محصولات انار با استفاده از چند معیار (منطق فازی) و کاربرد GIS تحقیقاتی انجام دادند. بر اساس اطلاعات اداره کشاورزی، سطح زیر کشت ثبت شده انار ۱۰۰۴۶/۱ هکتار بوده است. با این حال، نتایج ارزیابی اراضی زراعی تحقیق حاضر نشان داد که در منطقه

1. Yadag et al
2. Sangola
3. Solapur

مورد مطالعه، در حال حاضر ۴۹۸۶ هکتار از کل سطح زیر کشت انار مورد استفاده قرار می‌گیرد که در مناطق بسیار مناسب و ۳۲۵۵ هکتار در مناطقی نسبتاً مناسب قرار داشتند. بخش قابل توجهی (۵۵۹۶ هکتار) در مناطق حاشیه‌ای مناسب قرار داشت. نتایج نشان داد که شیوه‌های کشاورزی حاکم بر منطقه مورد مطالعه با تناسب بالقوه در منطقه حاشیه‌ای مناسب مطابقت ندارد؛ بنابراین میانگین عملکرد منطقه مورد مطالعه به دلیل اینکه بخش قابل توجهی از محصول انار در مناطق حاشیه‌ای مناسب قرار داشت، به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار گرفت.

در تحقیق سریره و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۴ با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی GIS و فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP مناطق بهینه برای کشت زیتون در کشور اردن مورد بررسی قرار گرفته است. با شناخت اهمیت اقتصادی، زیست‌محیطی و فرهنگی درخت زیتون در مدیترانه، اعلام کردند که شمال و غرب اردن با دارا بودن بالاترین ویژگی‌های بهینه از جمله شرایط بارش و دمای مطلوب بهترین مناطق کشت زیتون در منطقه هستند.

روش پژوهش

در این تحقیق از اطلاعات و داده‌های ۳۰ ساله اخیر مربوط به ۱۵ ایستگاه هواشناسی در استان کرمانشاه استفاده گردید که در جدول (۱) مشخصات جغرافیایی و در جدول (۲) نیز متوسط اطلاعات هواشناسی مربوط به هر کدام از این ایستگاه‌ها آورده شده است.

جدول ۱. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمانشاه بر اساس UTM

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
کرمانشاه	۶۹۷۷۴/۸۲	۳۸۰۳۰۵۸/۴۴	گیلان غرب	۵۸۶۰۵۷/۸۳	۳۷۷۳۳۳/۲۰
روانسر	۶۵۱۰۸۹/۷۸	۳۸۴۲۸۶۲/۴۲	قصر شیرین	۵۵۵۰۶۰/۳۸	۳۸۲۱۴۵۶/۹۳
سرپل ذهاب	۵۷۹۶۱/۳۹	۳۸۱۲۳۹۳/۵۴	پاوه	۶۱۵۳۶۶/۲۹	۳۸۸۵۶۰/۲۳
کنگاور	۷۷۳۹۴/۳۹	۳۸۲۱۶۳۸/۷۴	صحنه	۷۶۱۷۶/۵۷	۳۸۱۸۲۸۹/۵۲
اسلام‌آباد غرب	۶۳۵۲۶۳/۵۶	۳۷۷۶۰۶۳/۰۲	ماهیدشت	۶۷۱۵۶/۶۰	۳۷۹۱۹۳۷/۱۱
سرارود	۷۱۱۵۸۷/۶۲	۳۰۱۵۱۲/۲۳	سومار	۵۶۰۳۴/۱۰	۳۷۳۹۵۵۷/۶۳
جوانرود	۶۳۷۲۱۵/۲۰	۳۸۵۱۸۸۹/۴۱	هرسین	۷۳۰۲۱۰/۷۴	۳۷۸۹۶۵۹/۷۵
سنقر	۷۳۶۳۸۱/۳۲	۳۸۵۲۰۵۷/۲۳	تازه‌آباد	۵۹۰۵۷۱/۷۷	۳۸۴۶۴۰۳/۸۵

جدول ۲. اطلاعات هواشناسی ایستگاه های استان کرمانشاه

نام ایستگاه	متوسط درجه حرارت (°C)	متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال (°C)	بارندگی (mm)	متوسط حداکثر دمای گرمترین ماه سال (°C)
کرمانشاه	۱۴/۴	-۳/۲	۴۴۶/۴	۳۸
روانسر	۱۴/۹	-۲/۸	۵۳۲/۶	۳۶/۸
سرپل ذهاب	۱۹/۹	۲/۹	۴۲۴/۵	۴۲/۳
کنگاور	۱۳/۳	-۵/۳	۳۹۵/۷	۳۶
اسلام آباد غرب	۱۳/۷	-۴/۲	۴۷۲/۹	۳۷
سرارود	۱۵	-۲/۹	۴۴۲/۶	۳۷/۵
جوانرود	۱۶/۲	-۳/۳	۶۱۴/۷	۳۷/۷
سنقر	۱۲/۸	-۵/۱	۴۲۶/۱	۳۴/۹
گیلان غرب	۲۰/۳	۴	۴۲۸/۸	۳۹/۷
قصرشیرین	۲۲/۲	۴/۵	۳۷۰/۷	۴۳/۲
پاوه	۱۵/۱	-۰/۸	۷۷۹/۱	۳۳/۸
صحنه	۱۵/۶	-۲/۲	۴۹۱/۸	۳۷/۴
ماهیدشت	۱۴	-۴/۲	۳۳۶/۳	۳۷/۱
سومار	۲۴	۷/۲	۱۸۶/۶	۴۲/۹
هرسین	۱۵/۱	-۲/۲	۳۷۱/۴	۳۵/۹
تازه آباد	۱۷/۳	۲/۷	۴۸۴	۳۶/۵

در این تحقیق، عناصر اقلیمی موردنیاز با روش درون یابی IDW ترسیم گردیدند. در این روش با استفاده از دورترین نقاط نسبتاً به هم یک چهار ضلعی رسم گردید که پارامتر موردنیاز در این چهارجوب ترسیم شد. پس از انجام این مرحله با استفاده از ابزار Extract by Mask در نرم افزار Arc Map منطقه استان کرمانشاه از این چهار ضلعی خارج شده است.

ضمناً باتوجه به اولویت های مهم در کشت هریک از محصولات موردنظر با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و طبقه بندی نمودن مجدداً این اطلاعات دسته بندی گردید. به صورتی که کشت انار و زیتون که از حساسیت بالاتری برخوردارند به پنج دسته و کشت مرکبات به سه دسته تقسیم شد. در این تقسیم بندی برای درختان انار و زیتون محدوده از یک تا پنج و برای مرکبات از یک تا سه لحاظ شده است، بطوری که اعداد کوچک تر بیانگر شرایط بهتر برای کشت بوده و با زیاد شدن کلاس آن ها از ارزششان کاسته می شود.

بعد از کلاس بندی کردن تمامی اولویت های هر یک از کشت ها با استفاده از ابزار Overlay و وزن دهی به هریک از اولویت ها که سعی شده است تمامی آن ها با یک ضریب ثابت و برابر تأثیرگذار باشند، در نهایت تمامی نقشه ها بر روی هم انداخته شده و نقشه نهایی ترسیم گردیده است.

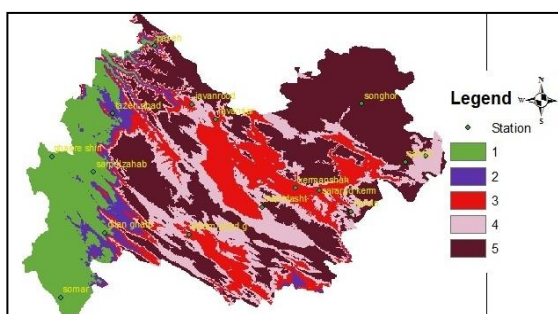
یافته های پژوهش

شرایط مناسب برای کشت باغات زیتون را می توان به عواملی که در جدول (۳) ارائه شده است نسبتاً داد و باتوجه به این شرایط تقسیم بندی صورت گرفته است.

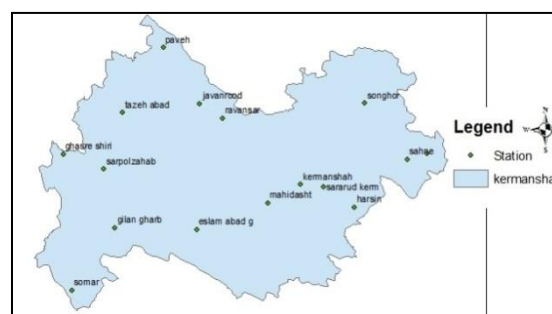
جدول ۳. اولویت بندی عوامل اقلیمی و توپوگرافی مؤثر بر رشد زیتون

درجه اولویت	خیلی مناسب	مناسب	نسبتاً مناسب	کمی مناسب	نامناسب
عوامل مؤثر	۱	۲	۳	۴	۵
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۹۵۰-۷۵۰	۱۲۰۰-۹۵۰	۱۴۰۰-۱۲۰۰	۱۶۰۰-۱۴۰۰	>۱۶۰۰
شیب (درصد)	۱۰-۰	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۵۰-۳۰	>۵۰
بارندگی سالانه (میلیمتر)	۱۱۰۰-۷۰۰	۷۰۰-۴۵۰	۳۵۰-۳۰۰	<۳۰۰	>۱۱۰۰
متوسط درجه حرارت سالانه (سانتی گراد)	۱۸-۱۶	۱۶-۱۵	۱۵-۱۴	۱۴-۱۳	<۱۳
متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال (سانتی گراد)	۰ تا -۱	-۲ تا -۴	-۴ تا -۶	-۶ تا -۸	< -۸

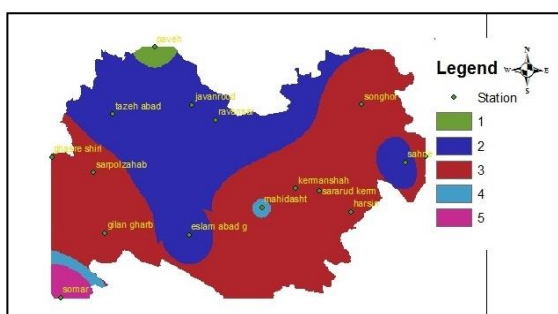
باتوجه به این شرایط، خروجی از برنامه GIS تبدیل به اشکال (۱) تا (۶) شده است که به ترتیب موقعیت ایستگاه‌های استان، طبقه بندی از لحاظ ارتفاع، شیب، بارندگی سالانه، متوسط درجه حرارت سالانه و متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال ارائه شده است.



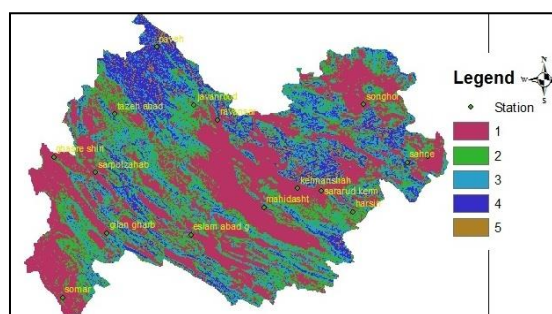
شکل ۲. طبقه بندی از لحاظ ارتفاع



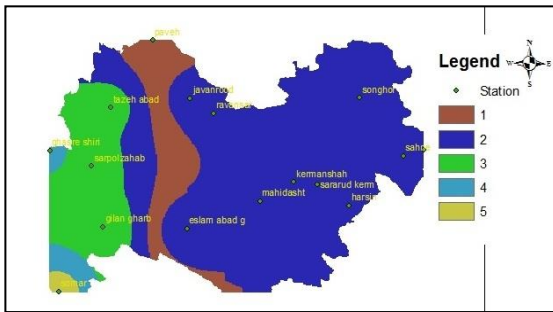
شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌ها



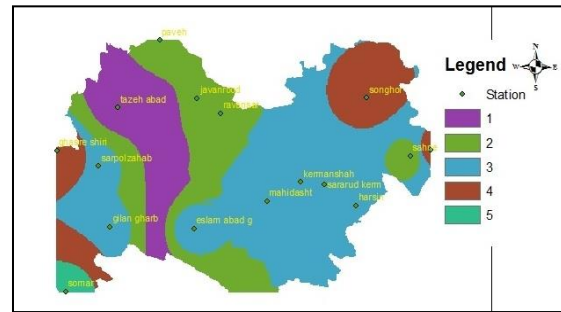
شکل ۴. طبقه بندی از لحاظ متوسط بارندگی



شکل ۳. طبقه بندی از لحاظ شیب

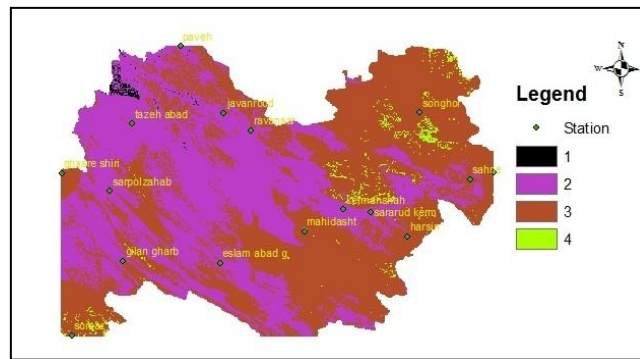


شکل ۶. طبقه‌بندی از لحاظ متوسط حداقل دمای سردترین ماه



شکل ۵. طبقه‌بندی از لحاظ متوسط درجه‌حرارت سالانه

در نهایت با روی هم اندازی نقشه‌های به‌دست‌آمده از کلاس‌بندی عوامل مؤثر در کشت زیتون و وزن‌دهی به هریک از آیت‌ها باتوجه‌به اینکه هریک از پارامترها ضریب ۰/۲ گرفته‌اند نقشه نهایی موردنظر به‌دست‌آمده که نشانگر حدود ۹۰۰۰ هکتار اولویت یک، ۱۰۷۲۰۰۰ هکتار اولویت دو، ۱۳۳۴۰۰۰ هکتار اولویت سه و ۳۵۱۰۰ هکتار اولویت چهار است که در شکل ۷ ارائه شده است.



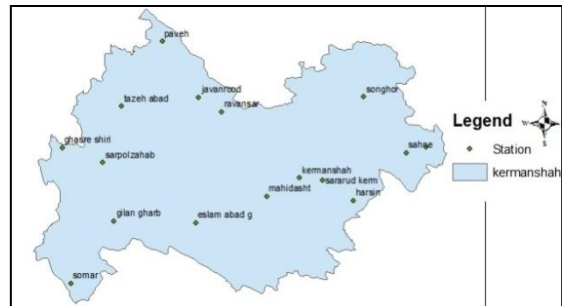
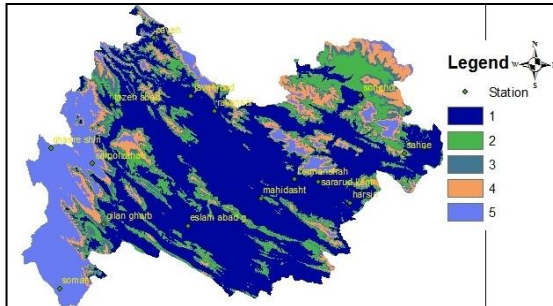
شکل ۷. طبقه‌بندی اراضی استان کرمانشاه از لحاظ مناسب‌بودن برای احداث باغ زیتون (۱ خیلی مناسب، ۲ مناسب، ۳ نسبتاً مناسب و ۴ کمی مناسب)

در جدول (۴) نیز اولویت‌بندی عوامل اقلیمی و توپوگرافی مؤثر بر رشد درخت انار ذکر گردیده است.

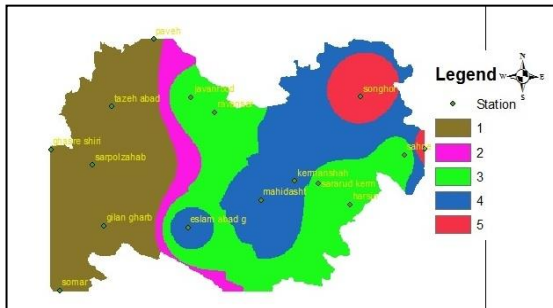
جدول ۴. اولویت‌بندی عوامل اقلیمی و توپوگرافی مؤثر بر رشد انار

درجه اولویت عوامل مؤثر	خیلی مناسب ۱	مناسب ۲	نسبتاً مناسب ۳	نامناسب ۴	غیرقابل کشت ۵
ارتفاع از سطح دریا (متر)	۱۷۰۰-۱۰۰۰	۱۰۰۰-۹۰۰	۹۰۰-۸۰۰	۸۰۰-۷۰۰	<۷۰۰
بارندگی سالانه (میلیمتر)	۱۱۰۰-۶۰۰	۶۰۰-۵۰۰	۵۰۰-۴۰۰	۴۰۰-۳۰۰	<۳۰۰
متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال (سانتی‌گراد)	< -۲	-۲ الی -۳	-۳ الی -۴	-۴ الی -۵	< -۵
متوسط حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال (سانتی‌گراد)	< ۲۰	۲۵-۲۰	۲۵-۳۰	۴۰-۳۰	> ۴۰

باتوجه به این شرایط، خروجی از برنامه GIS تبدیل به شکل های (۷) تا (۱۰) شده است که به ترتیب موقعیت ایستگاه های استان، طبقه بندی مناطق استان از لحاظ ارتفاع، بارندگی متوسط حداقل دمای سردترین ماه سال و متوسط حداکثر دمای گرمترین ماه سال را نشان می دهند.

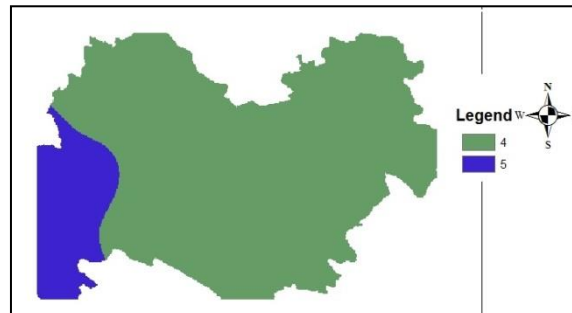


شکل ۷. موقعیت ایستگاه ها



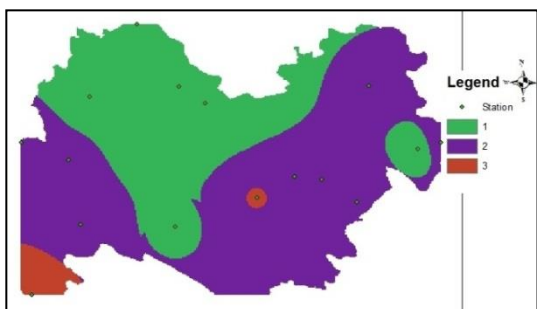
شکل ۹. طبقه بندی از لحاظ متوسط حداقل دمای سردترین ماه

شکل ۸. طبقه بندی از لحاظ متوسط بارندگی

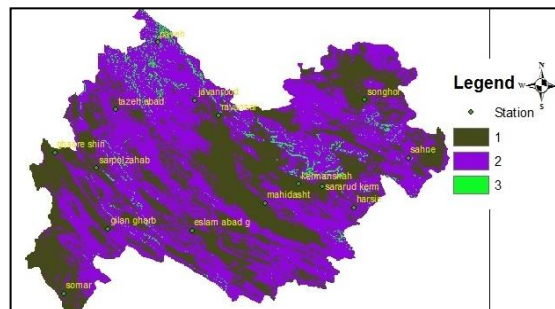


شکل ۱۰. طبقه بندی از لحاظ متوسط حداکثر دمای گرمترین ماه

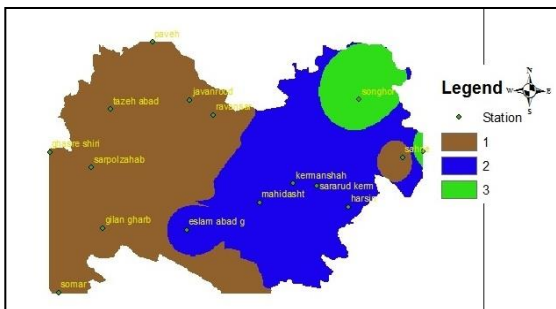
همان طور که در شکل (۱۰) دیده می شود از پنج اولویت طبقه بندی فقط اولویت چهار و پنج مشاهده می شود که دلیل آن عدم وجود اولویت های یک تا سه در استان کرمانشاه است. در نهایت با روی هم اندازی نقشه های به دست آمده از کلاس بندی عوامل مؤثر در کشت انار و وزن دهی به هریک از آیت م ها و با در نظر گرفتن ضریب $0/25$ برای هریک از آیت م ها نقشه نهایی به دست آمده که نشانگر حدود 322400 هکتار اولویت دو، 1595700 هکتار اولویت سه و 532000 هکتار اولویت چهار برای کشت انار است که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



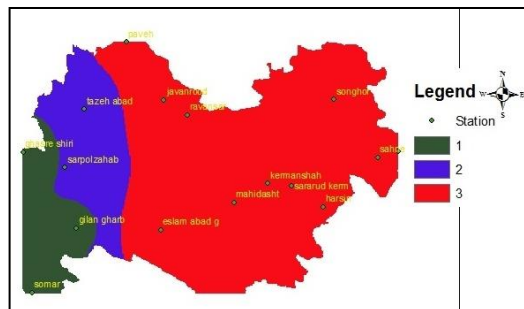
شکل ۱۵. طبقه‌بندی از لحاظ متوسط بارندگی سالانه



شکل ۱۴. طبقه‌بندی از لحاظ شیب

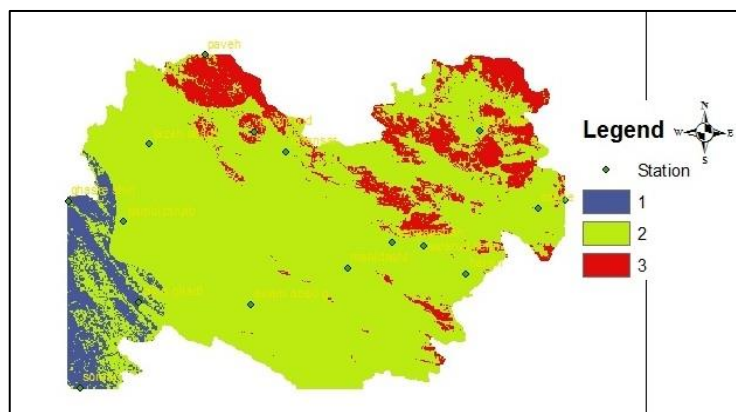


شکل ۱۷. طبقه‌بندی از لحاظ متوسط حداکثر دمای گرمترین ماه



شکل ۱۶. طبقه‌بندی از لحاظ متوسط حداقل دمای سردترین ماه

با روی هم اندازی نقشه‌های به‌دست‌آمده از کلاس‌بندی عوامل مؤثر در کشت مرکبات و وزن‌دهی به هریک از آیت‌ها و با در نظر گرفتن ضریب $0/2$ برای هریک از آیت‌ها، نقشه نهایی به‌دست‌آمده که نشانگر حدود 163800 هکتار در اولویت یک، 1976300 هکتار اولویت دو و 310000 هکتار اولویت سه است که در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل ۱۹. طبقه‌بندی اراضی استان کرمانشاه از لحاظ مناسب بودن برای احداث باغ مرکبات (۱ مناسب، ۲ نامناسب و ۳ غیرقابل کشت)

بحث

همان‌طور که از نتایج این تحقیق برمی‌آید، استان کرمانشاه از لحاظ کشت باغات همانند کشت محصولات زراعی از پتانسیل بالایی برخوردار است. در این تحقیق پتانسیل استان کرمانشاه برای سه کشت زیتون، انار و مرکبات مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتیجه گیری

نتایج به دست آمده حاکی از استعداد استان در تولید محصولات باغی است؛ لذا، با توجه به شرایط اقلیمی مناسب موجود در سراسر استان و با برنامه ریزی مناسب کشت و منابع آب در مناطق پهنه بندی شده، استان کرمانشاه می تواند در هریک از این محصولات خودکفا و صادرکننده به شهرستانها و استانهای همجوار و حتی کشور عراق باشد. در استان کرمانشاه نواحی شهرستانهای پاوه، جوانرود و ثلاث باباجانی از پتانسیل بالایی برای کشت زیتون برخوردار هستند، ولی این به این معنا نیست که نواحی دیگر غیرقابل کشت هستند، بلکه می توان با مدیریت درست کشاورزی و اقتصادی اقدام به کاشت این محصول نمود. در سرتاسر استان شرایط بسیار خوبی برای کشت انار وجود ندارد، ولی نواحی مشخصی در شهرستانهای پاوه، جوانرود، اسلام آباد، ثلاث باباجانی، گیلان غرب دارای شرایط مناسبی برای کاشت این درخت هستند. اما نواحی سومار و قصرشیرین را می توان از مناطق نامناسب برای کشت این محصول نام برد. نواحی سومار و قصرشیرین از پتانسیل بسیار بالایی برای کاشت مرکبات برخوردار هستند، به طوری که از دیرباز در این مناطق کشت مرکبات رایج بوده است و نواحی شهرستانهای پاوه، سنقر، صحنه و سایر ارتفاعات استان که درجه حرارت پایینی دارند برای کشت مرکبات توصیه نمی شوند. در نهایت اطلاعات حاصل از این تحقیق می تواند راهنمای خوبی برای مسئولین استان جهت برنامه ریزی کشت و پیش بینی مناسب و بهینه مدیریت منابع آب باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- برنا، رضا، شبانکاری، مهران، حلبیان، امیرحسین، و علیزاده، افسانه. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی آگروکلیمایی کشت مرکبات در استان خوزستان با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP در محیط GIS. *مجله پژوهش‌های دانش‌زمین*، ۸(۲۹)، ۳۲-۵۴. <https://civilica.com/doc/1266900>
- برنا، رضا، و علیزاده، افسانه. (۱۳۹۵). پهنه‌بندی اقلیمی کشاورزی کشت مرکبات در استان خوزستان با روش فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی. *نشریه هواشناسی کشاورزی*، ۴(۱)، ۲۱-۱۲. <https://www.grimet.ir/article54963.html>
- درویشیان، محمود. (۱۳۸۰). زیتون. *نشر آموزش کشاورزی*، تهران، ایران. <https://www.gisoom.com/book/1133330/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%B2%DB%8C%D8%AA%D9%88%D9%86/>
- دلیری، علی، کاشکی، عبدالرضا، و بروغنی، معصومه. (۱۳۹۵). پهنه‌بندی کشت انار با استفاده از پارامترهای اقلیمی در استان خراسان رضوی. *سومین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری*، تبریز، ایران. <https://civilica.com/doc/640017>
- سبحانی، بهروز. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی قابلیت کشت زیتون در استان مازندران با تاکید بر داده‌های مؤثر اقلیمی و فیزیوگرافی. *مجله جغرافیا و آمایش شهری منطقه‌ای*، ۲۵، ۱۸۶-۱۷۱. <https://www.id.ir/paper/236718/fa>
- صادقی، حسین. (۱۳۸۱). کاشت، داشت و برداشت زیتون. *نشر آموزش کشاورزی*، تهران، ایران. <https://www.gisoom.com/book/1229772/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%DA%A9%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D8%AF%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D9%88-%D8%A8%D8%B1%D8%AF%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D8%B2%DB%8C%D8%AA%D9%88%D9%86/>
- ضیائی‌ان فیروزآبادی، پرویز، خالدی، شهریار، خندان، سکینه، و علیزاده، انوش. (۱۳۸۹). پهنه‌بندی آگروکلیمایی مرکبات در استان لرستان با استفاده از مدل همپوشانی شاخص و منطق فازی و مقایسه مدل‌ها. *نشریه آمایش محیط*، ۳(۸)، ۲۱-۵۴. <https://www.sid.ir/paper/130549/fa>
- قنبری، سیروس، و کریمی، جعفر. (۱۳۹۱). ارزیابی پتانسیل‌های اقلیمی کشت انار در استان اصفهان با استفاده از GIS. *همایش ملی انار*، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. <https://civilica.com/1/4257>
- کاوایی، محمدرضا، و علیجانی، بهلول. (۱۳۷۹). مبانی آب و هواشناسی. چاپ دوم، انتشارات سمت، تهران، ایران. <https://samta.samt.ac.ir/product/9117>
- کوزه‌گران، سعیده، برهانی، رضا، طحان، محمدرضا، و بهدانی، ع. (۱۳۹۰). پتانسیل‌یابی مناطق مستعد کشت انار به لحاظ پارامترهای اقلیمی با استفاده از GIS (مطالعه موردی خراسان جنوبی). *همایش ملی انار*، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. <https://civilica.com/doc/160735>
- کیانیان، محمدکیا، حاجی محمدی، حسن، و رسولی، فهیمه. (۱۳۹۵). ارزیابی پتانسیل اقلیمی کشت انار در استان خراسان رضوی با استفاده از GIS. *کنفرانس سراسری تحقیق در علوم کشاورزی و منابع طبیعی*، گرگان، ایران. <https://civilica.com/1/6624>
- محمدی، حسین، کاظمی، مهدی، و گودرزی، نفیسه. (۱۳۸۶). کاربرد GIS در امکان‌سنجی کشت زیتون در استان اصفهان. *مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی*، ۷۴، ۱۳۳-۱۲۳. <https://www.sid.ir/paper/18769/fa>
- موغلی، مرضیه. (۱۳۹۳). امکان‌سنجی کشت زیتون بر اساس عوامل محیطی با استفاده از GIS در شهرستان بویر احمد. *فصل‌نامه جغرافیای طبیعی*، ۱۲۵، ۴۳-۵۴. <https://www.id.ir/paper/18769/fa>
- میر موسوی، سیدحسین، و اکبری، حمید. (۱۳۸۹). امکان‌سنجی اقلیمی کشت زیتون در استان کرمانشاه. *مجله چشم‌انداز جغرافیایی (علمی - پژوهشی)*، ۱۰، ۱۴۲-۱۲۱. <https://www.id.ir/paper/1759>

نظری پور، هاجر. (۱۳۹۲). پتانسیل یابی اقلیمی کشت انار در کوهدشت. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده جغرافیا، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. <https://elmnet.ir/doc/10591354-30136>

نوری، مسعود. (۱۳۸۳). اقلیم کشاورزی شهرستان دهلران با تاکید بر اثرات شاخص حرارتی و بارشی بر کشت چغندرقد، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران. <https://elmnet.ir/doc/10565352-81249>

وزارت کشاورزی. (۱۳۸۰). آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۷۹-۷۸. معاونت برنامه ریزی و بودجه، تهران، ایران.

https://maj.ir/Index.aspx?page_=form&lang=1&PageID=11583&tempname=amar&sub=65&methodName>ShowModuleContent

References

- Borna, R., & Alizadeh, A. (2016). Climatic Zoning of Citrus Cultivation in Khuzestan Province by Hierarchical Analysis Process Method. *Journal of Agricultural Meteorology*, 4(1), 12-21. <https://www.agrimet.ir/article54963.html> (In Persian)
- Borna, R., Shabankari, M., Halabian, A., & Alizadeh, A. (2016). Agro-climatic zoning of Citrus cultivation in Khuzestan province using AHP hierarchical analysis process in GIS environment. *Earth science researches*, 8(29), 32-54. <https://civilica.com/doc/1266900/> (In Persian)
- Daliri, A., Kashki, A., & Borogheni, M. (2016). Zoning of Pomegranate cultivation using climatic parameters in Razavi Khorasan province. *The third international conference on sustainable development, solutions and challenges, focusing on agriculture, natural resources, environment and tourism*, Tabriz, Iran. <https://civilica.com/doc/640017> (In Persian)
- Darvishian, M. (2000). Olive. *Gisom Publications*, Tehran, Iran. <https://www.gisoom.com/book/1133330/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%B2%DB%8C%D8%AA%D9%88%D9%86/> (In Persian)
- Ghanbari, S., & Karimi, J. (2012). Evaluation of the climatic potential of Pomegranate cultivation in Isfahan province using GIS. *Pomegranate National Conference*, Ferdowsi Mashhad university, Mashhad, Iran. <https://civilica.com/1/4257/> (In Persian)
https://www.researchgate.net/publication/265025296_Land_Assessment_for_Horticulture_Pomegranate_Crop_Using_GIS_and_Fuzzy_Decision_Analysis_in_the_Sangola_Taluka_of_Solapur_District (In Persian)
- Kaviyani, M., & Alijani, B. (2000). Basics of water and meteorology. Second edition. *Samt Publications*, Tehran, Iran. <https://samta.samt.ac.ir/product/9117/> (In Persian)
- Kianian, M K., Haji Mohamadi, H., & Rasoli, F. (2016). Evaluation of the climatic potential of Pomegranate cultivation in Razavi Khorasan province using GIS. *National conference on research in agricultural sciences and natural resources*, Gorgan, Iran. <https://civilica.com/1/6624/> (In Persian)
- Kozehgaran, S., Borhani, R., Tahan, M., & Behdani, A. (2011). Finding the potential of areas prone to Pomegranate cultivation in terms of climatic parameters using GIS. (Case study of South Khorasan), *Pomegranate National Conference*, Ferdowsi Mashhad university, Mashhad, Iran. <https://civilica.com/doc/160735/> (In Persian)
- Ministry of Agriculture. (2000). Agricultural statistics of the crop year 1999-1998. *Department of Planning and Budget*, Tehran, Iran. https://maj.ir/Index.aspx?page_form=lang=1&PageID=11583&tempname=amar&sub=65&methodName=ShowModuleContent (In Persian)
- Mirmosavi, S., & Akbari, H. (2010). Climatic feasibility of Olive cultivation in Kermanshah province. *Geographical perspective magazine*. 4(10). 121-142. <https://www.sid.ir/paper/1759> (In Persian)
- Mogheli, M. (2020). Feasibility of Olive cultivation based on environmental factors using GIS in Boyer Ahmed city. *Chapter of Natural Geography*, 7(125), 43-54. <https://www.sid.ir/paper/18769/fa> (In Persian)
- Mohamadi, H., Kazemi, M., & Godarzi, N. (2007). Application GIS in feasibility study plant of olive in Esfahan province. *Pajouhesh & Sazandegi*, 74, 123-133. <https://www.sid.ir/paper/18769/fa> (In Persian)
- Nazaripour, H. (2013). Climatic Potential of Pomegranate Cultivation in Kohdasht. Master's thesis, Faculty of Geography, Isfahan University, Isfahan, Iran. <https://elmnet.ir/doc/10591354-30136> (In Persian)

- Nori, M. (2004). The agricultural climate of Dehleran city with emphasis on the effects of thermal and precipitation index on sugar beet cultivation. Master's thesis, *Shahid Beheshti University*, Tehran, Iran. <https://elmnet.ir/doc/10565352-81249> (In Persian)
- Sadeghi, H. (2002). Planting, growing and harvesting olives. Agricultural education publication, Tehran, Iran. <https://www.gisoom.com/book/1229772/%DA%A9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%DA%A9%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D8%AF%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D9%88-%D8%A8%D8%B1%D8%AF%D8%A7%D8%B4%D8%AA-%D8%B2%DB%8C%D8%AA%D9%88%D9%86/> (In Persian)
- Sarayrah, H., Hayek, W., Farhan, I., & Mohammad, W. (2024). Mapping the Future of Green Gold: GIS-Based Insights into Optimal Olive-Cultivation Areas in Jordan Amidst Climate Change. *Sustainability*, 16(16), 6769. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/16/6769>
- Sobhani, B. (2017). Zoning of Olive cultivation capability in Mazandaran province with emphasis on effective climatic and physiographic data. *Geography and regional urban planning*. 25 .171-186. <https://www.sid.ir/paper/236718/fa> (In Persian)
- Yedage, A., Gavali, R., & Jarag, A. (2013). Land Assessment for Horticulture (Pomegranate) Crop Using GIS and Fuzzy Decision Analysis in the Sangola Taluka of Solapur District. *International Journal of Remote Sensing and GIS*. 2(3). 104-113.
- Ziyaeyan Firozabadi, P., Khaledi, Sh., Khandan, S., & Alizadeh, A. (2010). Agroclimatic zoning of citrus fruits in Lorestan province using index overlap model and fuzzy logic and comparison of models, 3(8), 21-54. <https://www.sid.ir/paper/130549/fa> (In Persian)



Investigation of the average advance distance location in deriving the infiltration equation in surface irrigation

Amin Seyedzadeh¹ , Amir Panahi² , and Eisa Maroufpoor³ 

1. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering and research institute of Water Resources Management in arid region, Faculty of agriculture, Fasa university, Fasa, Iran. E-mail: A-Seyedzadeh@fasau.ac.ir
2. Department of Engineering, IS-FOOD Institute (Institute for Innovation & Sustainable Development in Food Chain), Public university of Navarre, Campus de Arrosadía, 31006 Pamplona, Navarra, Spain. E-mail: Amir.Panahi@unavarra.es
3. Department of Water Engineering, Faculty of agriculture, Kurdistan university, Sanandaj, Iran. E-mail: E.maroufpoor@uok.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received 02 August 2024

Received in revised form 04 November 2024

Accepted 23 November 2024

Available online 25 March 2025

Keywords:

infiltration,
two-point method,
midpoint,
advance equation,
Kostiakov-Lewis equation.

Objective: This study introduces a novel approach to determine the optimal midpoint location in the two-point method for estimating infiltration parameters of the Kostiakov-Lewis equation. Unlike the traditional fixed midpoint, which sometimes leads to errors, the proposed method dynamically adjusts the midpoint based on the average advance distance during the advance phase.

Method: To evaluate the performance of the proposed method, data from two border-irrigated fields in the Zarineh Rud irrigation and drainage network were used.

Results: The results of this study showed that the value of the root sum square error index for the advance equation of the proposed method was 17.3 minutes, while for the fixed midpoint method, it was 19.7 minutes. Also, the absolute relative error of the infiltration equations obtained from the two methods in calculating the average depth of infiltrated water in the field was 1.3% and 3.4%, respectively.

Conclusions: Selecting the midpoint in the two-point method based on the average location of the advance distance, in addition to overcoming the challenges of the fixed midpoint, has higher accuracy in estimating the advance time and also in estimating the infiltration parameters, providing a more reliable basis for irrigation management decisions.

Cite this article: Seyedzadeh, A., Panahi, A., & Maroufpoor, E. (2025). Investigation of the average advance distance location in deriving the infiltration equation in surface irrigation. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 51-63. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11183.1142>



© The Author(s)

Publisher: Razi University.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11183.1142>

Introduction

Surface irrigation remains the predominant irrigation method in global agriculture. However, its efficiency is often lower than expected due to suboptimal design and management practices. One of the critical factors for accurate design and management of surface irrigation systems is a precise description of soil infiltration characteristics. The Kostiakov-Lewis infiltration equation is widely used due to its simplicity and robust performance under various field conditions. Accurate determination of its coefficients is essential for optimizing the performance of surface irrigation systems. This study introduces a novel approach to determine the optimal midpoint location in the two-point method for estimating infiltration parameters of the aforementioned equation. Unlike the traditional fixed midpoint, which sometimes leads to errors, the proposed method dynamically adjusts the midpoint based on the average advance distance during the advance phase.

Method

This study utilized field data from two irrigation sites within the Zarinerood irrigation and drainage network in Northwest Iran. The data were collected from border irrigation farms at these sites. The proposed method was compared with the traditional two-point method to assess its effectiveness. The methodology involved dynamically adjusting the midpoint during the water advance phase and using this information to calculate infiltration parameters. The accuracy of the proposed method was then evaluated by comparing its results with those of the traditional fixed midpoint approach.

Results

The results of this study showed that the value of the root sum square error index for the advance equation of the proposed method was 17.3 minutes, while for the fixed midpoint method, it was 19.7 minutes. Also, the absolute relative error of the infiltration equations obtained from the two methods in calculating the average depth of infiltrated water in the field was 1.3% and 3.4%, respectively. Therefore, selecting the midpoint in the two-point method based on the average location of the advance distance, in addition to overcoming the challenges of the fixed midpoint, has higher accuracy in estimating the advance time and also in estimating the infiltration parameters, providing a more reliable basis for irrigation management decisions.

Conclusions

This study introduces a novel approach to determining the optimal midpoint in the two-point method for estimating Kostiakov-Lewis infiltration equation parameters. The conventional fixed midpoint method, commonly employed in surface irrigation studies and design, can lead to inaccuracies and even failure in fields with significant spatial variability in infiltration. By introducing a dynamic midpoint based on the average advance distance, the proposed method provides a more accurate representation of field infiltration processes. Analysis of irrigation data from two furrow-irrigated fields demonstrated that, based on the root sum square error (RSSE) index, the advance curves computed using the proposed method consistently exhibited better agreement with field data. Consequently, the proposed dynamic midpoint method offers a significant improvement in the accuracy and reliability of infiltration parameter estimation for surface irrigation, facilitating enhanced irrigation management and water use efficiency.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement.

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بررسی موقعیت مکانی متوسط فاصله پیشروی در استخراج معادله نفوذ در آبیاری سطحی

امین سیدزاده^۱، امیر پناهی^۲، و عیسی معروف پور^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب و پژوهشکده مدیریت منابع آب در مناطق خشک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا، فسا، ایران. رایانامه: Seyedzadeh@fasau.ac.ir
۲. گروه مهندسی، موسسه IS-FOOD (موسسه نوآوری و توسعه پایدار در زنجیره غذایی)، دانشگاه عمومی ناوار، پردیس آروسادیا، پامپلونا، ناوارا، اسپانیا. رایانامه: Amir.Panahi@unavarra.es
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: e.maroufpoor@uok.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقا

هدف: این مطالعه یک رویکرد جدید برای تعیین مکان بهینه نقطه میانی در روش دو نقطه‌ای برای تخمین پارامترهای نفوذ معادله مذکور معرفی می‌کند. بر خلاف نقطه میانی ثابت سنتی که گاهی منجر به خطا می‌شود، روش پیشنهادی به صورت دینامیکی نقطه میانی را بر اساس میانگین فاصله پیشروی در طول مرحله پیشروی تنظیم می‌کند.

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

روش پژوهش: برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از داده‌های دو مزرعه آبیاری نواری در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج این بررسی نشان داد که شاخص ریشه مجموع مربعات خطا برای معادلات پیشروی حاصل از روش پیشنهادی، ۱۷/۳ دقیقه و معادلات پیشروی حاصل از روش نقطه میانی ثابت، ۱۹/۷ دقیقه می‌باشد. همچنین قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ حاصل از دو روش مذکور در محاسبه متوسط عمق آب نفوذی مزرعه، به ترتیب ۳/۱ و ۴/۳ درصد بود.

کلیدواژه‌ها:
نفوذ،

نتیجه‌گیری: انتخاب نقطه میانی در روش دونقطه‌ای، بر اساس مکان متوسط فاصله پیشروی، علاوه بر اینکه چالش‌های نقطه میانی ثابت را ندارد، از دقت بالاتری در تخمین مدت‌زمان پیشروی و همچنین برآورد پارامترهای نفوذ برخوردار است و مبنای قابل‌اعتمادتری برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت آبیاری فراهم می‌کند.

روش دو نقطه‌ای،
نقطه میانی،
رابطه پیشروی،
رابطه کاستیاکف - لوئیس.

استناد: سیدزاده، امین؛ پناهی؛ امیر؛ و معروف پور، عیسی. (۱۴۰۴). بررسی موقعیت مکانی متوسط فاصله پیشروی در استخراج معادله نفوذ در آبیاری سطحی. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۱)، ۶۳-۵۱.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11300.1143>



مقدمه

علی‌رغم توسعه سیستم‌های نوین آبیاری، آبیاری سطحی هنوز هم به‌عنوان روش اصلی آبیاری در بسیاری از مناطق جهان استفاده می‌شود. این محبوبیت پایدار ناشی از سادگی، مقرون‌به‌صرفه بودن و سازگاری با زمین‌ها و سامانه‌های کشت متنوع است. با این حال، راندمان آبیاری سطحی به دلیل طراحی و شیوه‌های مدیریتی غیربهبوده، اغلب از پتانسیل خود کمتر است (کی^۱، ۱۹۹۰؛ و سیدزاده و همکاران^۲، ۲۰۲۲). یکی از عوامل مهم تاثیرگذار بر طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری سطحی، توصیف دقیق ویژگی‌های نفوذ آب در خاک است (الیوت و واکر^۳، ۱۹۸۲؛ کارملی و همکاران^۴، ۱۹۷۸؛ اویونارته و همکاران^۵، ۲۰۰۲؛ واکر و اسکوگربو^۶، ۱۹۸۷؛ و زیرهون و همکاران^۷، ۱۹۹۶).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

تاکنون، محققان تلاش‌های زیادی را برای توسعه مدل‌های ریاضی پدیده نفوذ آب در خاک، انجام داده‌اند که نتایج این مطالعات منجر به ارائه مدل‌های فیزیکی مانند مدل گرین و آمپت^۸ (۱۹۱۱) تا فرمول‌های تجربی و نیمه‌تجربی مانند کاستیاکوف^۹ (۱۹۳۲)، لوئیس^{۱۰} (۱۹۳۷)، هورتون^{۱۱} (۱۹۳۹)، فیلیپ^{۱۲} (۱۹۵۷)، و سازمان حفاظت خاک امریکا^{۱۳} (۱۹۷۴) شده است. مدل نفوذ کاستیاکوف - لوئیس (معادله (۱)) که اغلب به‌عنوان معادله کاستیاکوف اصلاح شده نیز ذکر می‌گردد (اسمیت^{۱۴}، ۱۹۷۲)، به دلیل سادگی نسبی و عملکرد قوی آن در پیش‌بینی نرخ نفوذ تحت شرایط مختلف مزرعه‌ای، مقبولیت و کاربرد گسترده‌ای دارد.

$$i = kt^a + f_0 t \quad (1)$$

که در آن i نفوذ تجمعی (mm)؛ k ضریب ثابت (mm/h^a) ؛ a نمای ثابت (بدون بعد)، t فرصت زمان نفوذ (h) و f_0 سرعت نفوذ نهایی (mm/h) است.

تعیین دقیق ضرایب معادله کاستیاکوف - لوئیس برای بهینه‌سازی طراحی و عملکرد سامانه‌های آبیاری سطحی بسیار مهم است. این دقت منجر به تطابق بیشتر نتایج مطالعات طراحی و پیش‌بینی سناریوهای متفاوت مدیریتی با عملکرد واقعی سامانه آبیاری در مزرعه می‌گردد. روش‌های متعددی برای تخمین این ضرایب پیشنهاد شده است که هر کدام نقاط قوت و محدودیت‌های خاص خود را دارند. این روش‌ها شامل رویکرد موازنه حجم همراه با داده‌های پیشروی آب در طول مزرعه (کریستیانسن و همکاران^{۱۵}، ۱۹۶۶)، روش تطبیق منحنی‌های پیشروی بدون بعد (الیوت و همکاران^{۱۶}، ۱۹۸۳)، روش یک نقطه‌ای بنامی و افن^{۱۷} (۱۹۸۴)، روش یک نقطه‌ای شپارد و همکاران^{۱۸} (۱۹۹۳)، روش یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران^{۱۹} (۲۰۰۱)، و روش کالیبراسیون چندمرحله‌ای واکر^{۲۰} (۲۰۰۵) است.

1. Key
2. Seyedzadeh et al
3. Elliot and Walker
4. Karmeli et al
5. Oyonarte et al
6. Walker and Skogerboe
7. Zerihun et al
8. Green and Ampt
9. Kostiakov
10. Lewis
11. Horton
12. Philip
13. USDA Soil Conservation Service
14. Smith
15. Christiansen et al
16. Elliot et al
17. Benami and Ofen
18. Shepard et al
19. Valiantzas et al
20. Walker

در میان روش‌های مختلف توسعه یافته برای تخمین پارامترهای نفوذ، روش دو نقطه‌ای پیشنهاد شده توسط الیوت و واکر (۱۹۸۲) به دلیل سادگی نسبی و دقت قابل قبول، کاربرد قابل توجهی پیدا کرده است. این روش که بر اساس اصل موازنه حجم استوار است (کریستیانسن و همکاران، ۱۹۶۶) از رابطه پیشروی آب در طول مزرعه با فرم معادله توانی (معادله (۲)) استفاده می‌کند:

$$x = pt_x^r \quad (2)$$

که در آن x فاصله پیشروی آب در مزرعه نسبت به ابتدای آن (m)، t_x زمان پیشروی آب در مزرعه از لحظه شروع آبیاری (\min)، P و r ضرایب ثابت تجربی است.

روش دو نقطه‌ای بر داده‌های دو نقطه متمایز در طول مزرعه (نقطه میانی و نقطه انتهایی مزرعه)، برای تعیین پارامترهای r و P در رابطه پیشروی استوار است. همچنین از اطلاعات دو نقطه مذکور برای محاسبه حجم آب ذخیره شده در مزرعه استفاده می‌شود. با مقایسه حجم کل آب ورودی به مزرعه با حجم ذخیره سطحی آن، می‌توان حجم آب نفوذی را تعیین کرد و در نهایت ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف-لوئیس را محاسبه نمود.

اگرچه روش دو نقطه‌ای یک رویکرد عملی برای تخمین پارامترهای معادله نفوذ است؛ اما دقت و شکست آن وابسته به انتخاب مکان نقطه میانی است. بیشتر طراحی‌ها و مطالعات در استفاده از روش دو نقطه‌ای به استفاده از یک نقطه میانی ثابت، در وسط طول مزرعه، متکی هستند (واکر و اسکوگربو، ۱۹۸۷؛ الیوت و واکر، ۱۹۸۲). اما تغییرات در بافت و ساختمان خاک در امتداد طول مزرعه بر فرایند نفوذ تأثیر می‌گذارد و در نظر گرفتن نقطه ثابت وسط مزرعه برای تمامی شرایط جوابگو نخواهد بود.

مطالعات سیدزاده و همکاران (۲۰۲۰ و a و b) و پناهی و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۳) نشان از عدم دقت کافی و یا عدم موفقیت روش دو نقطه‌ای در صورت استفاده از نقطه میانی ثابت (وسط مزرعه) در برخی شرایط برای تعیین ضرایب نفوذ دارد. زیرا در نظر گرفتن یک نقطه میانی ثابت نمی‌تواند ماهیت دینامیکی پیشروی آب در طول مزرعه و همچنین نفوذ آب در خاک را به خوبی نشان دهد و این منجر به خطاهای بالقوه در تخمین پارامتر r و در نتیجه تعیین ضرایب نفوذ می‌شود. به عنوان نمونه، در شرایطی که میزان نفوذ در نیمه اول مزرعه بیشتر از نیمه دوم آن باشد، استفاده از نقطه میانی ثابت، منجر به بیشتر شدن توان رابطه پیشروی (r) از مقدار واحد و در نهایت منفی شدن ضرایب نفوذ می‌شود (الیوت و واکر، ۱۹۸۲؛ و سیدزاده و همکاران، ۲۰۱۹).

بنابراین، در این پژوهش، یک رویکرد جدید برای تعیین مکان نقطه میانی بهینه بر اساس متوسط فاصله پیشروی آب در مرحله پیشروی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هدف این رویکرد نوآورانه، رفع محدودیت‌های روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، با لحاظ تغییرات دینامیکی بین پیشروی جبهه آب و نفوذ است. نقطه مذکور که متأثر از میزان نفوذ تمامی نقاط مزرعه است، نماینده مناسبی برای وضعیت نفوذپذیری مزرعه در جهت طول است. نقطه مکانی که در آن میانگین فاصله پیشروی روی می‌دهد، ثابت نبوده و با تغییر شرایط نفوذپذیری خاک مزرعه، تغییر می‌نماید، بنابراین وضعیت‌هایی را که منجر به شکست روش دو نقطه‌ای در شرایط استفاده از نقطه وسط مزرعه ایجاد می‌شود رفع می‌نماید (سیدزاده و همکاران، ۲۰۲۰). در پژوهش حاضر میزان دقت روش پیشنهادی با روش دو نقطه‌ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) در برآورد ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف لوئیس مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر خاک مزرعه همگن باشد، پیشروی آب در طول مزرعه به صورت یک رابطه توانی (رابطه (۲)) است. با میانگین‌گیری انتگرالی از رابطه ۲، متوسط فاصله پیشروی آب در طول مزرعه به صورت زیر حاصل خواهد شد (رابطه (۳)):

$$\bar{x} = \frac{\int_0^{t_L} x dt_x}{t_L} \xrightarrow{x=pt_x^r} \bar{x} = \frac{\int_0^{t_L} pt_x^r dt_x}{t_L} = \frac{p}{t_L(r+1)} t_x^{r+1} \Big|_0^{t_L} \rightarrow \bar{x} = \frac{p}{r+1} t_L^r \quad (3)$$

که در آن L طول مزرعه و t_L زمان رسیدن آب به انتهای مزرعه است.

باتوجه به اینکه متوسط فاصله پیشروی در متوسط زمان پیشروی روی می دهد، بنابراین:

$$\bar{x} = p t_x^{-r} \rightarrow \bar{t}_x = \left(\frac{\bar{x}}{p}\right)^{\frac{1}{r}} \xrightarrow{\bar{x} = \frac{p}{r+1} t_L^r} \bar{t}_x = \left(\frac{t_L^r}{r+1}\right)^{\frac{1}{r}} = \frac{t_L}{(r+1)^{\frac{1}{r}}} \quad (۴)$$

مقدار \bar{x} در رابطه (۴) با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} \left[\left(\frac{x_{j+1} + x_j}{2} \right) (t_{j+1} - t_j) \right]}{t_L} \quad (۵)$$

که در آن j شمارنده و n تعداد ایستگاههای اندازه گیری پیشروی آب در طول مزرعه است. با تلفیق روابط (۳) و (۴)، پارامتر r مطابق رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$\bar{t}_x = t_L \left(\frac{\bar{x}}{L}\right)^{\frac{1}{r}} \rightarrow r = \frac{\ln\left(\frac{L}{\bar{x}}\right)}{\ln\left(\frac{t_L}{\bar{t}_x}\right)} = \left[\left(\frac{L}{\bar{x}}\right) - 1 \right] \quad (۶)$$

سپس باتوجه به مقادیر \bar{x} و r و با استفاده از رابطه (۳)، می توان مقدار p را تعیین کرد:

$$p = \frac{\bar{x}(r+1)}{t_L^r} \quad (۷)$$

بنابراین در ابتدا با استفاده از داده های مزرعه ای و با استفاده از رابطه (۵)، مقدار \bar{x} تعیین می شود. سپس با استفاده از مقدار \bar{x} و رابطه (۶) به ترتیب مقادیر r و \bar{t}_x محاسبه می شود و سپس مقدار p با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می گردد. سپس با قرار دادن اطلاعات این نقطه $\left[(x, t_x) = (\bar{x}, \bar{t}_x) \right]$ و نقطه انتهایی مزرعه (L, t_L) ، در معادله موازنه حجم، ضرایب رابطه نفوذ کاستیاکف - لوئیس محاسبه می شود.

پناهی و همکاران (۲۰۲۱) در مطالعات خود، با استفاده از داده های پیشروی آب در طول مزرعه، متوسط زمان پیشروی را برای همه ایستگاه های اندازه گیری محاسبه کردند. سپس ایستگاهی که مدت زمان پیشروی آن، برابر با نصف متوسط زمان پیشروی ایستگاه انتهایی مزرعه بود را به عنوان نقطه میانی در نظر گرفتند. اما در این مطالعه، در ابتدا با استفاده از داده های پیشروی، متوسط فاصله پیشروی آب در طول مزرعه محاسبه می شود، سپس با استفاده از رابطه پیشروی منتج از نقطه جدید و نقطه انتهایی مزرعه، متوسط زمان پیشروی مزرعه محاسبه می گردد. اطلاعات این نقطه جدید، به عنوان نقطه میانی استفاده می شود. روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۱۹۸۲) در استفاده از معادله موازنه حجم برای تعیین ضرایب رابطه نفوذ کاستیاکف - لوئیس به صورت رابطه (۸) است. در این معادله حجم آب ورودی به مزرعه در مرحله پیشروی، برابر است با مجموع حجم آب ذخیره شده سطحی و زیرسطحی (نفوذ یافته).

$$V_x = \sigma_z k t_x^a = \frac{Q t_x}{x} - \sigma_y A_o - \frac{f_o t_x}{r+1} \quad (۸)$$

که در آن Q دبی جریان ورودی (m^3/s)؛ A_o سطح مقطع جریان در ابتدای ورودی مزرعه (m^2)؛ x فاصله از ابتدای مزرعه (m)؛ σ_y و σ_z ضرایب میانگین (عوامل شکل) و t_x زمان پیشروی (min) است.

سپس با استفاده از رابطه (۸) و اطلاعات دو نقطه وسط و انتهایی مزرعه $\left[(L, t_L) \right]$ و $\left[(L/2, t_{L/2}) \right]$ ، دو پارامتر رابطه

نفوذ کوستیاکوف - لوئیس به صورت زیر بدست می آید:

$$a = \frac{\log\left(\frac{V_L}{\frac{V_L}{2}}\right)}{\log\left(\frac{t_L}{\frac{t_L}{2}}\right)} \quad \& \quad k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \quad (9)$$

که در آن مقدار σ_y برابر ۰/۷۷ و مقدار σ_z با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma_z = \int_0^L k t_x^a dx = r\beta(r, a+1) \cong \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad (10)$$

در روش پیشنهادی در این مطالعه، باتوجه به مکان غیرثابت برای نقطه میانی، از اطلاعات نقطه انتهایی مزرعه و نقطه میانی تعیین شده $\left[(\bar{x}, t_x) \right] \& \left[(L, t_L) \right]$ برای تعیین ضرایب رابطه پیشروی و همچنین ضرایب رابطه نفوذ کاستیاکف - لوئیس استفاده می‌شود؛ بنابراین رابطه (۹) به صورت معادله (۱۱) تبدیل می‌شود:

$$a = \frac{\log\left(\frac{V_L}{\bar{V}_x}\right)}{\log\left(\frac{t_L}{t_x}\right)} \quad \& \quad k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \quad (11)$$

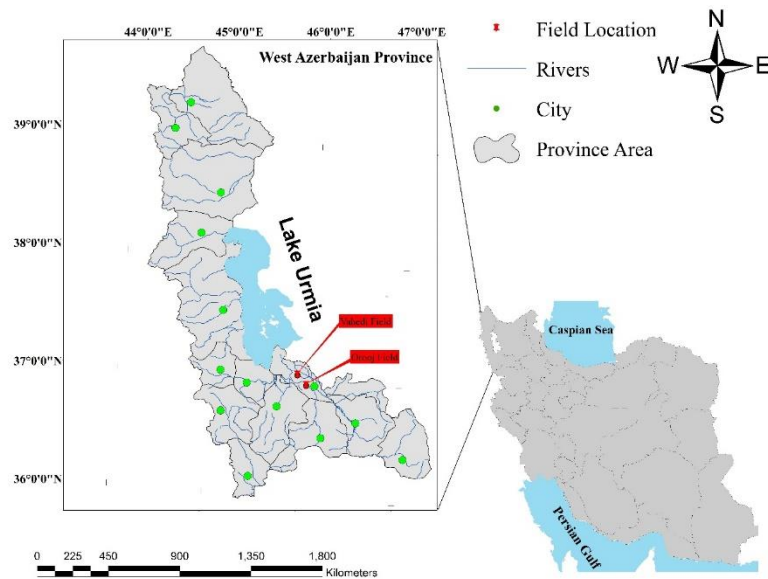
روش پژوهش

۱. داده‌های مزرعه‌ای پژوهش

دو مزرعه آبیاری نواری انتها بسته، با نام‌های واحدی و اروج از شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود واقع در غرب ایران (شکل (۱)) ارزیابی شد. بافت خاک مزارع لوم شنی و محصول آنها گیاه یونجه بود. در مزرعه واحدی، دو نوار و در هر نوار ۲ رخداد آبیاری و در مزرعه اروج یک نوار در ۳ آبیاری در شهر یورماه ارزیابی شد. طول نوارها به فواصل ۱۰ متری ایستگاه‌گذاری شد و با استفاده از فلوم WSC^۱ نوع ۳، دبی ورودی به نوارها اندازه‌گیری گردید. مشخصات هندسی نوارهای آزمایشی مزارع مورد مطالعه در جدول (۱) ذکر شده است.

جدول ۱. مشخصات هندسی نوارهای آزمایشی مزارع مورد مطالعه در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه‌رود

نام مزرعه	شماره نوار	طول نوار (متر)	عرض نوار (متر)	شیب طولی (درصد)	تعداد رویداد آبیاری ارزیابی شده	شرایط پایین دست نوار
واحدی	۱	۱۰۹	۳	۰/۲۷	۲	انتها بسته
	۲	۱۰۷/۵	۳	۰/۲۶	۲	
اروج	۱	۱۲۶	۷/۲۵	۰/۴۷	۳	



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزارع مورد مطالعه در شبکه آبیاری و زهکشی زرینه رود

۲. شاخص های ارزیابی

میانگین قدر مطلق خطای نسبی^۱ زمان پیشروی (MARE)

برای بررسی دقت روش پیشنهادی در تخمین زمان پیشروی ایستگاهها در هر رخداد آبیاری و مقایسه آن با نتایج روابط پیشروی حاصل از روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، از شاخص میانگین قدر مطلق خطای نسبی استفاده شد. که با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

$$MARE(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{t_{i,O} - t_{i,P}}{t_{i,O}} \right| \quad (12)$$

که در آن $t_{i,O}$ زمان پیشروی مزرعه ای واقعی و $t_{i,P}$ زمان پیشروی حاصل از روش پیشنهادی یا روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) است.

ریشه مجموع مربعات خطا^۲ (RSSE)

الیوت و واکر (۱۹۸۲) برای ارزیابی رابطه پیشروی خود از شاخص ریشه مجموع مربعات خطا استفاده کردند. این شاخص مجموع اختلاف زمان پیشروی واقعی و تخمین زده شده را در تمام ایستگاه های اندازه گیری به صورت مطلق نشان میدهد. شاخص مذکور با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می شود.

$$RSSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{i,P} - t_{i,O})^2} \quad (13)$$

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده^۳ (nRMSE)

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) یک شاخص آماری است که برای اندازه گیری دقت پیش بینی های یک مدل با مقایسه مقادیر پیش بینی شده با مقادیر مشاهده شده یا واقعی، استفاده می شود. این شاخص، یک نسخه نرمال شده از

1. Mean Absolute Relative Error
2. Root Sum Square Error
3. Normalized Root Mean Squared Error

شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است که امکان تفسیر آسان تر را فراهم می کند. این شاخص با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه می شود.

$$nRMSE = \frac{RMSE}{t_{o-max} - t_{o-min}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_{i,O} - t_{i,P})^2}} \quad (14)$$

که در آن t_{o-max} و t_{o-min} به ترتیب بیشینه و کمینه زمان پیشروی مزرعه ای هستند.

در شاخص nRMSE می توان برای نرمال سازی از میانگین یا انحراف استاندارد مقادیر مشاهده شده نیز استفاده کرد، اما نرمال سازی با استفاده از اختلاف بیشینه و کمینه داده های مشاهداتی رایج تر است و این رابطه برای مجموعه داده های مختلف سازگارتر است.

مقدار این شاخص از صفر تا بی نهایت متغیر است. مقدار صفر به این معنی است که مقادیر پیش بینی شده دقیقاً با مقادیر مشاهده شده مطابقت دارند و در نتیجه هیچ خطایی وجود ندارد. مقادیر بیشتر nRMSE بیانگر عملکرد نامناسب مدل و با خطای بالاتر بین مقادیر پیش بینی شده و مشاهده شده است. در حالت کلی مقادیر $nRMSE \leq 0.1$ ، $0.1 < nRMSE \leq 0.2$ ، $0.2 < nRMSE \leq 0.3$ و $nRMSE > 0.3$ به ترتیب بیانگر عالی، خوب، متوسط و ضعیف بودن انطباق داده های پیش بینی شده و مشاهده شده است (موریاسی و همکاران^۱، ۲۰۰۷).

قدرمطلق خطای نسبی^۲ عمق آب نفوذی (ARE)

یکی از پارامترهای مهم در طراحی و ارزیابی سامانه های آبیاری سطحی، معادله نفوذ تجمعی است که ضرایب آن، با استفاده از اطلاعات دبی ورودی و جبهه پیشروی جریان و مدل موازنه حجم، استخراج می شود. در پژوهش حاضر، با استفاده از روابط پیشروی محاسبه شده، ضرایب معادله نفوذ تجمعی کاستیاکف- لوئیس محاسبه شد و سپس میزان قدرمطلق خطای نسبی عمق آب نفوذی معادلات مذکور نسبت به عمق آب نفوذی واقعی، با استفاده از رابطه (۱۵) برآورد شد. متوسط عمق آب نفوذی واقعی از تقسیم کل حجم آب نفوذی بر مساحت نوار به دست می آید.

$$Error(\%) = 100 \left| \frac{i_{Exp} - i_{Calc}}{i_{Exp}} \right| \quad (15)$$

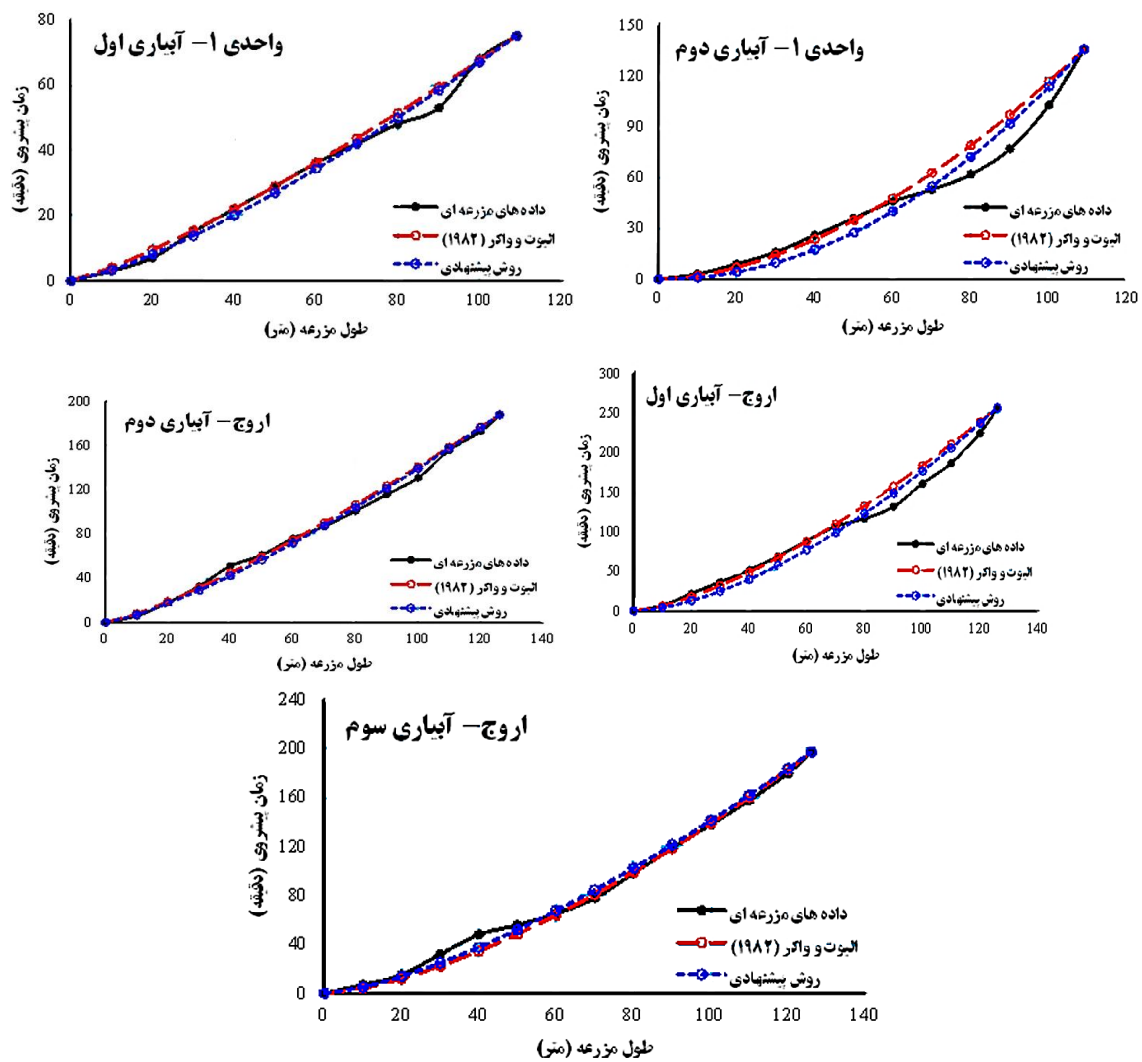
که در آن i_{Exp} و i_{Calc} به ترتیب عمق آب نفوذ تجمعی واقعی و محاسباتی است.

یافته های پژوهش

با استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه و همچنین روش دو نقطه ای الیوت و واکر (۱۹۸۲)، مقادیر ضرایب رابطه پیشروی آب در طول مزرعه محاسبه شد (جدول (۲)). همچنین شاخص میانگین قدرمطلق خطای نسبی روابط مذکور در برآورد مدت زمان پیشروی آب ایستگاه ها نیز در جدول (۲) ذکر گردیده است. در شکل (۲)، منحنی های واقعی پیشروی و محاسباتی حاصل از روابط مذکور نشان داده شده اند.

جدول ۲. مقادیر ضرایب معادله پیشروی (p, r) محاسبه شده با استفاده از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی و میانگین قدرمطلق خطای نسبی روابط پیشروی محاسبه شده در پیش‌بینی پیشروی آب در طول نوارها

نام مزرعه	شماره نوار	شماره آبیاری	فاصله نقطه میانی		پارامتر r		پارامتر p		میانگین قدرمطلق خطای نسبی روابط پیشروی (درصد)
			L/2	روش پیشنهادی	الیوت و واکر (۱۹۸۲)	روش پیشنهادی	الیوت و واکر (۱۹۸۲)		
واحدی	۱	۱	۵۴/۵	۶۱/۹	۰/۸۲	۰/۷۶	۳/۱۸	۴/۰۷	۸/۹
		۲	۵۴/۵	۷۳/۲	۰/۵۷	۰/۴۹	۶/۵۶	۹/۸۵	۱۵/۱
	۲	۱	۵۳/۸	۵۹/۵	۰/۸۸	۰/۸۱	۲/۴۰	۳/۲۴	۸/۶
		۲	۵۳/۸	۶۵/۰	۰/۶۴	۰/۶۵	۷/۱۴	۶/۸۲	۱۴/۰
اروج	۱	۱	۶۳/۰	۷۷/۹	۰/۶۹	۰/۶۲	۲/۷۱	۴/۰۸	۸/۹
		۲	۶۳/۰	۷۱/۲	۰/۸۰	۰/۷۷	۱/۸۸	۲/۲۳	۶/۷
		۳	۶۳/۰	۷۴/۴	۰/۶۶	۰/۶۹	۳/۸۶	۳/۲۲	۱۰/۸



شکل ۲. منحنی‌های پیشروی آب در داخل مزارع مورد مطالعه، حاصل از داده‌های مزرعه‌ای، روش دو نقطه‌ای و روش پیشنهادی

باتوجه به جدول (۲)، در هر کدام از نوارهای آزمایشی و یا آبیاری‌های متفاوت، موقعیت نقطه میانی در روش پیشنهادی متفاوت است. چنانکه با تغییر دبی جریان ورودی، رطوبت خاک، ضریب زبری، پوشش گیاهی و یا سایر پارامترهای هیدرولیکی و یا هندسی مزرعه، تغییراتی در جبهه پیشروی جریان ایجاد شود، موقعیت نقطه میانی تغییر می‌نماید. با تغییر موقعیت این نقطه، ضرایب معادله پیشروی نیز متفاوت خواهد بود. در روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)، در هر نوار آبیاری، موقعیت نقطه میانی همان وسط مزرعه می‌باشد. بر اساس شاخص میانگین قدرمطلق خطای نسبی، روابط پیشروی حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) در برخی موارد بهتر از روابط پیشروی حاصل از روش پیشنهادی است و در سایر موارد روابط پیشروی حاصل از روش پیشنهادی دارای خطای کمتری هستند.

باتوجه به شکل (۲)، مشاهده می‌شود که در بیشتر رخدادهای آبیاری، منحنی‌های پیشروی هر دو روش محاسباتی، خیلی به یکدیگر نزدیک هستند و بر منحنی پیشروی واقعی هم منطبق می‌باشند. به عبارتی هر دو رابطه در تخمین مدت زمان‌های پیشروی آب در تمام طول نوار، از عملکرد قابل قبولی برخوردار هستند. در آبیاری دوم مزرعه واحدی ۱ و ۲ و همچنین آبیاری اول مزرعه اروج که روند پیشروی آب در نیمه ابتدایی مزرعه و نیمه انتهایی آن، یکسان نیست، منحنی‌های پیشروی محاسباتی بیشترین فاصله را با منحنی پیشروی واقعی دارند. رابطه پیشروی حاصل از روش پیشنهادی به صورت نمایی حد فاصل این دو قسمت از مزرعه را نمایش می‌دهد. سه رخداد آبیاری مذکور، بیشترین میانگین قدرمطلق خطای نسبی را در پیش‌بینی پیشروی آب در طول نوارها دارند.

شاخص قدرمطلق خطای نسبی برای ایستگاه‌های ابتدایی مزرعه که از مدت‌زمان پیشروی کوچکی برخوردار هستند، میزان خطا را به صورت درصد بالایی نشان می‌دهد، حتی اگر زمان پیشروی تخمین زده شده اختلاف ناچیزی با زمان پیشروی واقعی داشته باشد. به عنوان مثال چنانچه زمان پیشروی یک ایستگاه ۶ دقیقه و زمان پیشروی تخمین زده شده ۳/۵ دقیقه باشد، میزان قدرمطلق خطای نسبی تخمین، ۴۲ درصد خواهد شد. در حالی که میزان اختلاف زمان‌های پیشروی واقعی و محاسباتی، ۲/۵ دقیقه است؛ بنابراین این شاخص به دلیل نشان دادن میزان اختلافات به صورت نسبی، معیار مناسبی جهت مقایسه روابط پیشروی نمی‌باشد (پناهی و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج ارزیابی روابط پیشروی الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی بر اساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج ارزیابی میزان دقت روابط پیشروی الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی بر اساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده

نام مزرعه	شماره نوار	شماره آبیاری	RSSE (min)		nRMSE	
			روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)	روش پیشنهادی	روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)	روش پیشنهادی
واحدی	۱	۱	۷/۹	۶/۸	۰/۰۳۰	۰/۰۲۶
		۲	۳۱/۹	۲۶/۴	۰/۰۶۸	۰/۰۵۶
	۲	۱	۶/۶	۴/۹	۰/۰۲۵	۰/۰۱۸
		۲	۷/۶	۷/۶	۰/۰۳۲	۰/۰۳۲
اروج	۱	۱	۴۸/۳	۴۲/۴	۰/۰۵۰	۰/۰۴۴
		۲	۱۶/۵	۱۵/۸	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳
		۳	۱۹/۲	۱۷/۰	۰/۰۲۶	۰/۰۲۳

باتوجه به جدول (۳)، ملاحظه می‌شود که براساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا، دقت معادله پیشروی روش پیشنهادی در تمامی آبیاری‌ها، بیشتر از معادله پیشروی الیوت و واکر (۱۹۸۲) می‌باشد. متوسط مقدار شاخص RSSE برای معادله پیشروی روش پیشنهادی ۱۷/۳ دقیقه و روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)، ۱۹/۷ دقیقه می‌باشد. به عبارتی میزان خطای مذکور، بیانگر مجموع خطای مطلق روابط مذکور در تخمین مدت‌زمان پیشروی آب برای تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری مزارع مورد مطالعه است. بر

اساس شاخص $nRMSE$ ، در همه آبیاری‌ها هر دو روش دارای بالاترین دقت هستند و هر دو روش به صورت کیفی داده‌های پیشروی را با درجه عالی تخمین می‌زنند.

در شاخص $RSSE$ ، اختلاف زمان‌های پیشروی واقعی و محاسباتی نقاط مختلف مزرعه از اهمیت یکسانی برخوردار است و به عبارتی برای نقاط مختلف مزرعه، وزن یکسانی لحاظ می‌شود (سیدزاده و همکاران، ۲۰۲۰). در حالیکه اختلاف زمان‌های پیشروی واقعی و محاسباتی در نقاط مختلف مزرعه از اهمیت یکسانی برخوردار نیست. به عنوان مثال، در ابتدای مزرعه به دلیل برقراری جریان از شروع آبیاری، سرعت نفوذ نزدیک به سرعت نفوذ نهایی خاک می‌باشد و اختلاف ۵ دقیقه در زمان پیشروی خطای زیادی را در تخمین عمق نفوذ ایجاد نخواهد کرد در حالیکه در انتهای مزرعه چون در زمانهای ابتدایی نفوذ قرار دارد، و سرعت نفوذ بالا است، این میزان اختلاف خطای بیشتری را در تخمین عمق نفوذ ایجاد خواهد کرد (پناهی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین با توجه به اهمیت استفاده از رابطه پیشروی در تعیین ضرایب رابطه نفوذ و اهمیت دقت معادله نفوذ در طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری سطحی، شاخص‌های $RSSE$ و $nRMSE$ ، شاخص‌های کافی برای ارزیابی روابط پیشروی نیست و لازم است برای ارزیابی روابط پیشروی حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی، از شاخص قدرمطلق خطای نسبی عمق آب نفوذی هم استفاده کرد؛ بنابراین با استفاده از اطلاعات نقطه میانی روش پیشنهادی و روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)، ضرایب معادله نفوذ تجمعی کاستیاکف - لوئیس محاسبه شد که نتایج آن در جدول (۴) ذکر شده است.

جدول ۴. ضرایب معادله نفوذ تجمعی کاستیاکف - لوئیس حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی

$f_0 \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}} \right)$	روش پیشنهادی		روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)		شماره آبیاری	شماره نوار	نام مزرعه
	$k \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}^a} \right)$	$a(-)$	$k \left(\frac{\text{mm}}{\text{hr}^a} \right)$	$a(-)$			
۱۳/۹۸	۲۲۲/۳۱	-۰/۳۰۸	۲۱۶/۵۸	-۰/۲۲۶	۱	۱	واحد ی
	۱۳۲/۶۵	-۰/۶۱۳	۱۴۴/۳۱	-۰/۵۱۴	۲		
۱۳/۹۸	۲۴۴/۵۷	-۰/۲۳۹	۲۳۵/۰۸	-۰/۱۴۲	۱	۲	ی
	۱۶۸/۳۴	-۰/۴۸۰	۱۶۹/۸۱	-۰/۵۱۷	۲		
۹/۲۴	۱۱۹/۴۵	-۰/۳۸۶	۱۳۲/۲۷	-۰/۳۰۰	۱	۱	اروج
	۸۱/۵۱	-۰/۱۸۶	۸۳/۳۲	-۰/۱۴۸	۲		
	۱۰۰/۷۳	-۰/۳۰۳	۹۶/۱۴	-۰/۳۶۱	۳		

با استفاده از روابط نفوذ به دست آمده متوسط عمق نفوذ محاسباتی برای هر کدام از آبیاری‌ها محاسبه شد و میزان قدرمطلق خطای نسبی آنها نسبت به عمق نفوذ واقعی محاسبه گردید. در جدول (۵) میزان قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ روش‌های مختلف در برآورد متوسط عمق آب نفوذی در مزرعه برای هر کدام از آبیاری‌ها ذکر شده است.

جدول ۵. میزان قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ تجمعی کاستیاکف - لوئیس حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی در تخمین متوسط عمق آب نفوذی در مزرعه

قدرمطلق خطای نسبی عمق نفوذ (درصد)		شماره آبیاری	شماره نوار	نام مزرعه	
روش پیشنهادی	روش الیوت و واکر (۱۹۸۲)				
۰/۵	۶/۲	۱	۱	واحدی	
۶/۵	۶/۷	۲			
۴/۱	۵/۷	۱	۲		
۲/۷	۱/۲	۲			
۲/۳	۲/۰	۱	۱		اروج
۵/۳	۶/۴	۲			
۰/۳	۱/۷	۳			

جدول (۵) نشان می‌دهد که در غالب آبیاری‌ها، میزان دقت معادلات نفوذ به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی بالاتر از روش الیوت واکر (۱۹۸۲) است. هر دو روش دارای دامنه خطای کمتر از ۱۰ درصد می‌باشند، به عبارت دیگر هر دو روش دارای دقت قابل قبول هستند. متوسط قدرمطلق خطای نسبی معادلات نفوذ حاصل از روش الیوت و واکر (۱۹۸۲) و روش پیشنهادی به ترتیب ۴/۳ و ۳/۱ درصد است.

بحث

این مطالعه روش جدیدی را برای تعیین نقطه میانی بهینه در روش دو نقطه‌ای برای تخمین ضرایب معادله نفوذ کاستیاکوف - لوئیس ارائه می‌کند. روش سنتی نقطه میانی ثابت که اغلب در مطالعات و طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی استفاده می‌شود، می‌تواند در برخی موارد منجر به عدم دقت و در مزارع با تغییرات نفوذپذیری زیاد، منجر به شکست می‌شود. با معرفی یک مکان میانی پویا بر اساس متوسط فاصله پیشروی، روش پیشنهادی بازتاب دقیق‌تری از پدیده نفوذ خاک مزرعه ارائه می‌کند.

نتیجه‌گیری

تحلیل داده‌های آبیاری دو مزرعه آبیاری نواری نشان داد که بر اساس شاخص ریشه مجموع مربعات خطا، منحنی‌های پیشروی محاسباتی روش پیشنهادی به طور مداوم مطابقت بیشتری با داده‌های مزرعه‌ای دارد؛ بنابراین، روش نقطه میانی پویای پیشنهادی، بهبود قابل توجهی در دقت و قابلیت اطمینان تخمین ضرایب رابطه نفوذ در آبیاری سطحی ارائه می‌کند که به مدیریت بهتر آبیاری و کارایی مصرف آب کمک می‌کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Benami, A., & Ofen, A. (1984). Irrigation engineering: sprinkler, trickle, surface irrigation; principles, design and agricultural practices. *Agricultural Water Management*, 9(3), 263-264 <https://www.sidalc.net/search/Search2Record/unfao:614476>
- Christiansen, J. E., Bishop, A. A., Kiefer, F. W., & Fok, Y. (1966). Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. *Trans. ASAE*, 9(5), 671-674. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=40068>
- Elliott, R. L., & Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASCE*, 25(2), 396-400. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33542>
- Elliott, R. L., Walker, W. R., & Skogerboe, G. V. (1983). Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. *Trans. ASAE*, 26(6), 1726-1731. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=33833>
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Horton RE. (1939). Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration capacity. *Transactions, American Geophysical Union*, 20, 693-711. <https://doi.org/10.1029/TR020i004p00693>
- Karmeli, D., Salazar, L., & Walker, W.R. (1978). Assessing the spatial variability of irrigation water applications. *Environmental Protection Technology Series EPA (USA) Publication*, United states, North America. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=2000I5UX.TXT>
- Key, M. (1990). Recent developments for improving water management in surface irrigation and overhead irrigation. *Agri. Water Manage.* 17, 7-23. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(90\)90052-Z](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90052-Z)
- Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions of the sixth committee International Society of Soil Science; Russian, Part A*, 17-21. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1570572699970385664?lang=en>
- Lewis, M. R. (1937). The rate of infiltration of water in irrigation-practice. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 18(2), 361-368. <https://doi.org/10.1029/TR018i002p00361>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Oyonarte, N., Mateos, L., & Palomo, M. (2002). Infiltration variability in furrow irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 128, 26-33. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2002\)128:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:1(26))
- Panahi, A., Seyedzadeh, A., & Maroufpoor, E. (2021). Investigating the midpoint of a two-point method for predicting advance and infiltration in surface irrigation. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1095-1106. <https://doi.org/10.1002/ird.2618>
- Panahi, A., Seyedzadeh, A., Bahrami, M., & Maroufpoor, E. (2023). Determining Kostiakov-Lewis infiltration coefficients using the water advance relationship and optimization. *Irrigation and Drainage*, 72(4), 1026-1037. <https://doi.org/10.1002/ird.2848>
- Philip, J. R. (1957). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil science*, 84(3), 257-264. https://journals.lww.com/soilsci/citation/1957/09000/THE_THEORY_OF_INFILTRATION__4__SORPTIVITY_AND.10.aspx

- Seyedzadeh, A., Khazaee, P., Siosemardeh, A., & Maroufpoor, E. (2022). Irrigation management evaluation of multiple irrigation methods using performance indicators. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(3), 303-312. <https://doi.org/10.1080/09715010.2021.1891470>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., & Maroufpoor, E. (2020a). A new analytical method for derivation of infiltration parameters. *Irrigation Science*, 38, 449-460. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00686-z>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E., & Singh, V. P. (2019). Development of an analytical method for estimating Manning's coefficient of roughness for border irrigation. *Irrigation Science*, 37, 523-531. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00631-9>
- Seyedzadeh, A., Panahi, A., Maroufpoor, E., Singh, V. P., & Maheshwari, B. (2020b). Developing a novel method for estimating parameters of Kostikov-Lewis infiltration equation. *Irrigation Science*, 38, 189-198. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00660-4>
- Shepard, J., Wallender, W., & Hopmans, J. (1993). One-point method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*, 36, 395-404. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=28351>
- Smith, R.E. (1972). The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. *J. Hydrol*, 17, 1-21. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(72\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90063-7)
- USDA, Soil Conservation Service (SCS). (1974). National engineering handbook, section 15 Irrigation, Chapter 4. Border Irrigation. *United States Department of Agriculture publications*, Washington, DC, USA. https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part623_Irrigation/neh15-04.pdf
- Valiantzas, J., Aggelides, S., & Salsalou, A. (2001). Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*, 52, 17-32. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00128-7)
- Walker, W.R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131, 129-136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(129))
- Walker, W.R., & Skogerboe, G.V. (1987). Surface irrigation. Theory and practice. Prentice-Hall publications, America. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19872432240>
- Zerihun, D., Feyen, J., & Reddy, J.M. (1996). Sensitivity analysis of furrow-irrigation performance parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122, 49-57. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:1(49))



Improving the performance of neural network based on group behavior with data (GMDH) using Harmonic Search Optimization (HSA) algorithm for simulating monthly river flow

Maryam Akbarichegeni¹ , Mohammad Ali Izadbakhsh^{2✉} , Saeid Shabanlou³ ,
Fariborz Yosefvand⁴ , Behrouz Yaghoubi⁵ , and Ahmad Rajabi⁶ 

1. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: ma.akbari817@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: izadbakhsh.mohammad.ali@gmail.com
3. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: saeid.shabanlou@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: fariborzosefvand@gmail.com
5. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: byaghubi@gmail.com
6. Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: ahmad.rajabi1974@gmail.com

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received 05 October 2024

Received in revised form 10 January 2025

Accepted 01 February 2025

Available online 25 March 2025

Keywords:

GMDH,
neural network,
harmony search optimization
algorithm,
monthly river flow,
machine learning.

Objective: The aim of this study is to create a neural network model based on collective data encounter (GMDH) and improve it using Harmony Search Optimization (HSA) algorithm for simulating monthly river flow (HSA-GMDH).

Method: For this purpose, the rainfall and flow data of Gamasiab river of Kermanshah were used during a 20-year period (1370-1390). To develop the GMDH model, 80% of the data were used to train the model and other data were used to evaluate it. Also, the best input variables to the model were determined by trial and error method, based on this method, 3 datasets were formed (D1, D2, D3), then the performance of GMDH and HSA-GMDH models was evaluated with each of these datasets.

Results: The HSA-GMDH(D1) model performs better in the training and testing phase than the GMDH(D1) model. The HSA-GMDH(D2) model also performs better than the GMDH(D2) model. The HSA-GMDH(D3) model also performs better than the GMDH(D3) model. It is better to use an optimization algorithm such as HSA instead of the trial and error method to simulate the monthly flow of the river using the GMDH model.

Conclusions: Based on the results of this study, the HSA-GMDH model performs much better than the GMDH model, so it can be used as a powerful tool for simulating monthly river flow.

Cite this article: Akbarichegeni, M., Izadbakhsh, M. A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., & Rajabi, E. (2025). Improving the performance of neural network based on group behavior with data (GMDH) using Harmonic Search Optimization (HSA) algorithm for simulating monthly river flow. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (1), 64-77. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11456.1146>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11456.1146>

Publisher: Razi University.

Introduction

One of the most important issues in the water resources management process is river flow modeling, because based on it, decisions can be made about important issues such as floods and droughts. One of the newest and best methods for modeling a variety of parameters in water resource management such as river flow are machine learning models. The aim of this study is to create a neural network model based on collective data encounter (GMDH) and improve it using Harmony Search Optimization (HSA) algorithm for simulating monthly river flow (HSA-GMDH).

Method

Area of study

The Gamasyab watershed is located in the west of the country and in the northern and central regions of the Zagros mountain range in the geographical range of 13 degrees 1 minutes to 13 degrees 3 minutes east longitude and 99 degrees 13 minutes to 91 degrees 13 minutes north latitude with an area of one million seventy three thousand hectares (Bazarafshan et al. 2013). This basin is limited from the north to the basin of Sirvan, Sefirod and Qara Chai Rivers, from the west to a part of the Karkheh watershed, and from the south to a part of the Dez river basin and a part of the Karkheh watershed. It is also limited to the Dez river basin from the evil side. The minimum height of this basin is 5539 meters above sea level and the maximum is 9699 meters. The rivers of the basin include the main tributary named Gamasyab, which originates from the northern and eastern parts of the basin through many sub-tributaries and joins the other tributaries of the Karkhe Dam basin at the end of the Kangavar Plain (Deh Kohneh et al., 2018).

GMDH neural network

GMDH is a method first developed by Ivakhenko as a multivariate analysis method for identifying and modeling complex systems. This model can be used without initial information to simulate complex systems. In fact, GMDH is a method to identify nonlinear systems with many input variables, which can be developed as a multilayer neural network. The parameters of this network are trained based on the least squares estimation approach.

Harmony Search Optimization Algorithm (HSA)

HSA is a kind of meta-innovative algorithm that was introduced in 2007 by Mahdavi et al., inspired by the behavior of musicians when playing a piece of music. Harmony means harmony, sound, and harmonious combination of sounds that are heard simultaneously and at the same time. Musicians use different musical instruments to produce a new music, and the beauty of music is the harmony between the notes of different instruments (Yang, 2009). In making music, the goal is to find the best harmony and produce the most beautiful music possible. Musicians try to choose better notes every performance so that the music evolves and becomes more beautiful every time (Mahdavi et al., 2007). Musicians remember the pieces played to compare the new piece with the previous pieces each time. From the simulation of the process that a musician goes through to harmonize a piece of music, an algorithm was extracted which we know as harmony search. This algorithm is inspired by music to reach the best answer. In the harmony algorithm, each data is a note and each answer vector is a harmony. The maximum number of layers and the maximum number of neurons in each layer of GMDH model are determined by trial and error method. Also, different parameters of HSA algorithm were determined by trial and error method. For this purpose, the rainfall and flow data of Gamasiab river of Kermanshah were used during a 20-year period (1370-1390). To develop the GMDH model, 80% of the data were used to train the model and

other data were used to evaluate it. Also, the best input variables to the model were determined by trial and error method, based on this method, 3 datasets were formed (D1, D2, D3), then the performance of GMDH and HSA-GMDH models was evaluated with each of these datasets.

Results

After developing the HSA-GMDH model, its results were compared with the GMDH model whose parameters were determined using the trial and error method. Based on the results, the HSA-GMDH(D1) model performs better in the training and testing phase than the GMDH(D1) model, so that the HSA-GMDH(D1) model has a lower RMSE value than the GMDH(D1) model, as well as the NSE and R^2 values. The HSA-GMDH(D2) model also performs better than the GMDH(D2) model and has a lower RMSE, NSE and R^2 value than the GMDH(D2) model. Like the developed models of D1 and D2 data, the HSA-GMDH(D3) model also performs better than the GMDH(D3) model, so that its RMSE value is lower than the GMDH(D3) model, and the NSE value and Its R^2 is higher than GMDH(D3) model. Therefore, based on the results of this study, it is better to use an optimization algorithm such as HSA instead of the trial and error method to simulate the monthly flow of the river using the GMDH model.

Conclusions

Finally, the performance of GMDH and HSA-GMDH models were compared. Based on the results of this study, the HSA-GMDH model performs much better than the GMDH model, so it can be used as a powerful tool for simulating monthly river flow.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement.

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



بهینه‌سازی جریان ماهانه رودخانه گاماسیاب کرمانشاه با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر رفتار گروهی با داده‌ها (GMDH) بهبودیافته با الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی (HSA)

مریم اکبری چگنی^۱، محمدعلی ایزدبخش^۲، سعید شعبانلو^۳، فریبرز یوسفوند^۴، بهروز یعقوبی^۵، و احمد رجیبی^۶

۱. گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: ma.akbari817@gmail.com

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

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

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

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

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

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: این پژوهش باهدف توسعه و بهبود مدل شبکه عصبی مبتنی بر برخورد جمعی با داده‌ها (GMDH) برای شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه انجام شد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

روش پژوهش: برای این منظور، الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی (HSA) به‌منظور ارتقای عملکرد مدل GMDH استفاده شد و مدل ترکیبی HSA-GMDH ارائه گردید. پارامترهایی نظیر حداکثر تعداد لایه‌ها و حداکثر تعداد نرون‌ها در هر لایه از طریق روش آزمون‌وخطا تعیین شدند. همچنین، پارامترهای مختلف الگوریتم HSA نیز با رویکرد آزمون‌وخطا تنظیم شدند. در این مطالعه، داده‌های بارش و جریان رودخانه گاماسیاب در استان کرمانشاه طی یک بازه زمانی ۲۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۰) به کار گرفته شد. برای توسعه مدل GMDH، از ۸۰ درصد داده‌ها جهت آموزش مدل و از ۲۰ درصد باقی‌مانده برای ارزیابی آن استفاده گردید. علاوه بر این، بهترین متغیرهای ورودی به مدل با روش آزمون‌وخطا شناسایی شدند و براین‌اساس، سه مجموعه داده (D1، D2 و D3) تشکیل شد. سپس عملکرد مدل‌های GMDH و HSA-GMDH با استفاده از هر یک از این مجموعه داده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و درنهایت، مقایسه‌ای میان عملکرد این دو مدل صورت پذیرفت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

کلیدواژه‌ها:

شبکه عصبی GMDH، الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی، جریان ماهانه رودخانه، یادگیری ماشین.

یافته‌ها: بر اساس نتایج حاصل مدل GMDH با دیتاست D1 بهترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست دارد و با دیتاست D2 بدترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست دارد همچنین این مدل با دیتاست D3 نسبت به مدل D1 عملکرد ضعیف‌تری دارد؛ اما نسبت به دیتاست D2 عملکرد بهتری دارد. بر اساس نتایج حاصل هر سه مدل GMDH توسعه‌یافته با HSA نسبت به مدل‌های GMDH توسعه‌یافته با روش سعی و خطا کارایی بهتری دارند. بر اساس نتایج حاصل مدل HSA-GMDH(D1) نسبت به مدل GMDH(D1) عملکرد بهتری در مرحله آموزش و تست دارد. مدل HSA-GMDH(D2) نیز نسبت به مدل GMDH(D2) عملکرد بهتری دارد. مدل HSA-GMDH(D3) نیز نسبت به مدل GMDH(D3) عملکرد بهتری دارد.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که مدل HSA-GMDH عملکرد بهتری نسبت به مدل GMDH دارد؛ بنابراین، مدل پیشنهادی HSA-GMDH به‌عنوان یک ابزار قدرتمند می‌تواند در شبیه‌سازی جریان ماهانه رودخانه مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: اکبری چگنی، مریم؛ ایزدبخش، محمدعلی؛ شعبانلو، سعید؛ یوسفوند، فریبرز؛ یعقوبی، بهروز؛ و رجیبی، احمد. (۱۴۰۴). بهینه‌سازی جریان ماهانه رودخانه گاماسیاب کرمانشاه با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر رفتار گروهی با داده‌ها (GMDH) بهبودیافته با الگوریتم بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی (HSA). *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۵ (۱)، ۶۴-۷۷.

<https://doi.org/10.22126/ATWE.2025.11456.1146>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت منابع آب، محدودیت‌های فنی و مالی در نصب تجهیزات و ایستگاه‌های هیدرومتری در تمام بخش‌های رودخانه‌ها است. این تجهیزات که برای اندازه‌گیری دقیق پارامترهایی همچون دبی، سرعت جریان و سایر مشخصه‌های هیدرولوژیکی به کار می‌روند، نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجه، نگهداری مستمر و دسترسی به مناطق صعب‌العبور هستند. علاوه بر این، در برخی مناطق به دلیل شرایط جغرافیایی دشوار، دسترسی به این نقاط و نصب تجهیزات هیدرومتری تقریباً غیرممکن می‌شود. این محدودیت‌ها موجب شده است که تخمین دقیق دبی در کل حوزه آبریز به یک مسئله اساسی تبدیل شود. تخمین دقیق دبی حوضه آبریز نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. این اطلاعات برای پیش‌بینی سیلاب‌ها، برنامه‌ریزی آبیاری کشاورزی، تخصیص منابع آب برای مصارف شرب و صنعتی و همچنین مدیریت خشک‌سالی ضروری هستند. در نبود داده‌های دقیق و گسترده از سراسر رودخانه، تخمین‌های مبتنی بر مدل‌سازی می‌توانند جایگزین ارزشمندی برای جمع‌آوری داده‌های مستقیم و گسترده از سراسر رودخانه، هیدرومتری باشند. با این حال، مدل‌های سنتی اغلب نمی‌توانند پیچیدگی‌ها و تغییرات غیرخطی سیستم‌های هیدرولوژیکی را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کنند. در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری و افزایش دسترسی به داده‌های بزرگ (Big Data)، استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی برای مدل‌سازی جریان رودخانه و تخمین دبی حوضه آبریز به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این روش‌ها با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، قادر به تجزیه و تحلیل حجم زیادی از داده‌ها و استخراج الگوهای پیچیده و غیرخطی هستند که در روش‌های سنتی کمتر قابل دستیابی بودند. مدل‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم‌های استنتاج فازی و الگوریتم‌های یادگیری عمیق توانسته‌اند نتایج بسیار دقیق‌تری در پیش‌بینی جریان رودخانه ارائه دهند (شیانگ و همکاران^۱، ۲۰۲۱). شبکه‌های عصبی مصنوعی یکی از انواع روش‌های هوش مصنوعی هستند که می‌توان از آن‌ها برای اهداف مختلفی از جمله مدل‌سازی پارامترهای مختلف یا، پیش‌بینی مقدار یک متغیر در آینده، خوشه‌بندی متغیرهای مختلف و اهداف فراوان دیگری استفاده کرد (مزرعه و همکاران^۲، ۲۰۲۳).

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

یکی از مهم‌ترین مسائل در مدیریت منابع آب تجزیه و تحلیل جریان رودخانه است (گویامل و لی^۳، ۲۰۲۰)، برای این کار می‌توان از مدل‌های فیزیکی و مدل‌های مبتنی بر داده استفاده کرد، برای توسعه مدل‌های فیزیکی علاوه بر هزینه زیاد، به انواع زیاد تجهیزات و همچنین کاربران خبره نیاز است (مزرعه و همکاران، ۲۰۲۴). به همین دلیل در دهه‌های اخیر بیش‌تر مطالعات در جهت بهبود روش‌های مبتنی بر داده متمرکز شده‌اند. در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

سبزواری و همکاران (۱۴۰۲) کارایی مدل ANN بهبودیافته با الگوریتم کرم شب‌تاب را برای پیش‌بینی مقدار جامدات محلول در آب (TDS) را بری کردند. آن‌ها برای توسعه این مدل از متغیرهای دبی (Q)، سدیم (NA)، منیزیم (Mg)، کلسیم (Ca)، سولفات (SO₄)، کلرید (Cl)، بی‌کربنات (HO₃)، هدایت الکتریکی (EC) و جامدات محلول رودخانه در بازه زمانی قبل (TDS_(t-1)) استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه زمانی که وزن‌های مدل ANN با الگوریتم کرم شب‌تاب تعیین شوند نسبت به زمانی که وزن‌های این مدل به صورت تصادفی تعیین شوند عملکرد بهتری دارد؛ بنابراین برای مدل‌سازی TDS با استفاده از مدل ANN بهتر است از یک الگوریتم فرا ابتکاری مانند الگوریتم کرم شب‌تاب استفاده شود.

1. Xiang et al
2. Mazraeh et al
3. Guiamel & Lee

اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۲) برای اولین بار بارش بلندمدت در شهر بابلسر را مدل سازی کردند. آن‌ها برای این کار از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و روش تبدیل موجک (WT) برای توسعه یک مدل هیبریدی جدید (WT-GEP) استفاده کردند. سپس نتایج حاصل را با نتایج حاصل از مدل GEP مقایسه کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه مدل WT-GEP نسبت به مدل GEP عملکرد بهتری دارد.

۲. مطالعات خارجی

کامبالیمات و دکا^۱ (۲۰۲۱) از ترکیب مدل SVM و تبدیل موجک (WT) برای پیش‌بینی دبی ماهانه رودخانه استفاده کردند. برای این کار از داده‌های جریان ماهانه رودخانه استفاده کردند. در این مطالعه از مقادیر مشاهداتی دبی جریان از یک تا سه ماه قبل برای پیش‌بینی دبی ماه جاری به‌عنوان ورودی مدل‌ها استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در هر دو ایستگاه مدل هیبرید WT-SVM عملکرد بهتری نسبت به مدل SVM دارد.

رضایی و وادیاتی^۲ (۲۰۲۰) عملکرد مدل‌های SVM و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی عصبی - تطبیقی (ANFIS) برای پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه در من کوهستانی نیمه‌خشک شمال غرب چین ارزیابی کردند. برای این مطالعه از داده‌های سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه به‌خوبی می‌توان از این مدل‌ها برای مدل‌سازی جریان رودخانه استفاده کرد، اما بررسی دقیق‌تر نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل SVM نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد.

چن و همکاران^۳ (۲۰۲۰) میانگین دبی جریان روزانه رودخانه‌های بهشت‌آباد (دائمی) و جونگان (غیردائمی) در شمال غرب ایران با چهار مدل شامل الگوریتم بهینه‌سازی بیان ژن (GEP)، WT-ANN، ANN و WT-GEP (WGEP) را برای سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۸ مدل‌سازی کردند. ورودی‌های مدل‌ها شامل دبی رودخانه تأخیر داده‌شده از یک تا سه روز قبل و برای بارش از یک تا سه روز قبل بودند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه مدل GEP نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد. همچنین از میان الگوهای ورودی، الگوهای مبتنی بر دبی جریان و ترکیب دبی جریان و بارش با تفاوت ناچیز به یکدیگر، بهترین الگوها به دست.

صمدیانی فر و همکاران^۴ (۲۰۱۹) برای بهبود دقت مدل‌سازی جریان روزانه رودخانه با استفاده از مدل SVM، برای تعیین پارامترهای این مدل از الگوریتم بهینه‌سازی الگوریتم مگس میوه (FOA) تعیین کردند. سپس نتایج حاصل از مدل FOA-SVM را با نتایج مدل درخت تصمیم (M5) مقایسه کردند. آن‌ها برای ارزیابی نتایج از معیارهای MAE، R، معیار اطلاع بی‌بی-شوارتز (BIC) استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه مدل FOA-SVM نسبت به مدل M5 عملکرد بهتری دارد.

از دیگر تحقیقات در زمینه موضوع این تحقیق می‌توان به تحقیقات عزیززی و همکاران (۲۰۲۳)؛ امیری و همکاران (۲۰۲۱)؛ شعبانلو (۲۰۱۸)؛ اسماعیلی و همکاران (۲۰۲۱)؛ فلاحی و همکاران (۲۰۲۳)؛ پناهی و همکاران (۲۰۲۲)؛ جلیلیان و همکاران (۲۰۲۲)؛ مرادی و همکاران (۲۰۲۳) و امان جلیلی و همکاران (۲۰۲۳) اشاره کرد.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز گاماسیاب در غرب کشور و در مناطق شمالی و مرکزی رشته‌کوه زاگرس در محدوده جغرافیایی ۱۳ درجه ۱ دقیقه تا ۱۳ درجه ۳ دقیقه طول شرقی و ۹۹ درجه ۱۳ دقیقه تا ۹۱ درجه ۱۳ دقیقه عرض شمالی با مساحت یک میلیون و

1. Kambalimath & Deka
2. Rezaei & Vadiati
3. Chen et al
4. Samadianfard et al

هفتادوسه هزار هکتار قرار دارد (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۳). این حوضه از شمال به حوضه رودخانه‌های سیروان، سفیدرود و قره چای، از مغرب به قسمتی از حوزه آبخیز کرخه و از جنوب به قسمتی از حوضه رودخانه دز و قسمتی از حوزه آبخیز کرخه محدود می‌شود. همچنین از سمت شرق به حوضه رودخانه دز محدود می‌گردد. حداقل ارتفاع این حوضه ۵۵۳۹ متر از سطح دریا و حداکثر آن ۹۶۹۹ متر است. رودخانه‌های حوضه شامل سرشاخه اصلی به نام گاماسیاب بوده که از بخش شمالی و شرقی حوضه به وسیله سرشاخه‌های فرعی زیادی سرچشمه گرفته و در انتهای دشت کنگاور به دیگر سرشاخه‌های حوضه سد کرخه می‌پیوندند (ده کهنه و همکاران، ۱۳۹۸).

۲. شبکه عصبی GMDH^۱

GMDH روشی است اولین بار که توسط ایواخنکو^۲ به عنوان یک روش تجزیه و تحلیل چندمتغیره برای شناسایی و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده توسعه داده شد. می‌توان از این مدل بدون داشتن اطلاعات اولیه برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده استفاده کرد (فارلو^۳، ۲۰۲۰). در واقع GMDH روشی برای شناسایی سیستم‌های غیرخطی با متغیرهای ورودی زیاد است که می‌توان آن را به صورت یک شبکه عصبی چندلایه توسعه داد. آموزش پارامترهای این شبکه بر اساس رویکرد تخمین حداقل مربعات انجام می‌شود. این مدل به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی برای برخورد با عدم قطعیت‌ها، سیستم‌های خطی و غیرخطی توسط محققان مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. ارتباط بین متغیرهای ورودی - خروجی در این مدل را می‌توان با سری ولترا که مشابه با چندجمله‌ای گسسته شده کولموگروف - گابور است نشان داد که در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$f(X) = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i X_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ijk} X_i X_j + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n a_{ijk} X_i X_j X_k + \dots \quad (1)$$

در این رابطه $X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m)$ متغیر ورودی و $W(w_1, w_2, w_3, \dots, w_m)$ بردار وزن‌ها است، m نیز تعداد متغیرها ورودی به شبکه عصبی GMDH است. تابع انتقال یا محرک این نرون‌ها می‌تواند به صورت یک چندجمله‌ای خطی یا غیرخطی به صورت زیر بیان شود که در رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$y = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_3 x_1^2 + w_4 x_2^2 + w_5 x_1 x_2 \quad (2)$$

در الگوریتم GMDH برای تولید نرون‌های لایه اول، تمام متغیرهای ورودی باهم ترکیب شده و تمام ترکیبات دوتایی متغیرهای ورودی در نظر گرفته می‌شوند. سپس بخشی از متغیرها به عنوان ورودی به لایه بعد منتقل می‌شوند. از روش‌های مختلفی مانند روش تجزیه مقادیر منفرد (SVD)^۴ می‌توان برای محاسبه ضرایب این رابطه استفاده کرد (فارلو، ۲۰۲۰) اما در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی (HSA)^۵ برای تعیین این ضرایب استفاده شد.

۳. الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی (HSA)^۵

HSA نوعی الگوریتم فرا ابتکاری است که در سال ۲۰۰۷ توسط مهدوی و همکاران^۶ با الهام از رفتار نوازندگان هنگام نواختن یک قطعه موسیقی معرفی شد. هارمونی به معنای هم آهنگی، هم صدایی و ترکیب خوش آهنگ صداهایی که به صورت هم‌زمان و در یک لحظه شنیده می‌شوند، است. نوازندگان برای تولید یک موسیقی جدید از آلات موسیقی مختلفی استفاده می‌کنند و زیبایی موسیقی به هماهنگی بین نت‌های سازهای مختلف است (یانگ^۷، ۲۰۰۹). در ساخت یک موسیقی، هدف یافتن بهترین هارمونی و تولید زیباترین موسیقی ممکن است. نوازندگان در هر بار اجرا سعی می‌کنند نت‌های بهتری انتخاب کنند تا در هر بار اجرا، موسیقی تکامل بیشتری یافته و زیباتر گردد (مهدوی و همکاران، ۲۰۰۷). نوازندگان قطعه‌های نواخته شده را به خاطر می‌سپارند تا در هر بار قطعه جدید را با قطعات قبلی مقایسه کنند. از شبیه‌سازی فرایندی که یک نوازنده برای هارمونیک کردن یک قطعه

1. Group method of data handling
2. Ivakhnenko
3. Farlow
4. Singular value decomposition
5. Harmony Search Algorithm
6. Mahdavi et al
7. Yang

موسیقی طی می‌کند، الگوریتمی استخراج شده که آن را بانام جستجوی هارمونی می‌شناسیم. این الگوریتم برای رسیدن به بهترین جواب، از موسیقی الهام گرفته شده است (جیم^۱، ۲۰۰۹). در الگوریتم هارمونی هر یک از داده‌ها را یک نت و هر بردار جواب یک هارمونی است. مراحل توسعه الگوریتم جستجوی هارمونی را می‌توان به پنج گام تقسیم کرد (مهدوی و همکاران، ۲۰۰۷).

گام اول: مقداردهی اولیه مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای اولیه است. به این معنی که ابتدا مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Minf}(x). x_i \text{ is in } X_i, i=1,2,3 \dots N \quad (3)$$

در این مرحله مقدار پارامترها، اندازه حافظه هارمونی HMS^۲، سرعت بررسی حافظه هارمونی HMCR^۳، سرعت تنظیم قطعات (PAR^۴)، حداکثر تعداد تکرارها (NI^۵) تعیین می‌شود.

گام دوم: مقدار HMS با مقادیر اولیه‌ای که به طور تصادفی تولید می‌شوند، پر می‌گردد.

گام سوم: ایجاد یک هارمونی جدید بهبودیافته است، به این صورت که در این گام یک بردار هارمونی جدید بر اساس روش‌های در نظر گرفتن حافظه، انتخاب تصادفی و تنظیم زیرومی تولید می‌شود.

$$x'_i = \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2 \dots x_i^{\text{HMS}}\} \\ x'_i \in X_i \end{cases} \begin{matrix} \text{HMCR} \\ (1-\text{HMCR}) \end{matrix} \quad (4)$$

حال مقداری که در مرحله قبل از حافظه انتخاب شده است با احتمال PAR به مرحله تنظیم زیرومی می‌رود.

$$x'_i = \begin{cases} \text{yes with probability PAR} \\ \text{No with probability PAR} \end{cases} \quad (5)$$

اگر درایه مورد نظر شانس تغییر داشته باشد با فرمول زیر تغییر می‌کند:

$$x'_i \leftarrow x_i \pm \text{rand}() * bw \quad (6)$$

به این معنی که مقدار درایه با یک مقدار رندم بین -۱ و ۱ جمع می‌شود و سپس ضرب در مقدار پهنای باند می‌شود. پهنای باند همان مکانیسم تمرکز و تنوع است. به عبارتی هدف این است که در ابتدای الگوریتم تنوع زیاد باشد و هرچه به پایان الگوریتم نزدیک می‌شویم تنوع کاهش و تمرکز افزایش یابد. پس در هر تکرار پهنای باند را با یک ضریب کاهش می‌دهیم. برای این کار تغییر در حافظه هارمونی با دو روش زیر انجام شود:

۱- در نظر گرفتن نت‌های موجود در حافظه یعنی تعدادی از درایه‌ها را بر اساس نت‌های موجود در حافظه تغییر می‌دهد.

۲- تنظیم زیرومی نت‌ها: یعنی یک تعداد از داده‌ها را انتخاب می‌کند و مقداری به آن‌ها اضافه می‌کند

گام چهارم: به روز کردن حافظه هارمونی است به این صورت که اگر بردار هارمونی جدید از بدترین هارمونی موجود در حافظه بهتر باشد، جایگزین آن می‌شود.

گام پنجم: تکرار شدن گام‌های ۵ و ۸ می‌باشد تا زمانی که شرط پایانی ارضا شود یا تکرارها تمام شود.

۴. معیارهای ارزیابی مدل

بعد از توسعه مدل‌ها از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE^۱)، R ضریب تعیین^۲ (R²)، ضریب NSE^۳ برای ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف استفاده شد که در روابط (۹) الی (۱۱) ارائه شده است (چای و^۴، ۲۰۱۴؛ مک کوئن و همکاران^۱، ۲۰۰۶؛ و اوژر^۱، ۱۹۸۵).

1. Geem
2. Harmony memory size
3. Harmony memory considering rate
4. Pitch adjusting rate
5. Number of improvisations
6. Root Mean Squared Error
7. Coefficient of determination

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \left[\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(O_i - \bar{O}) \right]^2 \left[\sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})^2 (O_i - \bar{O})^2 \right]^{-1} \quad (9)$$

در این رابطه N تعداد مشاهده‌ها است، p_i مقدار پیش‌بینی شده است، O_i مقدار مشاهده‌ای است و \bar{p} و \bar{O} به ترتیب متوسط مقادیر p_i و O_i هستند

یافته‌های پژوهش

۱. انتخاب متغیرهای ورودی به مدل

یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر مدل یادگیری ماشین انتخاب بهترین متغیرهای مستقل برای مدل‌سازی متغیر وابسته است. زیرا هر چه تعداد متغیرهای مستقل بیشتر باشد مدل پیچیده‌تر و همگرایی آن دشوارتر می‌شود، از طرفی اگر تعداد متغیرهای مستقل کم باشد نمی‌توان متغیر وابسته را با دقت خوبی مدل‌سازی کرد. به این ترتیب در این مطالعه برای مدل تشخیص بهترین متغیرهای ورودی از روش NCA استفاده شد. برای توسعه این روش از exact, non and average fit method و Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS) solver استفاده شد، همچنین مقدار پارامتر لامبدا با استفاده از روش سعی و خطا تعیین شد (یانگ و همکاران^۲، ۲۰۱۲). با استفاده از این روش سه نوع دیتاست برای تشکیل مدل GMDH تعیین شدند که در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از این روش دبی رودخانه و بارش در گام t-1 بر اساس همه روش‌ها پارامترهای مهمی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در گام زمانی t تعیین شده‌اند.

جدول ۱. ترکیب متغیرهای مختلف شناسایی شده با استفاده از روش NCA برای توسعه مدل GMDH

متغیرهای مستقل	روش حل	متغیر وابسته	نوع NCA	دیتاست
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-4}, R_t, R_{t-1}, R_{t-3}, T_t, T_{t-3}, T_{t-5}$	BFGS	Q_t	Exact	D1
$Q_{t-1}, Q_{t-4}, Q_{t-5}, R_t, R_{t-1}, R_{t-2}, T_t, T_{t-1}, T_{t-2}$	BFGS	Q_t	Non	D2
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3}, R_t, R_{t-1}, R_{t-4}, T_{t-1}, T_{t-2}, T_{t-3}$	BFGS	Q_t	average	D3

۲. نتایج مدل GMDH

بعد از مشخص شدن بهترین متغیرها برای تشکیل ماتریس ورودی مدل GMDH توسعه داده شد، این مدل ابتدا با استفاده از داده‌های آموزش توسعه داده شد سپس با داده‌های تست ارزیابی شد. برای توسعه این مدل حداکثر تعداد لایه‌ها، حداکثر تعداد نورون‌های هر لایه و مقدار پارامتر SP^3 که بر اساس آن تعیین می‌شود چند درصد از نورون‌های هر لایه به لایه بعد منتقل شوند با روش سعی و خطا تعیین شدند. همچنین مقدار اولیه پارامترهای اندازه جمعیت (PS^4) و حداکثر تعداد تکرارها (MNI^5) با روش سعی و خطا تعیین شدند. مقدار حد پایین و بالا متغیرها HSA نیز به ترتیب ۱- و ۱ در نظر گرفته شد، این مراحل برای هر یک از مجموع داده‌های D1، D2 و D3 انجام شد و شاخص‌های خطا برای هر یک از مدل‌ها محاسبه شدند. بر اساس نتایج حاصل

8. Nash-Sutcliffe efficiency

9. Chai & Draxler

10. McCuen et al

11. Ozer

1. Neighborhood component analysis

2. Yang et al

3. Selection Pressure

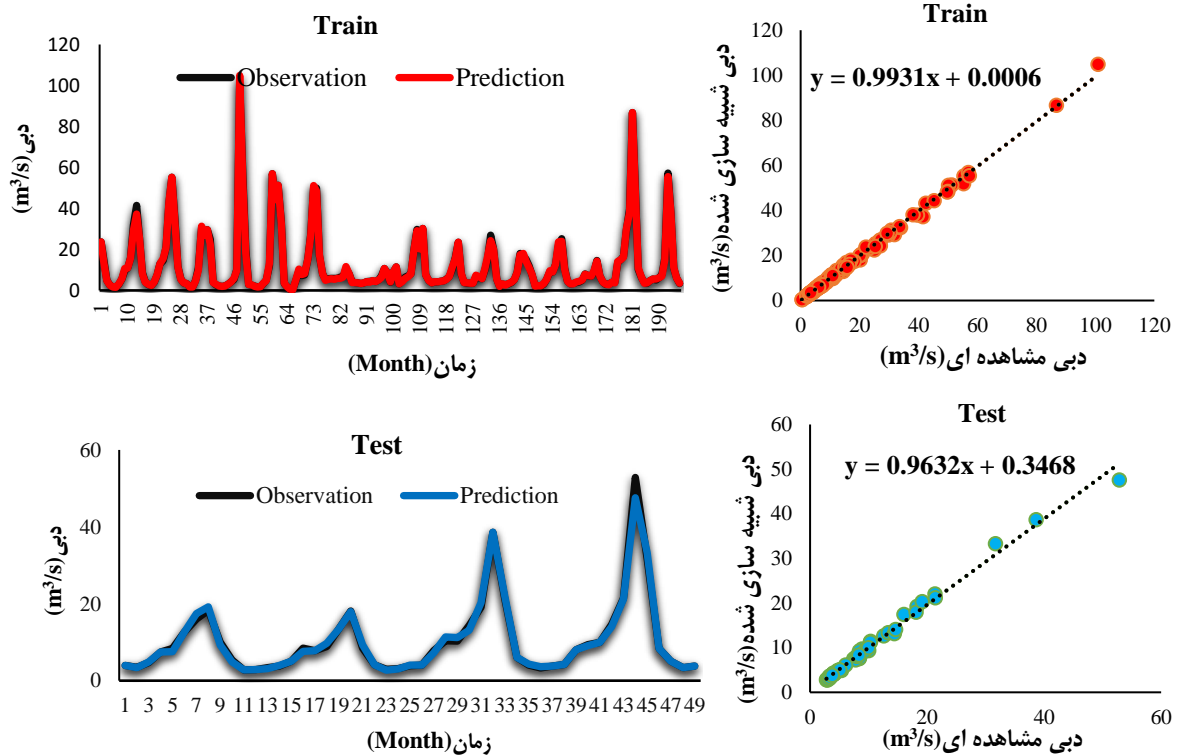
4. Population Size

5. Maximum Number Of Iterations

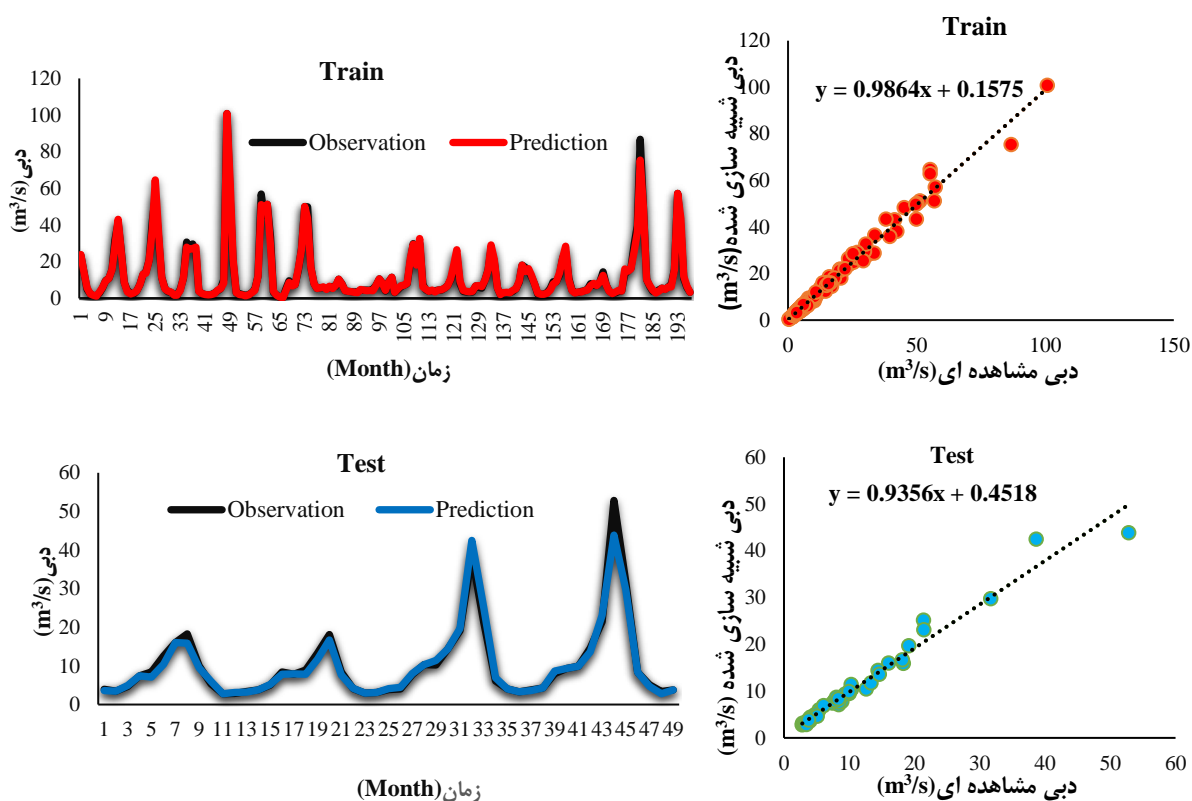
مدل GMDH با دیتاست D1 بهترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست دارد (Train: $RMSE: 0.0.2632, NSE: 0.9921, R^2: 0.9984$ Test: $RMSE: 0.2010, NSE: 0.9926, R^2: 0.9987$ و با دیتاست D2 بدترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست دارد (Train: $RMSE: 0.2070, NSE: 0.9237, R^2: 0.9850$, Test: $RMSE: 0.2604, NSE: 0.9259, R^2: 0.9857$ (همچنین این مدل با دیتاست D3 نسبت به مدل D1 عملکرد ضعیفتری دارد (Train: $RMSE: 0.2485, NSE: 0.9506, R^2: 0.9885$, Test: $RMSE: 0.2430, NSE: 0.95126, R^2: 0.9887$) اما نسبت به دیتاست D2 عملکرد بهتری دارد. در جدول (۲) مقدار شاخص های خطا مدل های GMDH(D1), GMDH(D2), HSA-GMDH(D3) در مرحله آموزش و ارزیابی نشان داده شده اند. همچنین در شکل های (۱) تا (۳) مقدار جریان رودخانه واقعی و مقدار مدل سازی شده به وسیله مدل های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج مدل ماهانه شبکه عصبی GMDH برای هر یک از دیتاست های D3، D2، D1 در مرحله آموزش و تست

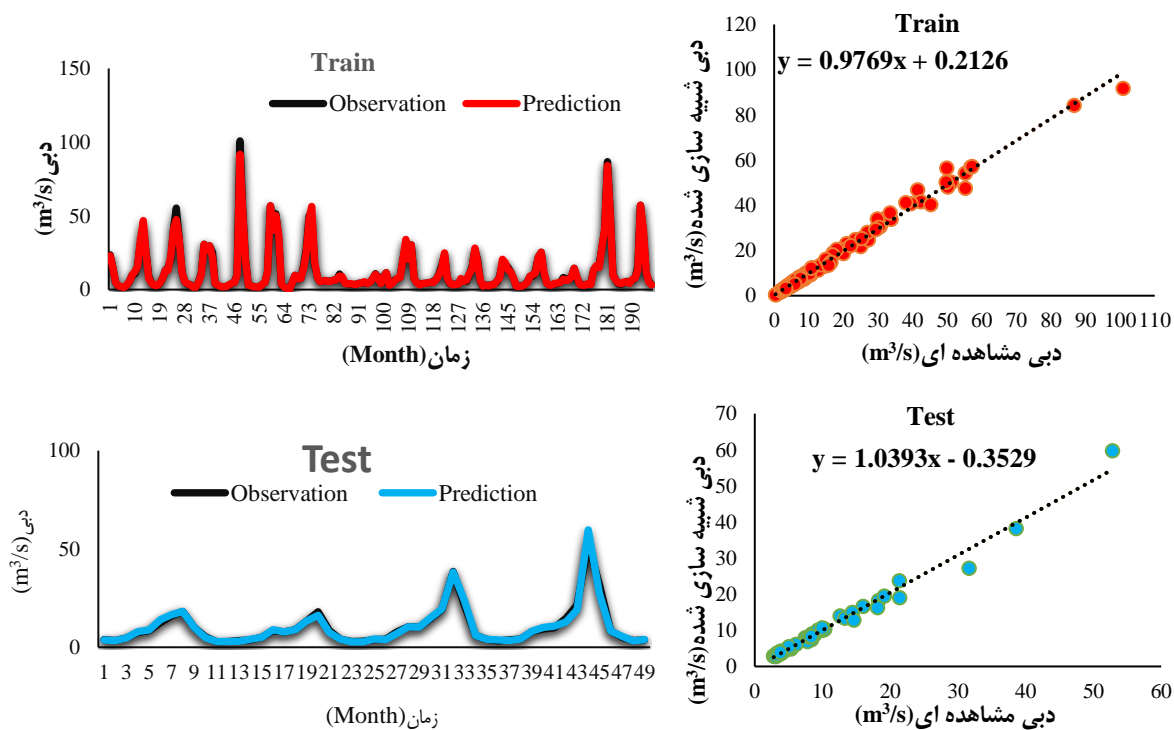
مدل	آموزش			تست		
	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE	R ²
GMDH(D1)	0.1647	0.9444	0.9497	0.1575	0.9445	0.9498
GMDH(D2)	0.1951	0.9352	0.9471	0.1920	0.9371	0.9477
GMDH(D3)	0.1863	0.9425	0.9484	0.1809	0.9429	0.9487



شکل ۱. نتایج مدل GMDH(D1) برای مرحله آموزش و تست



شکل ۲. نتایج مدل GMDH(D2) برای مرحله آموزش و تست



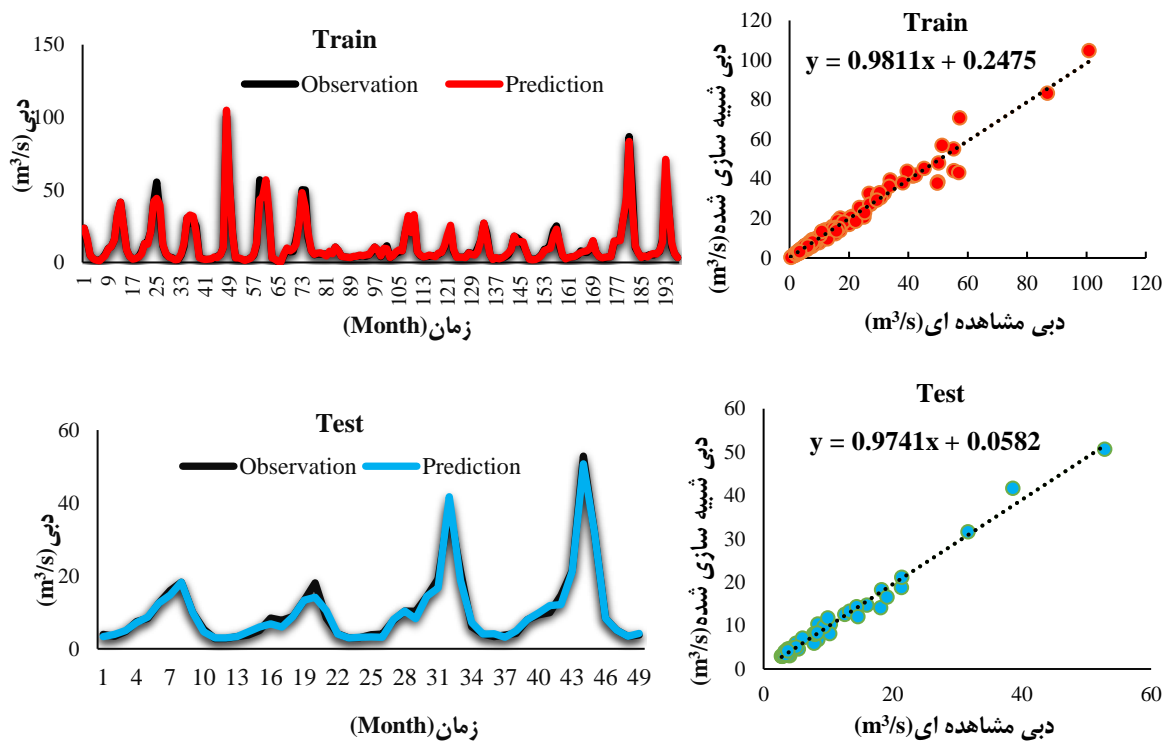
شکل ۳. نتایج مدل GMDH(D3) برای مرحله آموزش و تست

۳. نتایج مدل HSA-GMDH

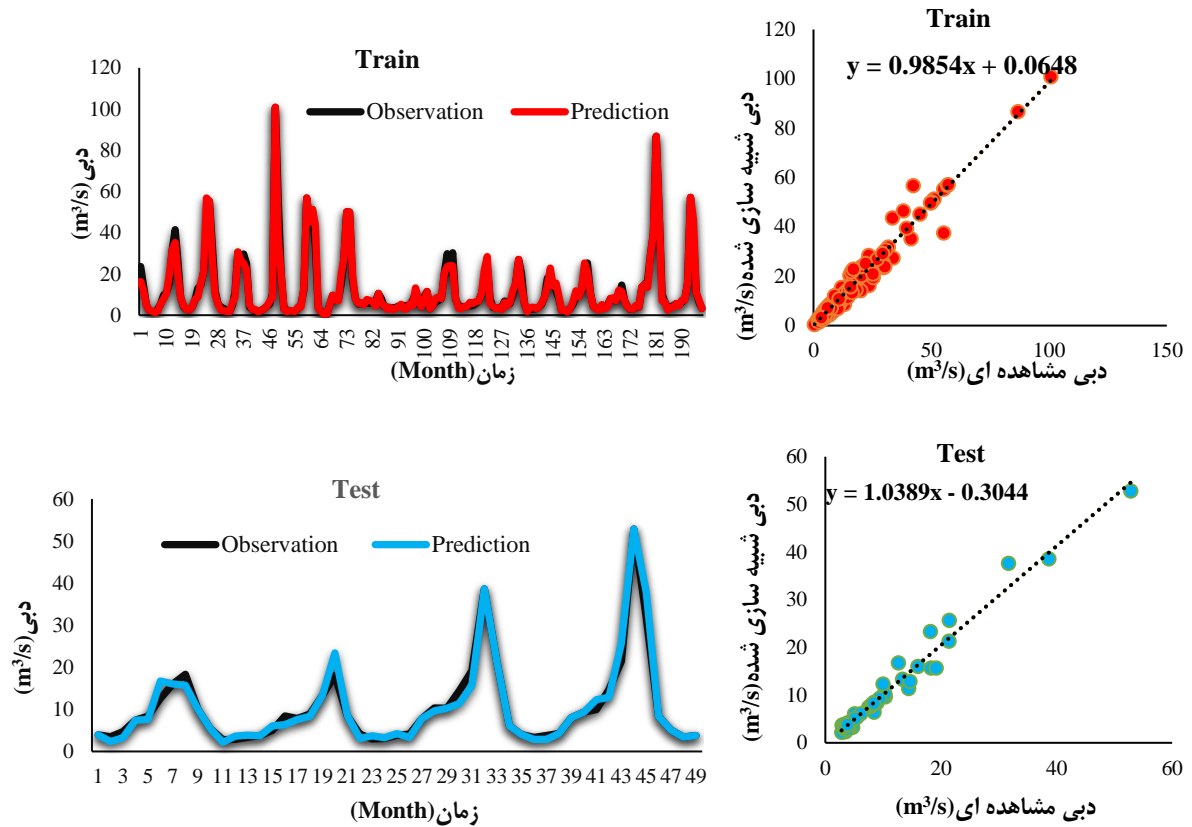
در این مرحله از الگوریتم HSA برای بهبود کارایی مدل‌ها GMDH(D1)، GMDH(D2)، GMDH(D3) استفاده شد. به این ترتیب سه مدل HSA-GMDH(D1)، HSA-GMDH(D2)، HSA-GMDH(D3) توسعه داده شدند. در جدول (۲) مقدار شاخص‌های خطا مدل‌های HSA-GMDH(D1)، HSA-GMDH(D2)، HSA-GMDH(D3) در مرحله آموزش و ارزیابی نشان داده شده‌اند همچنین در شکل‌های (۶) تا (۸) مقدار جریان رودخانه واقعی و مقدار مدل‌سازی شده به وسیله مدل‌های مختلف نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل هر سه مدل GMDH توسعه یافته با HSA نسبت به مدل‌های GMDH توسعه یافته با روش سعی و خطا کارایی بهتری دارند.

جدول ۳. نتایج مدل ماهانه شبکه عصبی HSA-GMDH برای هر یک از دیتاست‌های D1، D2، D3 در مرحله آموزش و تست

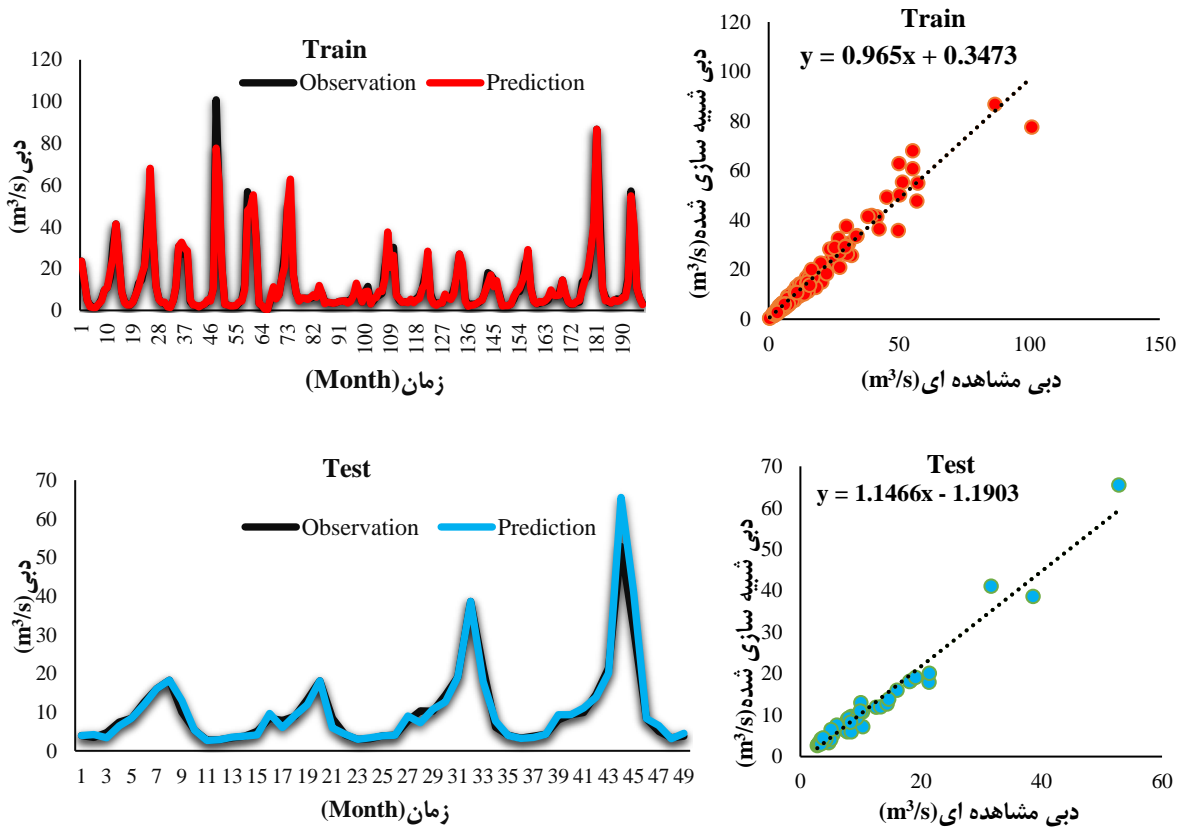
مدل	آموزش			تست		
	RMSE	NSE	R ²	RMSE	NSE	R ²
HSA-GMDH(D1)	0.2067	0.9247	0.9456	0.2028	0.9276	0.9464
HSA-GMDH(D2)	0.2236	0.9030	0.9390	0.2187	0.9036	0.9392
HSA-GMDH(D3)	0.2146	0.9121	0.9435	0.2118	0.9140	0.9445



شکل ۶. نتایج مدل HSA-GMDH(D1) برای مرحله آموزش و تست



شکل ۷. نتایج مدل HSA-GMDH(D2) برای مرحله آموزش و تست



شکل ۸. نتایج مدل HSA-GMDH(D3) برای مرحله آموزش و تست

۴. مقایسه نتایج مدل های GMDH و HSA-GMDH

بعد از توسعه مدل HSA-GMDH نتایج آن با مدل GMDH که پارامترهای آن با استفاده از روش سعی و خطا تعیین شدند مقایسه شد. بر اساس نتایج حاصل مدل HSA-GMDH(D1) نسبت به مدل GMDH(D1) عملکرد بهتری در مرحله آموزش و تست دارد به طوری که مدل HSA-GMDH(D1) نسبت به مدل GMDH(D1) مقدار RMSE کمتر و همچنین مقدار NSE و R^2 بیشتری دارد. مدل HSA-GMDH(D2) نیز نسبت به مدل GMDH(D2) عملکرد بهتری دارد و مقدار RMSE کمتر NSE و R^2 بیشتری از مدل GMDH(D2) دارد.؛ مانند مدل های توسعه یافته بری مجموع داده های D1 و D2 مدل HSA-GMDH(D3) نیز نسبت به مدل GMDH(D3) عملکرد بهتری دارد، به طوری که مقدار RMSE آن نسبت به مدل GMDH(D3) کمتر و مقدار NSE و R^2 آن نسبت به مدل GMDH(D3) بیشتر است؛ بنابراین بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه برای شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه با استفاده از مدل GMDH بهتر است به جای روش سعی و خطا از یک الگوریتم بهینه سازی مانند HSA استفاده شود.

بحث

یکی از مهم ترین مسائل در مدیریت منابع آب تجزیه و تحلیل جریان رودخانه است. مدل سازی و پیش بینی دبی رودخانه از مهم ترین اهداف در فرایند مدیریت منابع آب است، به این دلیل همواره تلاش می شود از روش های دقیقی برای مدل سازی آن و پیش بینی آن استفاده کرد. برای توسعه مدل های فیزیکی علاوه بر هزینه زیاد، به انواع زیاد تجهیزات و همچنین کاربران خبره نیاز است؛ در نتیجه برای این کار می توان از مدل های فیزیکی و مدل های مبتنی بر داده استفاده کرد. هدف این مطالعه مدل سازی جریان ماهانه رودخانه گاماسیاب کرمانشاه برای یک دوره ۲۰ ساله است. برای این کار از شبکه عصبی GMDH استفاده شد.

نتیجه گیری

برای این کار از شبکه عصبی GMDH استفاده شد، در این مدل برای هر نورون یک چندجمله ای توسعه داده می شود، هر یک از این چندجمله ای ها وزن هایی دارند که باید با استفاده از یک روش دقیق تعیین شوند. از روش های مختلفی می توان برای این کار استفاده کرد اما در این مطالعه از الگوریتم HSA استفاده شد. برای توسعه این مدل از اطلاعات بارش و دبی در ماه های قبل استفاده شد. با استفاده از روش سعی و خطا سه مجموع داده تشکیل شدند که با استفاده از آن ها این مدل بهترین نتیجه را داشت، سپس برای هر مجموعه عملکرد هر مدل HSA-GMDH ارزیابی شد. برای ارزیابی کارایی مدل های مختلف از شاخص های RMSE، NSE و R^2 استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از توسعه مدل GMDH و HSA-GMDH برای مجموع داده های مختلف، مدل HSA-GMDH نسبت به مدل GMDH در مرحله آموزش و تست عملکرد بهتری دارد؛ بنابراین برای شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه بهتر است به جای روش GMDH از روش HSA-GMDH استفاده شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- اسماعیلی، یوسف، رجبی، احمد، یوسفوند، فریبرز، و شعبانلو، سعید. (۱۴۰۲). تخمین بارش درازمدت شهر بابلسر با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن بهینه‌یافته. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۳(۲)، ۱۹۷-۲۱۵. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.162632>
- بذرافشان، ام البنین، سلاجقه، علی، مهدوی، محمد، و فاتحی، احمد. (۱۳۹۳). بررسی کارآیی مدل‌های هیبرید شبکه عصبی مصنوعی-استوکاستیک در پیش‌بینی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی با استفاده از آماره کاپا (مطالعه موردی: حوزه آبخیز رودخانه گاماسیاب). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۸(۲۷)، ۳۵-۴۸. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1393.8.27.5.8>
- سبزواری، فرحناز، یعقوبی، بهروز، و شعبانلو، سعید. (۱۴۰۲). کاربرد مدل هیبریدی شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم کرم شب‌تاب برای پیش‌بینی مقدار جامدات محلول در آب رودخانه. مجله حفاظت منابع آب و خاک، ۱۳(۲)، ۱۳-۲۳. <https://doi.org/10.30495/wsra.2023.71849.11356>
- علیدادی ده کهنه، صابر، سلگی، اباذر، شهنی دارابی، مهنوش، و زارعی، حیدر. (۲۰۱۹). ارزیابی مدل‌های ژنتیکی جهت مدل‌سازی جریان رودخانه. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۹(۳)، ۱-۱۷. <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.88628>

References

- AlidadiDehkoneh, S., Solgi, A., Shehni darabi, M., & Zarei, H. (2019). Evaluation of genetic models for river flow modeling. *Irrigation and Water Engineering*, 9(3), 1-17. <https://www.doi.org/10.22125/iwe.2019.88628> (In Persian)
- Aman Jalili, A., Najarchi, M., Shabanlou, S., & Jafarinia, R. (2023). Multiobjective optimization of water resources in real time based on integration of NSGA-II and support vector machines. *Environ Sci Pollut Res*, 30, 16464–16475. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22723-4>
- Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. *Earth Sci Inform*, 16, 3227–3241. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1>
- Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2023) Modelling and prediction of groundwater level using wavelet transform and machine learning methods: A case study for the Sahneh Plain, Iran. *Irrigation and Drainage*, 72(3), 747–762. <https://doi.org/10.1002/ird.2794>
- Bazrafshan, O., Salajegheh, A., Mahdavi, M., & Fatehi, A. (2015). A Study of Efficiency of the Hybrid model Artificial Neural Network Models - Stochastic in Hydrological Drought Forecasting Using kappa Statistics (Case Study: Gamasiab Watershed Basin). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 8(27), 35-48. <http://dori.net/dor/20.1001.1.20089554.1393.8.27.5.8> (In Persian)
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247-1250. <http://dx.doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chen, C., He, W., Zhou, H., Xue, Y., & Zhu, M. (2020). A comparative study among machine learning and numerical models for simulating groundwater dynamics in the Heihe River Basin, northwestern China. *Scientific reports*, 10(1), 3904. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-60698-9>
- Esmaili, F., Shabanlou, S., & Saadat, M. (2021). A wavelet-outlier robust extreme learning machine for rainfall forecasting in Ardabil City, Iran. *Earth Sci Inform*, 14, 2087–2100. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00681-8>
- Esmaili, Y., rajabi, A., yosefvand, F., & shabanlou, S. (2022). Estimation of Long-Term Rainfall in Babolsar City by Using the Optimized Gene Expression Programming. *Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 197-215. <https://www.doi.org/10.22125/iwe.2022.162632> (In Persian)
- Fallahi, M.M., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & IzadBakhsh, M.A. (2023). Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). *Appl Water Sci*, 13(143). <https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8>
- Farlow, S. J. (2020). Self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithms. *CrC Press*, Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/9781003065227>
- Geem, Z. W. (2009). Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications. *Springer*, Berlin/Heidelberg, Germany. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00185-7>
- Guiamel, I. A., & Lee, H. S. (2020). Watershed modelling of the Mindanao River Basin in the Philippines using the SWAT for water resource management. *Civil Engineering Journal*, 6(4), 626-648. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091496>
- Jalilian, A., Heydari, M., Azari, A., & Shabanlou, S. (2022) Extracting optimal rule curve of dam reservoir base on stochastic inflow. *Water Resour Manage*, 36, 1763–1782. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03087-3>

- Kambalimath S, S., & Deka, P. C. (2021). Performance enhancement of SVM model using discrete wavelet transform for daily streamflow forecasting. *Environmental Earth Sciences*, 80(3), 101. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-021-09394-z>
- Mahdavi, M., Fesanghary, M., & Damangir, E. (2007). An improved harmony search algorithm for solving optimization problems. *Applied mathematics and computation*, 188(2), 1567-1579. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2006.11.033>
- Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmad, R. (2023). A Hybrid Machine Learning Model for Modeling Nitrate Concentration in Water Sources. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(11), 1-22. <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-023-06745-3>
- Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmad, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062>
- McCuen, R. H., Knight, Z., & Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of hydrologic engineering*, 11(6), 597-602. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597))
- Moradi, E., Yaghoubi, B., & Shabanlou, S. (2023). A new technique for flood routing by nonlinear Muskingum model and artificial gorilla troops algorithm. *Appl Water Sci*, 13, 49. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01844-8>
- Ozer, D. J. (1985). Correlation and the coefficient of determination. *Psychological bulletin*, 97(2), 307. <https://psycnet.apa.org/doi/10.1037/0033-2909.97.2.307>
- Panahi, J., Mastouri, R., & Shabanlou, S. (2022) Insights into enhanced machine learning techniques for surface water quantity and quality prediction based on data pre-processing algorithms. *J Hydroinf*, 24(4), 875–897. <https://doi.org/10.2166/hydro.2022.022>
- Rezaei, K., & Vadiati, M. (2020). A comparative study of artificial intelligence models for predicting monthly river suspended sediment load. *Journal of Water and Land Development*. 45(IV-VI),107-118. <http://dx.doi.org/10.24425/jwld.2020.133052>.
- Sabzevari, F., Yaghoubi, B., & Shabanlou, S. (2023). Application of Hybrid Model of Artificial Neural Networks and Firefly Algorithm to Predict the Amount of TDS in River Water. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 13(2), 13-23. <https://doi.org/10.30495/wsrecj.2023.71849.11356> (In Persian)
- Samadianfard, S., Jarhan, S., Salwana, E., Mosavi, A., Shamshirband, S., & Akib, S. (2019). Support vector regression integrated with fruit fly optimization algorithm for river flow forecasting in Lake Urmia Basin. *Water*, 11(9), 1934. <http://dx.doi.org/10.20944/preprints201905.0361.v1>
- Shabanlou, S. (2018). Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on the end of circular channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 59, 63-71. <https://www.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.003>
- Xiang, X., Li, Q., Khan, S., & Khalaf, O. I. (2021). Urban water resource management for sustainable environment planning using artificial intelligence techniques. *Environmental Impact Assessment Review*, 86, 106515. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106515>
- Yang, W., Wang, K., & Zuo, W. (2012). Fast neighborhood component analysis. *Neurocomputing*, 83, 31-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2011.10.021>
- Yang, X.-S. (2009). Harmony search as a metaheuristic algorithm. Music-inspired harmony search algorithm: theory and applications, *Springer*, Berlin/Heidelberg, Germany. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-00185-7_1



Numerical study of energy loss and S-type hydraulic jump length using cross beams as roughness in sudden expansion

Seyed Mohsen Sajadi¹ , Farshad Esmailzadeh Feridani² , and Javad Ahadiyan³ 

1. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: m.sajadi@scu.ac.ir
2. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: Feridani0220@gmail.com
3. Corresponding author, Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 19 November 2024

Received in revised form 01

February 2025

Accepted 20 February 2025

Available online 25 March

2025

Keywords:

energy Dissipation,

hydraulic Jump,

cross Beam,

flow-3D Model,

asymmetric wave.

ABSTRACT

Objective: The main goal is to understand better the hydraulic jump mechanism in the sudden expansion channel and investigate the cross-beam system's effect as a roughness for the control and stability of the hydraulic jump.

Method: In this study, the hydraulic jump in a rectangular channel with a sudden diverging section (with a divergence ratio of $B=b_1/b_2=0.67$) was simulated using a cross-beam system as roughness to control an asymmetric S-type hydraulic jump. This type of jump generates wave impacts that cause flume bed and wall erosion. The simulation was conducted three-dimensionally using the Flow-3D software. The hydraulic jump characteristics were examined by analyzing the velocity at the bed and evaluating three different configurations of the cross-beam system. Variables included the distance of the beam system from the diverging section, the angle of the beams relative to the channel bed, and the number and thickness of the beams at various percentages of the reference tailwater depth.

Results: The results of the numerical simulations, validated by experimental data, demonstrated that using a floor roughness system with cross-beams in various numbers and angles—after optimizing the configuration using velocity coefficient relationships—stabilized and eliminated asymmetric waves and reverse flow in the S-type hydraulic jump across all tested tailwater depths. The cross-beam roughness system also resulted in the highest relative energy loss for configurations 1, 2, and 3, calculated at 36.06%, 74.67%, and 78.6%, respectively, across different sections and tailwater depths. In analyzing the water surface profile for the three cross-beam configurations, configuration 1 (C1) exhibited a more uniform distribution of flow depth in the channel's cross-section, particularly in the sections 0.3 to 2 meters from the end of the structural system. For the total hydraulic head (THH) and the energy dissipation endpoint (or hydraulic jump, $j*\Gamma*j*\Gamma$) in configuration C1, this point was identified after the third beam ($N=5$). The flow extended with concentrated lines after passing over and under the beams.

Conclusions: Based on the total hydraulic head index and energy dissipation control, configuration C1 demonstrated superior capability in controlling energy dissipation within the structural system before the flow exited the cross-beam roughness system.

Cite this article: Sajadi, S.M., Esmailzadeh 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), 78-97. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11522.1148>



Introduction

Stilling basins are hydraulic structures designed to dissipate the kinetic energy of flow at the downstream end of spillways, gates, rapids, and other flow control structures. diverging basins are commonly used downstream of these structures To enhance energy dissipation in hydraulic jumps. Various methods have been employed to stabilize asymmetric hydraulic jumps. The performance of rough elements, such as sills, bed roughness, blocks, etc., has been investigated for increasing energy dissipation with various objectives, including reducing the stilling basin's length and project costs.

Energy Dissipation in Hydraulic Structures: Water is often released through spillways at high velocities during flood events, carrying significant kinetic energy. If this energy is not adequately controlled, it can cause erosion, structural damage, and other safety concerns downstream. Hydraulic structures, such as stilling basins, are designed to dissipate this energy safely. The efficiency of these structures depends on various factors, including the geometry of the spillway, the flow rate, and the tailwater conditions. **Role of Hydraulic Jumps:** A hydraulic jump is a phenomenon where high-velocity, supercritical flow transitions to low-velocity, subcritical flow. This transition results in significant energy dissipation through turbulence and mixing.

However, the length of the hydraulic jump is a critical design parameter. Longer jumps require larger stilling basins, which increase construction costs and space requirements. **Challenges with Flatbed Hydraulic Jumps:** On a flatbed, hydraulic jumps are longer, making them less economical for stilling basins downstream of spillways, especially ogee spillways commonly used in dams. To address this, engineers often incorporate appurtenances such as baffle blocks, sills, or roughened beds to shorten the jump length and enhance energy dissipation. **Importance of Research and Optimization:** Studies by researchers such as Sajadi et al. (2024), Fathi Moghadam et al. (2024), and Ahadian et al. (2022, 2024) have contributed to a better understanding of the physical mechanisms governing hydraulic jumps and energy dissipation. Their work highlights the importance of optimizing stilling basin designs to balance performance and cost, particularly in large-scale projects like dam spillways.

Method

This research aims to numerically investigate the S-type asymmetric jump control by using the system of crossed beams as a type of roughness with specific distributions in the form of the number, height, and different distances of the beams (as variables) in the stilling basin of sudden expansion using Flow-3D software. The geometry of the laboratory model was drawn in the AutoCAD software and then transferred as Stl to the Flow-3D software environment to carry out numerical simulation. According to the dimensions of the channel and the velocity of the flow, as well as the examination of the experimental data of the previous simulations and the numerical studies of other researchers concerning the subject of this research, the duration of the simulation of the flow was conservatively considered to be 180 seconds. Then, it was observed that the flow became stable in about 30 to 40 seconds after the start of the simulation, and the analyzed parameters of the flow did not change significantly with time. Therefore, the duration of the simulations was reduced to 60 seconds, and the results were recorded and checked at this time. With trial and error, the optimal meshing was chosen so that the analysis duration is also acceptable in addition to sufficient accuracy. The conditions of the three simulations, including the analysis time, initial and boundary conditions, and the turbulence model, were considered the same, and the difference was only in the number of mesh cells. In the simulations of this research, the RNG turbulence model was used. Finally, to determine the accuracy of each of the simulations and choose the optimal meshing, the indices of the

adaptation coefficient, the average errors, and the square of the average square of the errors were analyzed.

Results

Analyzing the results of numerical modeling according to what was stated for the use of the RNG disturbance model, the water level profile was analyzed by examining the flow depth in the transverse and longitudinal sections of the flow in optimal configurations. Transverse sections were considered based on the laboratory measurements (Hajjaligol et al. 2021) for the width of 1 meter of the channel and at intervals of 0.1 meter, which were done for all three optimal combinations of tests and percentages of the depth of the channel. Using cross beams, the longitudinal profile of the flow depth from the section after the sudden expansion to the section 2 meters after the beam structure (following the laboratory observations) was drawn using the results of modeling with Flow3D software. The placement position of the cross-beam system for C1 and C3 configuration with $P = 80$ cm, between $X/Y1 = 8.34 \sim 4.67$, and for C2 configuration with $P = 60$ cm in $X/Y1 = 1.26$ It is $\sim 58/7$. Configuration 1 (C1) shows a low depth change and more flow uniformity than C2 and C3. This decrease in depth is due to the movement of eddies in the space between the beams with a greater amount and more energy changes, and as a result, higher wear and tear and exit with a more even flow. Based on the velocity outputs in configuration one and the depth of the tailwater from $h_s 0.7$ to h_s (height of tailwater) with the use of cross beams with the number of $n=5$, it can be seen that in the conditions of h_s (actual depth of tailwater) the flow lines after the effect of roughness (beams) closer to each other and according to the flow conditions after the structures, by forming eddies with a smaller wavelength between the spillway legs and finally the third beam, the turbulence is controlled. To quantitatively check the length of the jump, the jump length and roll length results for the S-type asymmetric jump modeled in Froude numbers of 7.4, 8.7 and 9.5 were analyzed based on the tailwater depth (y_t). Increasing the Froude number increases the change process of both dimensionless parameters under investigation. The modeling results are consistent with the research results of Taghinia et al. (2021). So, with the flow increase through the spillway, the Froude number decreases, and the length of the jump and the roll increase.

Conclusions

The effective parameters in hydraulic jump control were investigated by using different structural configurations consisting of cross beams with different percentages of tailwater depth. The results of the numerical simulations, confirming the laboratory results, showed the use of the bed roughness system using cross beams in different numbers and angles and after obtaining the optimal configurations using the relationships of the velocity coefficients in all depths of the case. The test ensures the stability and removal of asymmetric waves and reverses flow in the S-type asymmetric jump. In the check of jump control, the maximum percentage reduction in the length of S-type asymmetric hydraulic jump by using the simulated system was observed by 78.02% for configuration three and stable condition 0.9hs. The highest relative energy loss in the tested sections and depths of the tailwater for 3configuration was calculated as 36.06, 74.67, and 78.6 percent, respectively. Compared to the reference conditions, without

using the beam structure as a roughness, it causes more energy loss and, as a result, reduces the length of the stilling basin.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data Availability Statement

Acknowledgements

The authors would like to thank the Shahid Chamran University Research Deputy of Ahvaz, with Grant no. SCU.WH1403.260. the Khuzestan Water and Electricity Organization (KWPA), which provided financial and spiritual support to provide the conditions for conducting the research

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مطالعه عددی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی نوع S در استفاده از بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری در بازشدگی ناگهانی

سید محسن سجادی^۱، فرشاد اسمعیل زاده فریدنی^۲، و جواد احدیان^۳

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

۲. گروه سازه‌های آبی دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: feridani0220@gmail.com

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

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: باتوجه به اهمیت حوضچه‌های آرامش و پرهزینه و زمان بر بودن مدل‌های آزمایشگاهی، به‌کارگیری مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی پدیده در موقعیت‌های مختلف و کاهش هزینه و زمان تأثیر زیادی دارند؛ بنابراین در این تحقیق شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن در مقاطع واگرای ناگهانی و تأثیر به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع در پایداری پرش به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شده است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۵

روش پژوهش: در این تحقیق پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی با مقطع واگرای ناگهانی با نسبت واگرایی $(B=b1/b2=0.67)$ و به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری جهت کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S که با ایجاد ضربه‌های موج موجب فرسایش کف و دیواره فلوم می‌گردد و با مدل‌سازی با نرم‌افزار Flow-3D به‌صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی گردید. مشخصات پرش هیدرولیکی با بررسی سرعت در کف و تعیین سه ترکیب-بندی مختلف از سیستم بیم‌های متقاطع با متغیرهایی شامل فاصله سیستم بیم‌ها از مقطع واگرا، زاویه سیستم بیم‌ها با کف کانال، تعداد و ضخامت بیم‌ها در درصدهای مختلف عمق پایاب مرجع مورد بررسی قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها:

استهلاک انرژی،

پرش هیدرولیکی،

بیم متقاطع،

Flow-3D،

موج نامتقارن.

یافته‌ها: نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی با تأیید نتایج آزمایشگاهی نشان داد که به‌کارگیری سیستم زبری کف با استفاده از بیم‌های متقاطع در تعداد و زوایای مختلف و پس از دریافت بهینه ترکیب‌بندی با استفاده از روابط ضرایب سرعت، در همه عمق‌های پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج‌های نامتقارن و جریان برگشتی در پرش نامتقارن نوع S می‌گردد. همچنین با استفاده از سیستم زبری با بیم‌های متقاطع، بیشترین افت نسبی انرژی در مقاطع و عمق‌های پایاب مختلف مورد آزمایش برای ترکیب‌بندی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۶/۰۶، ۷۴/۶۷ و ۷۸/۶ درصد محاسبه گردید. در بررسی پروفیل سطح آب در سه ترکیب‌بندی بیم‌های متقاطع، ترکیب‌بندی ۱ (C1) روند منظم‌تری در توزیع عمق جریان در مقطع عرضی کانال و در مقاطع ۰/۳ تا ۲ متر از انتهای سیستم سازه‌ای دارد. در بررسی خروجی از شبیه‌سازی مدل برای بار آبی کل (THH) و نقطه انتهای استهلاک انرژی یا پرش هیدرولیکی (Γ_{*j}) در ترکیب‌بندی C1، این نقطه بعد از بیم سوم ($N=5$) تشخیص داده شد که جریان پس از عبور از رو و زیر آن با خطوط متمرکز امتدادیافته است.

نتیجه‌گیری: بر اساس شاخص بار آبی کل و کنترل استهلاک انرژی، شرایط ترکیب‌بندی C1 قابلیت کنترل استهلاک درون سیستم سازه و قبل از خروج جریان از سیستم سازه زبری با بیم‌های متقاطع را در شرایط مطلوب‌تری داراست.

استناد: سجادی، سید محسن؛ اسمعیل زاده فریدنی، فرشاد؛ و احدیان، جواد. (۱۴۰۴). مطالعه عددی افت انرژی و طول پرش هیدرولیکی نوع S در استفاده از بیم‌های

متقاطع به‌عنوان زبری در بازشدگی ناگهانی. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۱)، ۹۷-۷۸.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11522.1148>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

در تخلیه سیلاب‌ها، نحوه کنترل انرژی جریان در سازه‌های هیدرولیکی تابع پارامترهای بسیاری است. در این شرایط فهم صحیح از شرایط فیزیکی حاکم بر پدیده می‌تواند به بهبود عملکرد سازه‌های هیدرولیکی کمک شایانی نماید (سجادی و همکاران^۱، ۲۰۲۴؛ فتحی مقدم و همکاران^۲، ۲۰۲۴؛ احدیان و همکاران^۳، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴؛ و نوروزی و احدیان، ۱۳۹۵). در حوضچه‌های آرامش پایین‌دست سرریزها بخصوص سرریزهای اوجی سدها، تشکیل پرش هیدرولیکی روی بستر صاف، بدلیل طول بیشتر آن مقرون بصرفه نبوده، در عمل برای کنترل پرش هیدرولیکی در حوضچه، تمهیداتی از قبیل استفاده از بلوک در ابتدا، میانه و انتهای حوضچه به‌عنوان یک راهکار عملی در نظر گرفته می‌شود. کاهش طول پرش و ابعاد حوضچه، هدف اصلی این تمهیدات است (چاو^۴، ۱۹۵۹). باتوجه‌به اینکه کاربرد پرش هیدرولیکی برای جلوگیری از فرسایش کانال پایین‌دست و استهلاک انرژی اضافی جریان است، بنابراین مکانی که پرش در آن به وقوع می‌پیوندد باید در برابر کاویتاسیون و فرسایش در سرعت‌های بالای جریان مقاوم باشد. برای جلوگیری از کاویتاسیون، باید کف بستر صاف باشد یا عناصر کنترل پرش هیدرولیکی طوری قرار گیرند که سطح فوقانی آن‌ها، هم سطح کف بالادست کانال باشد و مانعی در برابر جریان ایجاد نکنند. پرش تشکیل شده روی این بستر، پرش هیدرولیکی روی بستر زبر نامیده می‌شود (اید و راجاراتنام^۵، ۲۰۰۲). زبری بستر می‌تواند به شکل زبری‌های ممتد به‌صورت موج دار سینوسی، مثلثی، مستطیلی و دوزنقه‌ای و یا زبری‌های غیرممتد با مقطع دایره‌ای، لوزی، مستطیلی، شش ضلعی و حتی سنگ‌چین باشد. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرای ناگهانی باتوجه‌به موقعیت پنجه پرش که وابسته به عمق پایاب است، به چهار نوع پرش تقسیم بندی می‌شود (برمن و هگر، ۱۹۹۳). پرش فرار^۶ پرشی است که کاملاً در پایین دست مقطع عریض اتفاق می‌افتد، پرش گسسته^۷ در این پرش، پنجه بین محل تغییر مقطع واگرا و نقطه‌ای که امواج عرضی دیواره‌های کانال پایین دست را قطع می‌کند قرار دارد، پرش انتقالی^۸ پرشی است که پنجه پرش در بالادست مقطع واگرا و عمود بر خط مرکزی کانال و بخشی از آن در پایین دست رخ می‌دهد و پرش کلاسیک^۹ پرشی است که تمام طول پرش (عمق اولیه و مزدوج پرش) در بالادست محل تغییر مقطع واگرا رخ می‌دهد. پرش نوع S در حقیقت حالت بحرانی پرش نوع T بوده و زمانی رخ می‌دهد که پنجه پرشی به مقطع انبساط می‌رسد. مطابق نظر برمن و هگر^{۱۰} (۱۹۹۴) در حالت تئوری وقتی که $X_1=0$ است (فاصله بین پنجه پرش و انبساط)، در بسیاری مکان‌ها امتداد پایه‌های هدایت‌کننده پایین‌دست از سد می‌تواند نادیده گرفته شود (کارولو و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۷) و سپس پرشی نوع T به پرشی S تبدیل می‌گردد پرشی نوع S طول پرش بزرگتری نسبت به نوع T دارد؛ بنابراین دارای عمق پایاب کمتر، عدم تقارن جریان بیشتر و آبستتگی بیشتر از پرش نوع T است. طراحی حوضچه با امکان وجود پرش S دارای شرایط بحرانی بیشتر بوده و می‌بایست در حالت مطمئن تری از سازه آبی بالا دست حوضچه لحاظ شود. وجود پرش نوع S در انبساط نامتقارن حوضچه می‌تواند جریان نامتقارن و آبستتگی را افزایش داده و اعماق مزدوج، افت انرژی و طول حوضچه را در مقایسه با حالت انبساط متقارن تغییر دهد (کاروالهو و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۸)؛ لذا در این تحقیق تمرکز بیشتر بر روی این نوع پرش (S-Type) است.

1. Sajjadi, et al
2. Fathi-Moghadam et al
3. Ahadiyan et al
4. Chow
5. Ead and Rajaratnam
6. R-jump or repelled hydraulic jump
7. S-jump or spatial hydraulic jump
8. T-jump or transitional hydraulic jump
9. Classical Hydraulic Jump
10. Bremen and Hager
11. Carollo et al
12. Carvalho et al

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات ارائه شده است.

۱. مطالعات داخلی

امروزه استفاده از خصوصیات جت‌های متقابل و همچنین جت‌های جانبی برای کنترل این نوع پرش‌ها بسیار کاربردی شده است. در این راستا برای کنترل پرش هیدرولیکی نرمال و استفاده از فناوری‌های نوین می‌توان به تحقیق احدیان و ورشوساز (۱۳۹۷) و خدیری میرقاید و همکاران (۱۳۹۷) اشاره نمود که با استفاده از توپ‌های شناور قابل انعطاف تحقیق جامعی را انجام دادند. هوشیاری پور و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی پژوهش‌های انجام شده، باتوجه به اختصاص یافتن هزینه زیادی از طراحی و اجرای سدها به طرح سرریز و حوضچه آرامش آن، بیان کردند که استفاده از مدل‌های عددی در جهت کاهش هزینه و شبیه‌سازی جریان در حالت‌های مختلف می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد.

عدالی و همکاران (۱۴۰۰) استفاده از سیستم جت هوا همراه با اثر زبری را مورد بررسی قرار دادند. محجوبی و همکاران (۱۴۰۳) در خصوص استفاده از سیستم جت‌های چندگانه به کنترل پرش هیدرولیکی پرداختند. آنها در تحقیق خود از ۳ ترکیب بندی سیستم جت با هدف به کارگیری حداقلی و سه قطر جت استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که سیستم جت در شرایط بحرانی تر بسیار کارا بوده است.

احدیان و همکاران (۱۴۰۳) در یک مقطع واگرای تدریجی و مطالعه آزمایشگاهی تأثیر جت مستغرق بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن را بررسی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که وجود جت مقابل به صورت مستغرق می‌تواند نوسان فشار وارده بر کف حوضچه‌های آرامش را بکاهد. نتایج دیگر آنها 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.

۲. مطالعات خارجی

راجاراتنام^۱ (۱۹۶۸) فرضیات بلانگر را با اضافه نمودن نیروی برشی بستر به دست آورد. اگر نیروی برشی بستر F_τ باشد، می‌توان نشان داد که ε (ضریب نیروی برشی بستر) فقط تابعی از عدد فرود است. اگر مقدار نیروی برشی طبق تحقیقات راجاراتنام (۱۹۶۸) به صورت مضربی از نیروی هیدرواستاتیکی قبل از پرش به صورت $F_\tau = \varepsilon(0.5\gamma b_1 y_1^2)$ بیان شود، با اعمال این نیرو در معادله مومنوم می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{y_2}{y_1}\right)^3 - \left(\frac{y_2}{y_1}\right) (1 - \varepsilon + 2Fr_1^2) + 2Fr_1^2 = 0 \quad (1)$$

اگر صفر باشد، رابطه (۱) به معادله بلانگر تبدیل می‌شود. نتایج ایشان نشان داد که اختلاف مقدار پیش‌بینی شده $\frac{y_2}{y_1}$ طبق معادله بلانگر و رابطه (۱) با افزایش عدد فرود افزایش می‌یابد. همچنین رابطه (۲) را برای محاسبه ضریب تنش برشی در بستر صاف ارائه نمود.

$$\varepsilon = 0.0082 (Fr_1^2 - 1)^{1.535} \quad (2)$$

هگر و فلک^۲ (۱۹۸۴) پرش هیدرولیکی را روی بستر زبر در اعداد فرود ۳ تا ۹ روی ۵ بستر زبر شامل دو زبری نواری (میل‌های مربعی شکل موازی که به طور عمودی در جهت جریان و در یک ردیف قرار گرفته بودند) و سه زبری طبیعی (با ذرات کاملاً فشرده ماسه به ارتفاع ۳/۲ تا ۱۱/۳ میلی‌متر و زبری نسبی ۰ تا ۰/۹) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که زبری می‌تواند عمق ثانویه و طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهد و این کاهش به عدد فرود اولیه جریان و زبری نسبی بستگی دارد.

ما و همکاران^۱ (۲۰۰۱) اولین مطالعه روی رفتار جریان در کانال‌های زبر با بیم‌های متقاطع را انجام داد. ایشان کانال‌هایی با عناصر مربعی را مورد آزمایش قرار داد و همچنین پیشنهاد داد که جهت تضمین رژیم جریان آشفته، هندسه خاصی می‌بایست استفاده گردد. طبق نظر ایشان بیم‌های متقاطع به‌عنوان مقطع کنترل عمل کرده که موجب پرش‌های هیدرولیکی که منجر به افت انرژی بالا می‌شوند و توالی چرخشی سرریز جریان می‌گردد. ایشان نشان دادند، اگر یک جریان آشفته در طول کانال برقرار باشد، سرعت در خروجی کانال زیر سرعت بحرانی خواهد بود، زیرا جایی در طول بیم‌های متقاطع جریان به‌صورت نظری (تئوریک) به عمق بحرانی خواهد رسید. ما و همکاران (۲۰۰۱) برای دستیابی به این نوع رژیم، میزان $\frac{a}{L}$ را بین $\frac{1}{5}$ و 10 فرض نمود که در آن a ، ارتفاع بیم‌ها و L ، فاصله بین بیم‌های متقاطع است و رابطه (۳) را به‌عنوان تابعی از شیب (θ) و عمق بحرانی h_c جهت محاسبه ارتفاع بیم‌های متقاطع ارائه داد:

$$\frac{a}{h_c} = \frac{1}{(3-3.7\tan\theta)^{2/3}} \quad 8.5 < a/L < 10 \quad (3)$$

پرش هیدرولیکی روی بیم‌های متقاطع توسط کارالیو و همکاران (۲۰۰۸) در کانال‌های افقی و راجاراتام (۱۹۶۸)، اوتسو و همکاران^۲ (۱۹۹۱)، هاگر و لی^۳ (۱۹۹۲) و قادری و همکاران^۴ (۲۰۲۰) در کانال‌های شیب‌دار مورد مطالعه قرار گرفته است. حاجی علی گل^۵ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی آزمایشگاهی الگوهای جریان در کانال‌های واگرایی ناگهانی با به‌کارگیری تیرک‌های متقاطع برای کنترل اثر پرش نامتقارن نوع S پرداختند. در این مطالعه، آزمایش‌های بیشتری بر روی سیستم تیرک متقاطع پیشنهاد شده توسط اسکورزینی و همکاران^۶ (۲۰۱۶) انجام شد تا اطلاعات بیشتری در مورد عملکرد سیستم تحت شرایط هندسی و هیدرولیکی متغیر، از جمله اعداد فرود بیشتر و نسبت‌های مختلف انبساط به دست آید. عملکرد هندسه‌های مختلف این سیستم ابتدا با در نظر گرفتن یکنواختی جریان و میانگین سرعت طولی نزدیک بستر کانال، با استفاده از دو عامل β_b و $\beta_b \cdot v_{mb}^2$ طبق رابطه (۴) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

$$\beta_b = \frac{\int_0^B v_b(x) \cdot |v_b(x)| dx}{B \cdot v_{mb}^2} \quad (4)$$

که در آن: B : عرض کانال، $v(x)$ پروفیل‌های سرعت در مقطع اندازه‌گیری و v_{mb} مقدار میانگین $v(x)$ است. طهماسبی پور و همکاران^۷ (۲۰۲۴) کنترل پرش نامتقارن از نوع T را با استفاده از سیستم ترکیبی جت و زبری سینوسی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها برای کنترل این نوع پرش‌ها بسیار قابل توجه و اثربخش بود. آنها نشان دادند حضور همزمان جتهای کفی و عناصر زبری سینوسی باعث کاهش ۸۱ درصدی طول نسبی پرش T شکل می‌گردد.

در تحقیقی دیگر حاجی علی گل و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی و خصوصیات تلاطمی ناشی از سازه‌های بیم جداکننده در کف برای کنترل پرش هیدرولیکی پرداختند. آنها تنش‌های رینولدزی و شدت تلاطمی جریان و همچنین نرخ کاهش انرژی جنبشی تلاطمی در اثر این سازه‌ها را بررسی نمودند. مهمترین نتایج آنها نشان داد که اثر عمق پایاب بر برخ پارامترهای تلاطمی بسیار مهم است. آرایش مناسب طراحی حوضچه‌های آرامش بر این روش را نیز این محققین پیشنهاد دادند.

مروری بر مطالعات گذشته نشان داد که به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری در مقاطع واگرایی ناگهانی به‌طور قابل توجهی مقدار انرژی تلف‌شده در پرش هیدرولیکی نامتقارن را افزایش می‌دهند. علی‌رغم سابقه طولانی تحقیقات آزمایشگاهی صورت‌گرفته در این زمینه، به شبیه‌سازی عددی آن کمتر پرداخته شده است. با توجه به اهمیت حوضچه‌های آرامش و پرهزینه و زمان بر بودن مدل‌های آزمایشگاهی، به‌کارگیری مدل‌های عددی جهت شبیه‌سازی پدیده در موقعیت‌های مختلف و کاهش هزینه

1. Ma et al
2. Ohtsu et al
3. Hager and Li
4. Ghaderi et al
5. Hajjaligol et al
6. Scorzini et al
7. Tahmasbipour et al

و زمان تأثیر زیادی دارند؛ بنابراین در این تحقیق شبیه‌سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن در مقاطع واگرای ناگهانی و تأثیر به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع در پایداری پرش به‌صورت سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام شده است.

روش پژوهش

به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق و مدل‌سازی عددی پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها توسط حاجی علی گل (۱۴۰۱)، در یک فلوم واقع در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فلوم مورد استفاده شامل یک کانال افقی مستطیلی به طول ۱۲ متر، عرض ۱ متر و عمق ۰/۸۷ متر، دارای جنس کف فلز و دیواره‌ها از جنس شیشه و تجهیزات مربوط به آن، سیستم گردش آب (پمپ، لوله‌ها و مخازن)، سرریز اوجی، واگرایی ناگهانی با نسبت برابر با ۰/۶۷ و سازه‌های بیم‌های متقاطع در ابعاد هندسی مختلف به‌عنوان زبری بوده است. بنا بر هدف این تحقیق، بررسی پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در حوضچه‌های آرامش با مقاطع واگرای ناگهانی که با استفاده از ترکیب‌بندی شامل: تیرک‌های افقی در زوایای مختلف (θ)؛ ارتفاع تیرک‌های متفاوت (h_{beam})؛ تعداد مختلف (N)؛ فاصله بین تیرک‌های متوالی (S)؛ طول گستردگی تیر در جهت جریان (L) و فواصل مختلف از مقطع واگرا (P) به‌عنوان پارامترهای هندسی سازه تعریف گردید. در شکل شماره ۱ پارامترهای مورد نظر در این تحقیق آورده شده است.

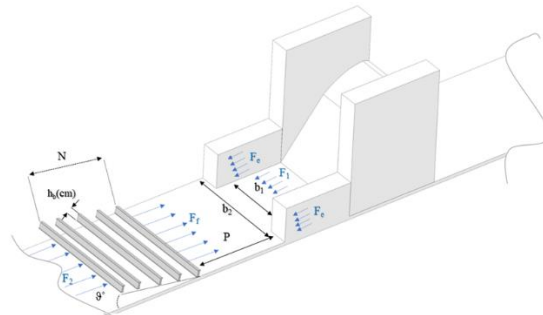
بر اساس تحلیل‌های ابعادی در مطالعه حاجی علی گل و همکاران (۲۰۲۱)، از مجموع آزمایش‌ها، ترکیب‌بندی‌های هندسی و هیدرولیکی انجام شده روی شرایط یکنواختی جریان و میانگین سرعت بستر بر اساس پارامتر β_b (ضریب تصحیح مومنتوم اصلاح شده در نزدیکی بستر مطابق رابطه (۴)) و باتوجه به اثربخشی مشاهده شده سیستم بیم‌ها، ۳ هندسه بهینه بشرح زیر انتخاب شد:

Configuration 1: $P=0.8$ m, $N=5$, $\theta=11^\circ$, $h_b=0.05$ m.

Configuration 2: $P=0.6$ m, $N=3$, $\theta=11^\circ$, $h_b=0.07$ m.

Configuration 3: $P=0.8$ m, $N=3$, $\theta=15^\circ$, $h_b=0.05$ m.

از این‌رو در تحقیق حاضر به بررسی عددی پرش نامتقارن نوع S و به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع جهت پایداری پرش نامتقارن نوع S برای ۳ هندسه بهینه مذکور با درصدهای ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد عمق پایاب آزمایش‌ها مرجع ($0/7h_s$ ، $0/8h_s$ ، $0/9h_s$ ، h_s)، در اعداد فرود آزمایشگاهی ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ و با استفاده از مدل‌سازی عددی Flow-3D پرداخته شده است.



شکل ۱. پارامترهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در مقطع واگرای ناگهانی با بیم‌های متقاطع مورد استفاده در تحقیق

۱. تعریف مشخصات مدل آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی عددی

مراحل و تعریف مشخصات مدل آزمایشگاهی به کار گرفته شده در این تحقیق، جهت انجام شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D انجام گردید. با توجه به ابعاد کانال و سرعت جریان و همچنین بررسی اطلاعات تجربی شبیه‌سازی‌های قبلی و مطالعات عددی محققین دیگر در رابطه با موضوع مورد مطالعه این تحقیق، در ابتدا مدت زمان شبیه‌سازی جریان به صورت محافظه کارانه ۱۸۰ ثانیه در نظر گرفته شد. سپس مشاهده شد که جریان در حدود ۳۰ تا ۴۰ ثانیه پس از آغاز شبیه‌سازی پایدار شده و پارامترهای مورد بررسی جریان با گذشت زمان تغییرات قابل توجهی ندارند؛ بنابراین مدت زمان شبیه‌سازی‌ها به ۶۰ ثانیه کاهش یافت و نتایج در این زمان ثبت و بررسی شد. از پارامترهای مختلف پیش‌فرض در مدل Flow-3D که برای هر شرایط هیدرولیکی و نوع پدیده قابل تغییر است، در تعریف فیزیک مسئله می‌توان استفاده کرد. با توجه به شرایط مشاهداتی آزمایشگاهی (تحقیقات حاجی علی گل و همکاران، ۱۴۰۱)، ماهیت پرش نامتقارن نوع S و وجود آشفتگی به عنوان عامل اصلی اغتشاش جریان، در این تحقیق زبانه‌های مربوط به Gravity and Non-inertial Reference Frame و Viscosity and Turbulence برای شبیه‌سازی‌ها فعال گردید. شتاب گرانش برابر با $9/81 \text{ m/s}^2$ در خلاف جهت محور Z و در راستای عمق کانال در نظر گرفته شد. برای انجام شبیه‌سازی عددی، هندسه مدل آزمایشگاهی در اتوکد ترسیم و سپس به عنوان Stl به محیط نرم‌افزار Flow-3D منتقل گردید. نمایی از هندسه ایجاد شده شامل سرریز اوجی و مقطع واگرای ناگهانی به همراه سیستم بیم‌های متقاطع در محیط اتوکد و به صورت فایل Stl برای استفاده در مدل خروجی گرفته شد. در این تحقیق سه حالت مختلف مش‌بندی یعنی دارای تعداد سلول کم (مش درشت)، متوسط (مش متوسط) و زیاد (مش ریز) در نظر گرفته شد. مقایسه مش‌بندی‌های مختلف در جدول (۱) ارائه گردیده است.

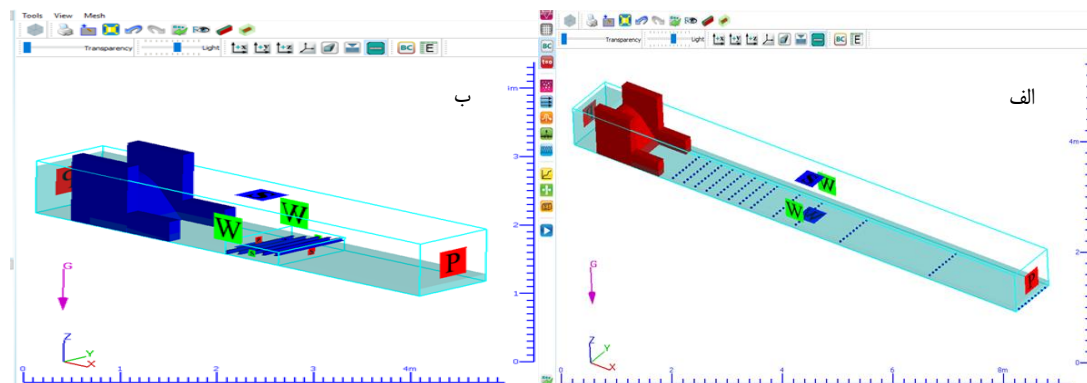
جدول ۱. مقایسه مش‌بندی‌های گوناگون در تعیین مش‌بندی ایده‌آل مدل عددی

شماره مش	تعداد سلول‌ها	مدت زمان شبیه‌سازی (ساعت، دقیقه، ثانیه)	زمان پایداری جریان (ثانیه)	زمان ثبت نتایج (ثانیه)	R ²	MAE	RMSE
۱	۱۳۵۵۲۰۰	۳۳hr ۰۵min ۲۹Sec	۴۲	۶۰	۰/۹۳۴	-۰/۰۱۰	-۰/۰۱۲
۲	۹۹۰۰۰۰	۲۲hr ۴۲min ۷sec	۳۴	۶۰	۰/۹۲۳	-۰/۰۱۴	-۰/۰۱۹
۳	۷۲۹۰۰۰	۱۸hr ۰۲min ۱۹Sec	۲۵	۶۰	۰/۸۹۷	-۰/۰۳۹	-۰/۰۴۶

مطابق جدول (۱) ابتدا یک مدل با مش‌بندی شماره ۲ و مدل آشفتگی RNG توسط نرم‌افزار Flow-3D شبیه‌سازی شد. ضریب انطباق به دست آمده از این مش‌بندی دارای مقدار مناسبی می‌باشد. در مرحله بعد، مدل‌هایی با مش‌بندی‌هایی مشابه مش‌بندی ۳ ولی با سلول‌های ریزتر (مش ۱) و درشت‌تر (مش ۳) شبیه‌سازی شدند. تعداد سلول‌های مش ۱ حدود ۳۷ درصد بیشتر از مش ۲ است. مقادیر پارامترهای MAE و RMSE در مش ۱ و ۲ با اختلاف حدود ۳۰ درصد و کمتر از ۱ می‌باشند. ضریب انطباق مش‌های ۱ و ۲ هم حدود ۱ درصد اختلاف دارند. با این حال مدت زمان تقریبی شبیه‌سازی مش ۲ با مش ۱ بیش از ۳۰ درصد کمتر است.

با این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که ریزتر کردن سلول‌ها نسبت به مش‌بندی ۲، تأثیر چندانی در افزایش دقت شبیه‌سازی نداشته و فقط مدت زمان تحلیل را به شدت افزایش می‌دهد و مش ۲ مناسب‌تر از مش ۱ و ۳ می‌باشد. به همین دلیل مش ۲ با ۹۹۰۰۰۰ سلول شامل ۴۹۵ سلول در راستای طول، ۵۰ سلول در راستای عرض و ۴۰ سلول در راستای عمق کانال به عنوان مش بهینه انتخاب شده و مدل آشفتگی ایده‌آل با آن تعیین گردید.

اگرچه درشت بودن مش، سرعت تحلیل را زیاد می‌کند؛ ولی ممکن است دقت مناسبی نداشته باشد (هوشیاری پور و همکاران، ۱۳۹۸). ریزتر کردن مش‌ها (افزایش تعداد سلول‌ها) در اغلب مواقع دقت را افزایش می‌دهد؛ اما مدت‌زمان شبیه‌سازی را زیاد می‌کند؛ بنابراین باید با سعی و خطا مش‌بندی بهینه‌ای را انتخاب کرد که علاوه بر داشتن دقت کافی، مدت‌زمان تحلیل نیز قابل قبول باشد. در تحقیق حاضر با هر یک از مش‌بندی‌های مذکور، یک شبیه‌سازی برای تشخیص میزان دقت انجام شد. شرایط سه شبیه‌سازی اعم از مدت‌زمان تحلیل، شرایط اولیه و مرزی و مدل آشفتگی یکسان در نظر گرفته شد و تفاوت فقط در تعداد سلول‌های مش بوده است. در این شبیه‌سازی‌ها مدل آشفتگی RNG به کار گرفته شد. در نهایت برای تشخیص میزان دقت هر یک از شبیه‌سازی‌ها و انتخاب مش‌بندی بهینه، شاخص‌های ضریب انطباق، میانگین خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها محاسبه گردید. شرایط مرزی و اولیه در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌های این تحقیق با نرم‌افزار Flow-3D شامل، شرط مرزی در ورودی کانال (X_{min}): فشار بر اساس عمق سیال ورودی، شرط مرزی در خروجی (X_{max})، فشار بر اساس عمق سیال خروجی، شرط مرزی کف کانال (Z_{min}) و جداره‌های کانال (Y_{min} و Y_{max})، دیوار، شرط مرزی سطح جریان (Z_{max}): تقارن، شرط مرزی سیستم بیم‌های متقاطع در تمام وجوه مش: تقارن، شرط اولیه در ابتدای کانال و قبل از سرریز اوجی برای هر شبیه‌سازی: عمق آب پشت سرریز در شرایط آزمایشگاهی، شرط اولیه بعد از سرریز: عمق آب در پایاب کانال و متناظر با هر آزمایش. نمونه‌ای از شرایط مرزی و عمق اولیه برای شبیه‌سازی آزمایش‌های شاهد (بدون استفاده از بیم در کانال اصلی) و آزمایش‌های با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع در شکل‌های (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲. الف- شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های شاهد و ب- شرایط مرزی و اولیه برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع

لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی‌های عددی این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D، محورهای x ، y و z به ترتیب در راستای طول، عرض و عمق کانال در نظر گرفته شده‌اند. نحوه توزیع فشار نیز به صورت فشار هیدرواستاتیک در جهت عمق کانال انتخاب شده است.

یافته‌های پژوهش

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پرش نامتقارن نوع S در اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ در پرش نامتقارن با به‌کارگیری سیستم بیم‌های متقاطع به‌عنوان زبری برای سه ترکیب‌بندی بهینه انتخاب شده از آزمایش‌ها در عمق‌های مختلف پایاب با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D بررسی گردید. به این صورت که ابتدا جهت صحت سنجی مدل عددی، پروفیل طولی و توزیع سرعت عمق جریان با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی برداشت شده توسط حاجی علی گل (۱۴۰۱) مقایسه گردید. تغییرات پروفیل طولی و عرضی سطح جریان و راندمان آن در افت انرژی جریان و ارتفاع هیدرولیکی کل در کانال واگرایی ناگهانی با اعداد فرود و اعماق

پایاب مختلف در پرش نامتقارن نوع S و باوجود سیستم بیم‌های متقاطع در بستر کانال با استفاده از نتایج مدل عددی مقایسه گردید. پرش هیدرولیکی در مقاطع واگرایی ناگهانی با شرایط جریان ورودی که عبارت‌اند از عمق اولیه پرش y_1 ، عدد فرود جریان ورودی F_{r1} و پنجه پرش (فاصله عمق اولیه پرش از محل تغییر مقطع) توصیف می‌شود. در مقاطع واگرایی ناگهانی متغیر اصلی عمق پایاب (y_t) بوده و بسته به نسبت عمق مزدوج به عمق اولیه $(Y = \frac{y_2}{y_1})$ برای هر نسبت بازشدگی $B = \frac{b_1}{b_2}$ که B نسبت بازشدگی و b_1 و b_2 به ترتیب عرض کانال بالادست و پایین‌دست است) و هر عدد فرودی پنجه پرش به سمت بالادست و یا پایین‌دست انتقال می‌یابد.

برمن و هاگر (۱۹۹۳) در مطالعه آزمایشگاهی در خصوص پرش نوع T و S در محدوده اعداد فرود اولیه $2/5$ تا 10 با عمق اولیه 0.13 تا 0.06 نشان دادند که مقدار نسبت اعماق مزدوج به عدد فرود اولیه، نسبت بازشدگی مقطع و محل پنجه پرش (X_1) وابسته است و تأثیر B و X_1 در پارامتری بنام ψ که در پرش واگرایی ناگهانی نشان‌دهنده حساسیت یا تأثیرپذیری پنجه پرش نسبت به تغییرات عمق آب پایین‌دست است. برمن و هاگر (۱۹۹۳) برای این پارامتر را برای پرش نوع T رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$\psi = (1 - \sqrt{B}) \cdot [1 - \text{tgh}(1.9X)] \quad (5)$$

در این رابطه X پارامتر بی بعد پنجه که به وسیله محل پرش در بالادست مقطع واگرا تعریف می‌شود و عبارت است از:

$$X = \frac{x_1}{L_r} \quad (6)$$

مقدار x_1 فاصله از پنجه پرش است که از محل واگرایی در خلاف جهت جریان اندازه‌گیری می‌شود. رابطه فوق برای پرش نوع S، به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$x_1 = 0 \rightarrow X = 0 \rightarrow \psi = 1 - \sqrt{B} \quad (7)$$

برمن و هاگر (۱۹۹۳) برای راندمان پرش که پارامتر حساسیت پنجه (η) در آن دخیل است روابط زیر را ارائه نمودند:

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1} (1 - \psi) \right]^2 \text{ for Tjump} \quad (8)$$

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2B}}{Fr_1} \right]^2 \text{ for Sjump} \quad (9)$$

بر اساس مطالعات برمن و هاگر (۱۹۹۳)، برای پرش‌های نوع S و T در کانال واگرایی ناگهانی و همچنین تطبیق آزمایش‌های انجام شده با نسبت بازشدگی ناگهانی $B = 0.67$ و همچنین اعداد فرود اولیه $7/4$ ، $8/7$ و $9/5$ جهت تعیین طول غلطابی و طول پرش، پارامترهای راندمان پرش برای مقادیر اندازه‌گیری شده، مقادیر ψ و η به عنوان پارامترهای حساسیت یا تأثیرپذیری پنجه و راندمان پرش در مقطع واگرایی ناگهانی محاسبه گردید که در جدول (۲) برای پرش S آورده شده است.

جدول ۲. محاسبات پارامتر حساسیت پنجه و راندمان پرش در پرش نوع S آزمایش شده

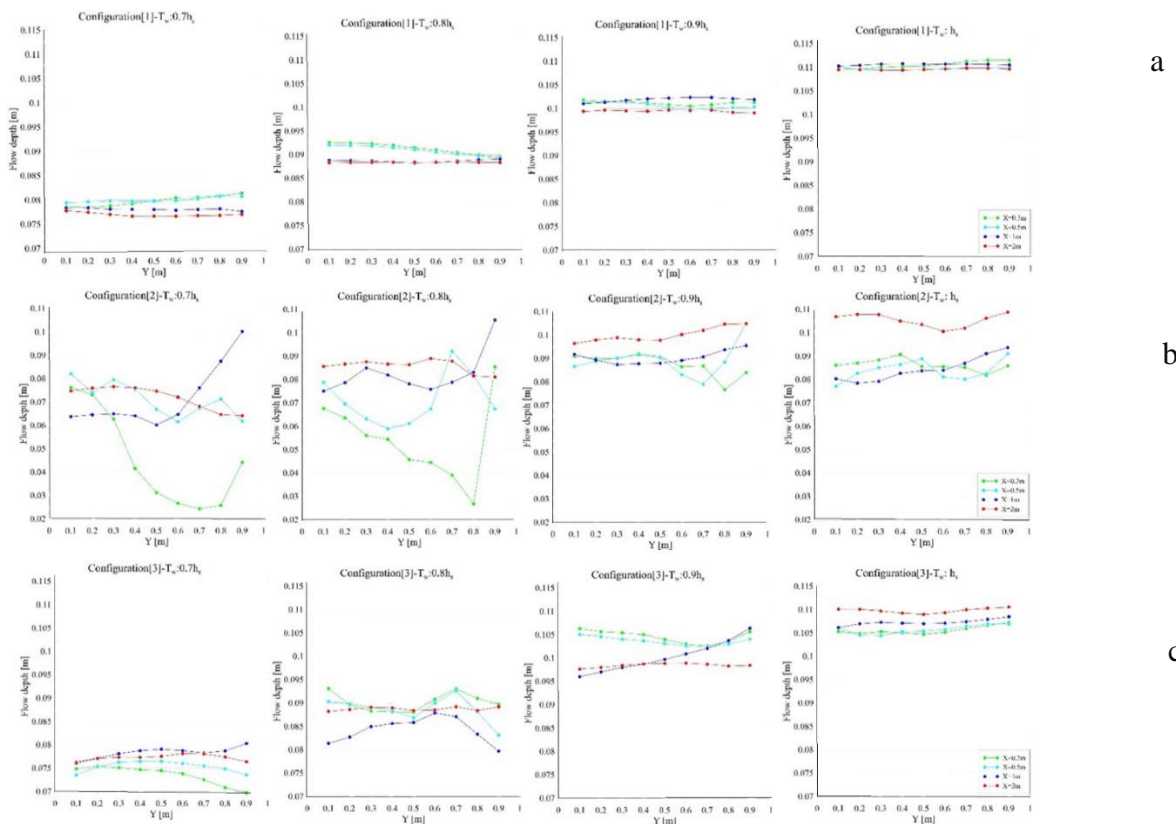
η	ψ	X	L_r	B	Fr_1
۰/۷۷۱۱۴۶	۰/۱۸۱۴۶۵	.	۷	۰/۶۷	۹/۵
۰/۷۵۱۵۹۳	۰/۱۸۱۴۶۵	.	۶/۸	۰/۶۷	۸/۷
۰/۷۱۱۶۱	۰/۱۸۱۴۶۵	.	۶/۴۵	۰/۶۷	۷/۴

پارامتر حساسیت به دلیل ورود پنجه پرش در پرش نوع T به درون مقطع واگرایی دارای نمود بیشتری است و به همین دلیل در شرایطی که روابط برای پرش نوع S بیان می‌گردد دارای مقدار X (فاصله بازشدگی تا پنجه پرش) به صورت مقدار صفر لحاظ

می‌گردد. این مطلب موید این مطلب است که پرش نوع S تنها در یک حالت عمق پایاب d_s می‌تواند تشکیل گردد. این موضوع در بررسی راندمان پرش در پرش مورد بررسی (نوع S) که قابلیت تشکیل در پایاب سدهایی که سرریز آنها به صورت اوجی طراحی گردیده و در انتهای سرریز، مقطع تنگ شده تا بخشی از مسیر ادامه داشته و سپس به کانال پایاب متصل می‌شود، دارای اهمیت فراوانی است. در این شرایط بسته به عمق پایاب و اعداد فرود که عمدتاً مقادیری بالاتر از ۶ و تا ۱۰ است و به دلیل وجود بازشدگی ناگهانی مقطع، یکی از پرش‌های نوع S یا T را موجب می‌گردد که باتوجه به آزمایش‌های انجام شده (حاجی علی گل ۱۴۰۱)، طول پرش در نوع S بلندتر و با اندازه‌گیری‌های انجام شده برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷، ۹/۵ به ترتیب به میزان ۲/۳۸، ۲/۶۳ و ۲/۰۸ برابر بزرگ‌تر از طول پرش در نوع T اندازه‌گیری گردیده است.

۱. تحلیل نتایج پروفیل سطح آب

با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مطابق آنچه برای استفاده از مدل آشفستگی RNG بیان گردید، تحلیل پروفیل سطح آب با استفاده از بررسی عمق جریان در مقاطع عرضی و طولی جریان در ترکیب‌بندی‌های بهینه انجام گردید. مقاطع عرضی بر اساس برداشت‌های آزمایشگاهی حاجی علی گل (۱۴۰۱) در مدل وارد گردید. در این تحقیق پارامترهای مورد بررسی برای صحت سنجی، یک‌بار پروفیل عمق آب در آزمایش شاهد و با عدد فرود ۷/۴، بر اساس معادلات آشفستگی مختلف، در فاصله طولی از انتهای واگرایی تا پایاب و در فاصله ۰/۱ متری از دیواره کناری کانال در نظر گرفته شد. یک‌بار نیز پروفیل عمقی سرعت برای سه ترکیب‌بندی بهینه و در وسط کانال و در فاصله ۲ متری پس از سازه با تعیین ضریب انطباق، میانگین خطاها و مجذور میانگین مربعات خطاها به کار گرفته شده است که پس از استخراج مقادیر، محاسبه ضریب انطباق با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گردید. برای عرض ۱ متر کانال و به فواصل هر ۰/۱ متر در نظر گرفته شد که برای هر سه ترکیب‌بندی بهینه آزمایش‌ها و درصد‌های عمق پایاب در شکل (۳) (a تا c) آورده شده است.

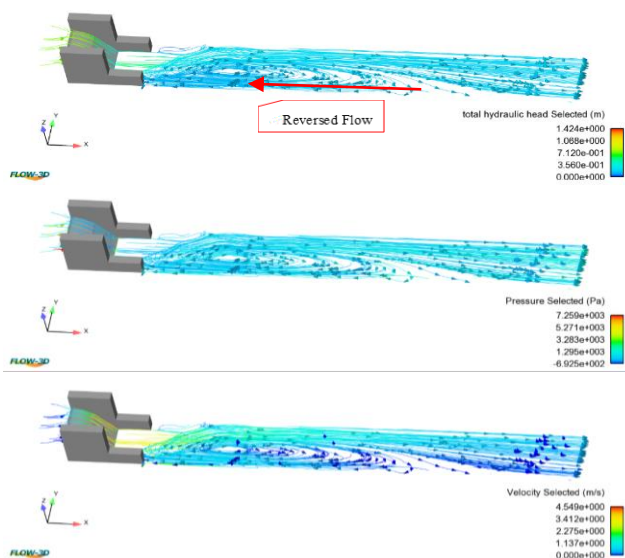


شکل ۳. نتایج عمق جریان در مقطع عرضی به فواصل ۰/۱ متر و فواصل طولی ۰/۳، ۰/۵، ۱ و ۲ متر بعد از سازه برای سه ترکیب‌بندی بهینه و درصد‌های مختلف پایاب

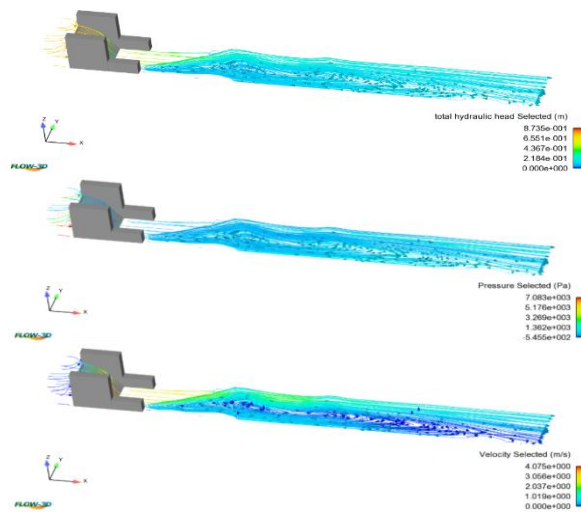
همان طور که در شکل (۳) -a مشاهده می‌شود، ترکیب بندی ۱ (Configuraion 1 در شکل ۳-a) روند منظم تری در توزیع عمق جریان در مقطع عرضی کانال و در مقاطع ۰/۳ تا ۲ متر دارد. در ترکیب بندی ۲ و خصوصاً مقطع ۰/۳۰ متری از انتهای سازه (Y=0.30m)، روند بسیار نامنظم است و وجود اغتشاش جریان از دوطرف کناره‌ها و اثر برخورد به بیم کاملاً مشهود است. همچنین مشاهده می‌شود در توزیع عمق در عرض کانال تنها در ترکیب بندی ۱ عمق جریان در فاصله ۲ متری از سازه به مرور کاهش یافته است. این کاهش بر اساس یک روند خطی از مقدار ۲/۸۸، ۲/۰۹، ۱/۷۴ و ۰/۶۱۱ درصد به ترتیب برای 0/7hs، 0/8hs، 0/9hs و hs متغیر است و نشان می‌دهد هر چه به سمت عمق پایاب اصلی (hs) پیش می‌رویم عمق جریان از ۰/۳ متر به سمت ۲ متری جریان تا انتها (yt) یکنواخت تر می‌شود؛ لذا می‌توان گفت اثر چرخش جریان در این ترکیب بندی کمتر بوده و سازه‌های استفاده شده، در ترکیب بندی ۱ توانایی بیشتری در یکنواختی جریان و شکستن آبشارهای انرژی (Cascades) دارند. با نگاهی به شرایط هندسی سازه ترکیب بندی ۱ ($\theta = 11$, $h_b = 0.05$, $N = 5$, $P = 0.8$ m) و تفاوت بارز آن نسبت به سایر ترکیب بندی‌ها می‌توان اثر تعداد بهینه بیم‌ها را در آن نسبت به ترکیب بندی ۲ و ۳ موثر دانست. تعداد بیم بیشتر (۵ در مقابل ۳) باعث می‌گردد تا غلطابه‌ها در بین بیم‌ها و با عبور از زیر و روی بیم‌های متقاطع با زاویه بیشتر (θ) عبور نموده و در نتیجه انرژی بیشتری از جریان را مستهلک نموده و لذا با گذر از آخرین بیم تا مقطع ۲ متری شرایط جریان آرام‌تری را شاهد باشیم که در مقطع ۲ متر بعد از سازه، در کلیه مقاطع (از ۰/۳۰ تا ۲ متر بعد از سیستم سازه) تقریباً یکنواخت گردد. (شکل (۴) -a - ترکیب بندی ۱ و $T_w:hs$).

۲. بررسی نتایج سرعت جریان، فشار و بار آبی کل

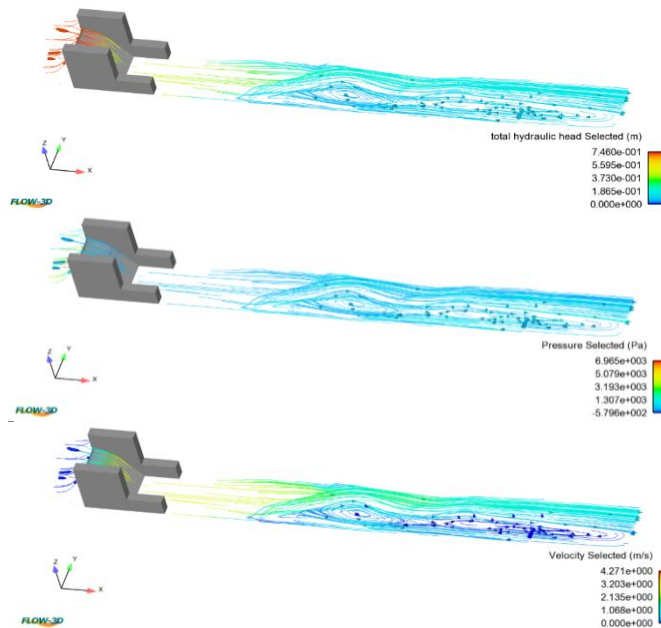
شکل‌های ۴-الف تا ۴-ج نمایی از خروجی مدل در زمان نهایی انجام آزمایشات (۶۰ ثانیه) برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵ در آزمایشات مرجع بدون بیم را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها کل بار آبی (m)، مجموع فشارهای استاتیک و دینامیک (pa) و سرعت متوسط جریان (m/s) درون کانال به صورت بردار نشان داده شده‌اند. بیشترین اثر وجود پرش نامتقارن شکل گرفته در گردابه‌های سطحی که بدلیل جریان نزدیک بستر ایجاد می‌شوند، در این شکل‌ها مشاهده می‌شود. این گردابه‌های سطحی که تحت اثر مومنتم جریان بستر ایجاد می‌شوند عامل مهمی برای ایجاد جریان برگشتی (قسمت اول شکل (۵-الف) برای فرود ۷/۴) می‌شوند. این جریان‌های برگشتی با ایجاد تنش برشی در کف در کنار اثر تخریبی جت جریان نامتقارن و اثرات گردابه‌های سطحی که در عدد فرود ۷/۴ و ۸/۷ به ترتیب تا حدود ۶۵ و ۸۹ درصد طول فلوم و در عدد فرود ۹/۵ تا انتهای فلوم امتداد دارد، موجب می‌گردد تا اثر سازه بیم‌های متقاطع طرح شده در این تحقیق و کاهش اثرات مذکور بدون ایجاد مانع مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۴. الف - خروجی بار آبی کل، فشار و سرعت برای آزمایشات مرجع - Fr 7/4



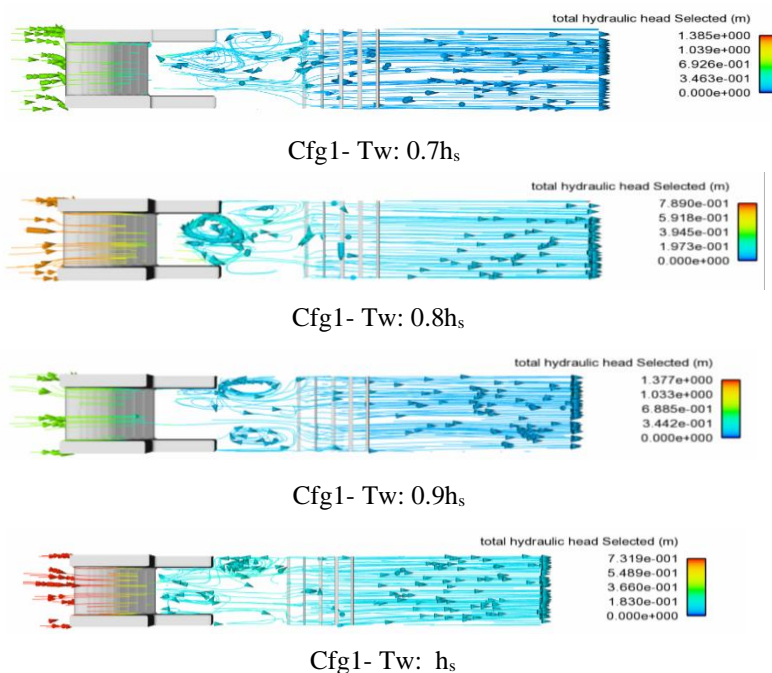
شکل ۴. ب- خروجی بارآبی کل، فشار و سرعت برای آزمایشات مرجع - Fr 8/7



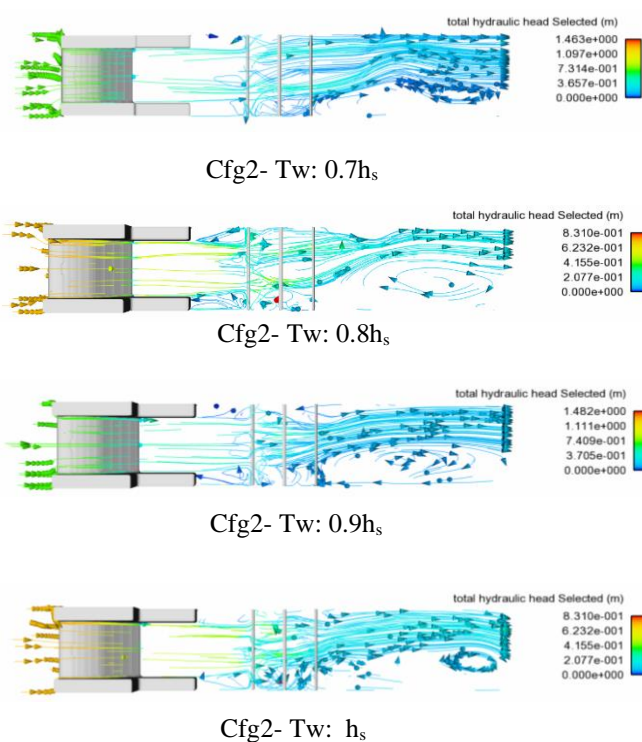
شکل ۴. ج- خروجی بارآبی کل، فشار و سرعت برای آزمایشات مرجع - Fr 9/5

حال برای بررسی بار آبی کل (که عبارت است از جمع ارتفاع معادل سرعت $V^2/2g$ ، ارتفاع معادل فشار P/γ و ارتفاع از مبنا Z که به عنوان Total Hydraulic Head نامیده و در مدل با خروجی THH تعریف می‌گردد) مدل‌سازی انجام شده، مشاهده می‌گردد که جت مایع عمودی سرازیر شده از سرریز اوجی که بر سطح جامد و افقی کف برخورد کرده و سپس با برخورد به اولین بیم به عنوان زبری، مایع شروع به پخش شعاعی روی سطح می‌کند تا زمانی که یک افزایش ناگهانی در ارتفاع سیال اتفاق می‌افتد و یک پرش هیدرولیک دایره‌ای تشکیل می‌شود. این موضوع به خصوص در شرایط $hs/0.8$ و $hs/0.9$ قابل مشاهده است. طبق نتایج تحقیق پسندیده فرد و همکاران^۱ (۲۰۱۱) هنگامی که ارتفاع پایین‌دست افزایش می‌یابد، شعاع پرش هیدرولیکی دایره‌ای تا حد معینی کاهش می‌یابد که پس از آن هیچ پرش پایداری وجود نخواهد داشت. اگر گرانش کاهش یابد، شعاع پرش و طول منطقه

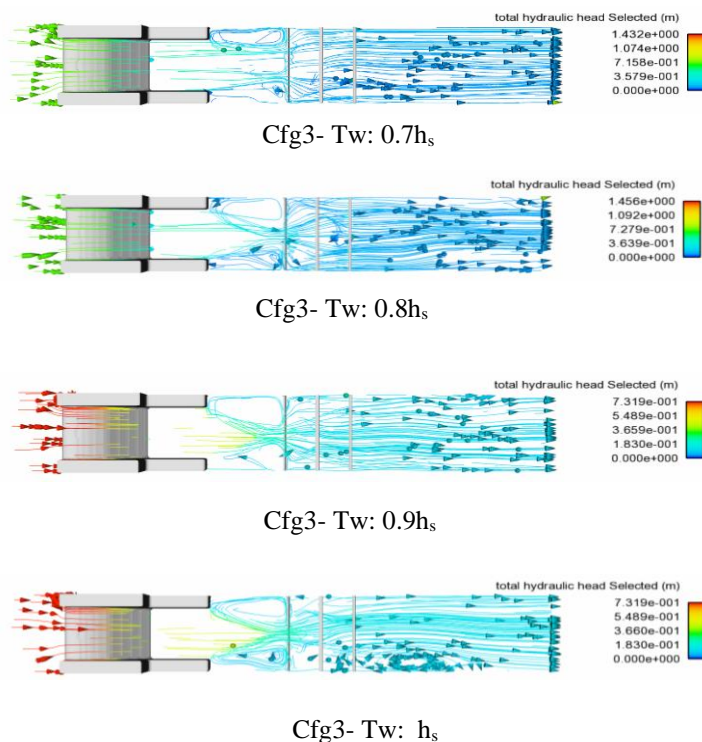
انتقال هر دو افزایش می‌یابد. در اینجا به دلیل شرایط گرانث یکسان، علاوه بر تأثیر تغییرات پایاب (از $0.7 h_s$ تا h_s)، تغییرات سازه‌ها مطابق با ترکیب‌بندی‌های بهینه نیز عامل اصلی تغییر گردابه‌ها هستند. نقاط مشخصه پرش هیدرولیکی در حوضچه آرامش از پای سرریز تا محل سازه شامل نقاط جداسازی جریان بیشتری در حالات $0.8 h_s$ و $0.9 h_s$ هستند. علاوه بر اینکه تمرکز خطوط جریان پس از سازه نیز در این حالات بهتر قابل مشاهده است. یکی از پارامترهایی که می‌توان در این نوع خروجی از شبیه‌سازی تشخیص داد و خصوصاً برای بار آبی کل (THH) نقطه انتهای استهلاک انرژی یا پرش هیدرولیکی ($\Gamma^* j$) است. برای ترکیب‌بندی C_1 می‌توان این نقطه را بعد از بیم سوم ($N=5$) تشخیص داد که جریان پس از عبور از رو و زیر آن با خطوط متمرکز امتداد می‌یابد. در شرایط C_2 که $N=3$ و زاویه قرارگیری $\Theta=11^\circ$ است، با توجه به اینکه گردابه‌های چرخشی پس از سیستم بیم‌ها نیز امتداد دارد، عملاً پس از 80 cm بعد از آخرین بیم، این شرایط قابل مشاهده است (شکل ۵-ب). برای C_3 با زاویه قرارگیری $\Theta=15^\circ$ و $N=3$ با وجود ناحیه چرخشی جریان در شرایط پایاب h_s نزدیک به انتهای سازه، می‌توان تا حدود $30 - 50 \text{ cm}$ پس از سازه نقطه انتهای استهلاک انرژی را تشخیص داد (شکل ۵-ج)؛ لذا می‌توان گفت بر اساس شاخص بار آبی کل و کنترل استهلاک انرژی، شرایط ترکیب‌بندی C_1 قابلیت کنترل استهلاک درون سیستم سازه و قبل از خروج جریان از سیستم سازه زبری با بیم‌های متقاطع را در شرایط مطلوب‌تری داراست.



شکل ۵. الف- خط جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی کل برای ترکیب‌بندی ۱ و درصد‌های مختلف عمق پایاب



شکل ۵. ب- خط جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی کل برای ترکیب بندی ۲ و درصدهای مختلف عمق پایاب



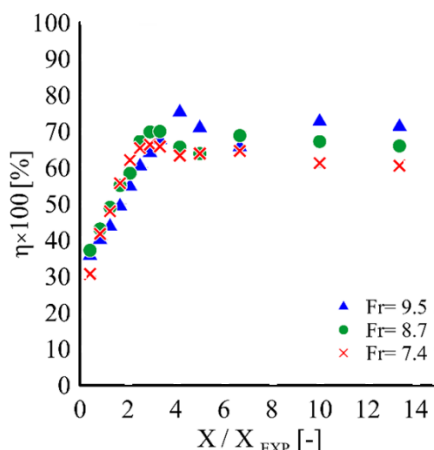
شکل ۵. ج- خط جریان بر اساس ارتفاع هیدرولیکی کل برای ترکیب بندی ۳ و درصدهای مختلف عمق پایاب

۳. بررسی افت انرژی در مقطع واگرایی ناگهانی در حالت مرجع و استفاده از بیم‌های متقاطع

باتوجه به این تعریف که اختلاف انرژی ویژه در مقطع جریان در قسمت ورودی و مقطع جریان در قسمت خروجی، افت انرژی پرش نامیده می‌شود و در صورتی که آن را با ΔE نشان دهیم، می‌توان نسبت افت انرژی پرش به میزان انرژی اولیه را به عنوان افت نسبی یا راندمان پرش مطابق با رابطه زیر تعریف نمود:

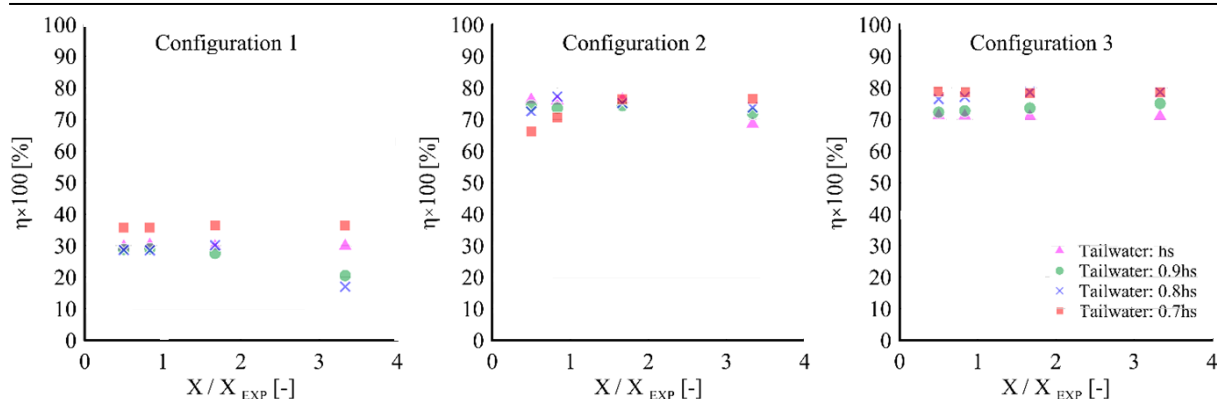
$$\eta = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (10)$$

باتوجه به پرش نامتقارن نوع S مدل‌سازی شده برای اعداد فرود ۷/۴، ۸/۷ و ۹/۵، افت انرژی در مقاطع ۰/۲۵ متر تا مقطع ۸ متری بعد از واگرایی ناگهانی، مطابق با شکل (۶) ترسیم گردید. در این شکل X_{exp} معادل طول واگرایی که برابر ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و طول X فواصل اندازه‌گیری از واگرایی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در همه اعداد فرود روند افزایش افت انرژی نسبی تا مقطع حدود ۲/۵ متر بعد از واگرایی مقطع، افزایشی بوده و در حدود $X/X_{exp} = 4$ به اوج خود رسیده و از آنجا با یک روند ثابت تقریباً خطی تا انتهای مقطع و پایاب امتداد می‌یابد. در این بین با افزایش عدد فرود میزان افت انرژی افزایش می‌یابد بطوریکه عدد فرود ۹/۵ از این قله بیشترین مقدار را دارد. افت نسبی انرژی در مقاطع واگرا تابع عدد فرود اولیه و نسبت بازشدگی مقطع است بطوریکه طبق تحقیقات نیسی (۱۳۹۲)، در یک نسبت بازشدگی ثابت، میزان راندمان پرش نوع S با بستر زبر شده بیش از راندمان پرش با بستر صاف است. در اینجا اثر زبری با استفاده از بیم‌های متقاطع در نظر گرفته شده و نتایج تحقیقات محققینی چون نیسی (۱۳۹۲) و الحمید^۱ (۲۰۰۴) را تأیید می‌نماید. ضمن اینکه عدد فرود، یکی از پارامترهای اصلی تعیین میزان افت انرژی پرش در مقاطع واگرایی ناگهانی است که در اینجا بخوبی مشهود است.



شکل ۶. افت نسبی انرژی و فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی برای پرش نامتقارن

برای بررسی اثر سازه بر افت انرژی نسبی در ترکیب‌بندی‌های بهینه و باتوجه به بیشترین مقدار آن در عدد فرود ۹/۵ پس از $X/X_{exp} \sim 4$ در ترکیب‌بندی‌های بهینه اشاره شده، مقدار افت انرژی نسبی در مقابل فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی در شکل (۷) آورده شده است.



شکل ۷. افت نسبی انرژی و فاصله بی بعد از مقطع واگرایی ناگهانی برای سه ترکیب بندی بهینه در عدد فرود ۹/۵

همان گونه که از شکل برمی آید، برای ترکیب بندی ۱ و در مقاطع ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی متر از سازه بیم های متقاطع به طور متوسط افت انرژی نسبی برای ۰/۷ hs، ۰/۸ hs و ۰/۹ hs به ترتیب ۳۶/۰۶، ۲۶/۰۸، ۲۶/۴۸ و ۲۹/۹۵ است. این مقادیر برای ترکیب بندی ۲ به ترتیب ۷۲/۴۳، ۷۴/۶۷، ۷۳/۵۳ و ۷۴/۲۸ و برای ترکیب بندی ۳ به صورت ۷۸/۶، ۷۷/۷۲، ۷۳/۴۱ و ۷۱/۰۶ به دست می آید. مقایسه روند افزایشی افت انرژی در بازه مورد نظر تا ۲ متری بعد از سیستم سازه های بیم های متقاطع نشان می دهد که بیشترین افت انرژی در ترکیب بندی ۳ رخ می دهد. در مقایسه با شرایط مرجع که روند افزایشی افت انرژی نسبی در آن تا فاصله ۲ متری با شیب ۱۱/۴۱ ادامه دارد، می توان گفت به طور متوسط استفاده از سیستم بیم های متقاطع با ترکیب بندی ۳ به میزان ۴۴/۷۸ درصد افزایش افت انرژی نسبی را باعث می گردد و از طرفی بر اساس شرایط جریان بعد از سیستم بیم ها، جریان به صورت یکنواخت تا انتهای فوم امتداد دارد.

بحث

پرش هیدرولیکی در کانال به عرض ۱ متر و طول ۱۲ متر با واگرایی ناگهانی و به کارگیری سیستم بیم های متقاطع به عنوان زبری جهت پایداری پرش هیدرولیکی نامتقارن با استفاده از نرم افزار Flow-3D شبیه سازی گردید. پارامترهای مؤثر در کنترل پرش هیدرولیکی با به کارگیری ترکیب بندی های مختلف سازه ای متشکل از بیم های متقاطع با درصدهای مختلف عمق پایاب اصلی مورد بررسی قرار گرفت.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی، با تأیید نتایج آزمایشگاهی نشان داد که به کارگیری سیستم زبری کف با استفاده از بیم های متقاطع در تعداد و زوایای مختلف و پس از دریافت بهینه ترکیب بندی با استفاده از روابط ضرایب سرعت، در همه عمق های پایاب مورد آزمایش، باعث پایداری و حذف موج های نامتقارن و جریان برگشتی در پرش نامتقارن نوع S می گردد. در بررسی کنترل پرش، حداکثر درصد کاهش طول پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با به کارگیری سیستم شبیه سازی شده، برای ترکیب بندی ۳ و شرایط پایاب ۰/۹ hs به میزان ۷۸/۰۲ درصد مشاهده شد. همچنین به کارگیری و ایجاد سیستم زبری با بیم های متقاطع، افت نسبی انرژی قابل توجهی را در پرش نامتقارن نوع S نشان داد. بیشترین افت نسبی انرژی در مقاطع و عمق های پایاب مختلف مورد آزمایش برای ترکیب بندی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برابر با ۳۶/۰۶، ۷۴/۶۷ و ۷۸/۶ درصد محاسبه گردید که در مقایسه با شرایط مرجع بدون استفاده از سازه بیم به عنوان زبری باعث افت انرژی بیشتر و در نتیجه کاهش طول حوضچه آرامش را موجب می گردد. در نهایت در بررسی مدل عددی انجام شده برای ترکیب بندی های بهینه مشاهده گردید، دقت نتایج مدل آشفتگی RNG، بیشتر از سایر مدل ها بوده و این مدل به عنوان مدل آشفتگی ایده آل برای شبیه سازی پرش هیدرولیکی نامتقارن نوع S با اجرای ترکیب بندی های بهینه می تواند کاربرد داشته باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

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

سید محسن سجادی: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.
فرشاد اسمعیل زاده فریدنی: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله.
جواد احدیان: طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چران اهواز به دلیل حمایت‌های مالی و معنوی بر اساس پژوهانه نویسنده دوم و سوم مقاله مطابق با قرارداد SCU.WH1403.260 و همچنین از سازمان آب و برق خوزستان که با حمایت‌های مالی و معنوی، امکان فراهم نمودن شرایط انجام تحقیق را محقق نمودند، نهایت تشکر و قدردانی خود را به عمل آورند.

منابع

- احدیان، جواد، حکمی، مسعود، شفاعی بجستان، محمود، و سجادی سید محسن. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی تأثیر جت مستغرق در بستر موجدار با مقطع واگرای تدریجی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی نامتقارن. نشریه مهندسی عمران مدرس، ۲۴(۱)، ۱۶۰-۱۵۱. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-70953-fa.html>
- احدیان، جواد، و ورشوساز، امین. (۱۳۹۷). مدل سازی فیزیکی تأثیر طول مهارهای انعطاف پذیر موانع شناور کروی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۵(۱)، ۳۰۸-۲۹۷. <https://www.doi.org/10.22069/jwsc.2018.12965.2762>
- تقی نیا، آیرین، اصفری پری، سید امین، شفاعی بجستان، محمود، و احمدیان فر، ایمان. (۱۴۰۰). تأثیر استهلاک انرژی ناشی از جت آب خروجی از کف و انتهای حوضچه آرامش بر طول پرش هیدرولیکی. نشریه هیدرولیک، ۱۶(۳)، ۲۸-۱۷. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.268704.1504>
- حاجی علی گل، سعید. (۱۴۰۱). تأثیر زاویه قرارگیری و تعداد تیرکهای افقی بر خصوصیات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش با مقطع واگرای ناگهانی. پایان نامه دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- خدروی میرقاید، پوریا، احدیان، جواد، و ورشوساز، امین. (۱۳۹۷). بررسی اثر بلوک های معلق کروی مهاری نوع جدید بر خصوصیات پرش هیدرولیکی. مجله مهندسی عمران مدرس، ۱۸(۵)، ۷۰-۶۱. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-12907-fa.html>
- عادل، عاطفه، احدیان، جواد، قمشی، مهدی، و فتحی مقدم، منوچهر. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی جریان دوفازی آب- هوا در پرش هیدرولیکی تحت تأثیر پوشش گیاهی انعطاف ناپذیر. مجله اکوهیدرولوژی، ۸(۳)، ۷۷۵-۷۶۳. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.327831.1528>
- نیسی، کبری. (۱۳۹۲). تعیین اثر زبری بر مشخصات پرش هیدرولیکی در حوضچه های آرامش با واگرایی ناگهانی. پایان نامه دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- محبوبی، افشین، احدیان، جواد، سجادی، سید محسن، و کاشفی پور، سید محمود. (۱۴۰۳). کنترل پرش هیدرولیکی نامتقارن در کانال های با مقطع واگرای ناگهانی توسط سیستم جت. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۵(۱۰)، ۱۹۲۰-۱۹۰۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.669>
- نوروزی، سحر، و احدیان، جواد. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر تیغه های گرداب شکن ۴۵ درجه بر ضریب تخلیه سرریز نیلوفری با استفاده از مدل FLOW-3D. نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۰(۱)، ۲۰۰-۱۹۱. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.12677>
- هوشیاری پور فرهاد، دهقان، مصطفی، و مهاجری، سیدحسین. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر زاویه واگرایی حوضچه آرامش و موقعیت آب پایه بر خصوصیات پرش هیدرولیکی با مدل سازی عددی. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۱(۱)، ۸۵-۶۸. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13151.5337>

References

- Adeli, A., Ahadiyan, J., Ghomeshi, M., & Fathi Moghadam, M. (2021). Experimental study of two phase Air-water Flow Parameters in Hydraulic Jumps with vegetated Rough Bed. *Journal of Ecohydrology*, 8(3), 763-775. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.327831.1528> (In Persian)
- 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), 297-308. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12965.2762> (In Persian)
- Ahadiyan, J., Bahmanpouri, F., Adeli, A., Gualtieri, C., & Khoshkonesh, A. (2022). Riprap Effect on Hydraulic Fracturing Process of Cohesive and Non-cohesive Protective Levees. *Journal of Water Resources Management*, 36, 625–639. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03044-6>
- 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>
- Ahadiyan, J., Hakami, M., Shafaei Bajestan, M., & Sahadi, S.M. (2024). 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), 151-160. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-70953-fa.html>(In Persian)
- Alhamid, A. A. (2004). S-jump characteristics on sloping basins. *Journal of Hydraulic Research*, 42(6), 657-662. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9628319>
- Bremen, R., & Hager, W.H. (1993). T-jump in abruptly expanding channel. *Journal of Hydraulic Research*, 31(1), 61–78. <https://doi.org/10.1080/00221689309498860>
- Bremen, R., Hager, W.H. (1994). Expanding stilling basin. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*. 106(3), 215-228. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1994.26934>
- Chow, V. (1959). Open-channel hydraulics. *McGraw-Hill*, New York, USA. <https://www.scribd.com/document/684578636/19-Ven-Te-Chow-Open-Channel-Hydraulics-Mcgraw-Hill-College-1959>
- Chow, V.T. (1989). Hand book of Applied Hydrology. *Mc Graw Hill Book Co*, New York, USA. <https://wecivilengineers.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/applied-hydrology-ven-te-chow.pdf>
- Carollo, F.G., Ferro, V., & Pampalone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, 133(9), 989-999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:9\(989\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:9(989))
- Carvalho, R.F., Lemos, C.M., & Ramos, C.M. (2008). Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins. *Journal of Hydraulic Research*, 46(6), 739-752. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521919>
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic engineering*, 128(7), 656-663. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656))
- Fathi-Moghadam, M., Salmanzadeh, S., Ahadiyan, J., & Sajadi, M. (2024). Drag Coefficient of Rigid and Flexible Deciduous Trees in Riparian Forests. *Journal of Hydraulic Engineering*, (ASCE), 150(5), 04024027, 1-10. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13709>
- Ghaderi, A., Dasineh, M., Aristodemo, F., & Ghahramanzadeh, A. (2020). Characteristics of free and submerged hydraulic jumps over different macroroughnesses. *Journal of Hydroinformatics*, 22, 1554–1572. <https://doi.org/10.2166/hydro.2020.298>

- Hager, W. H., & D. Li. (1992). Sill-controlled energy dissipater. *J. Hydraul.Res*, 30 (2), 165–181. <https://doi.org/10.1080/00221689209498932>
- Haghdoost, M., Sajjadi, S.M., Fathi-Moghadam, M., & Ahadiyan, J. (2022). Experimental study of spatial hydraulic jump stabilization using lateral jet flow. *Water Supply*, 22 (11), 8337–8352. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.376>
- Hajjaligol, S., Ahadiyan, J., Sajjadi, M., Rita Scorzini, A., Di Bacco, M., & Shafai Bejestan, M. (2021). Cross beam Dissipators in Abruptly Expanding Channels: Experimental Analysis of Flow Patterns. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(11), 06021012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001622](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001622)
- Hajjaligol, S. (2021). The effect of the placement angle and the number of horizontal beams on the characteristics of the hydraulic jump in stilling ponds with a sudden divergent section. PhD thesis, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Ahvaz, Iran. (In persian)
- Hajjaligol, 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 structural (cross beams) in abruptly expanding channels. *Results in Engineering*, 21, 101829. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101829>
- Hooshyaripor, F., Dehghan, M., & Mohajeri, S. (2019). Numerical Simulation of Effect of Expansion Angle and End-sill Location on the Hydraulic Jump in Gradually Expanding Stilling Basins. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(1), 85-98. <https://doi.org/10.22060/ceej.2018.13151.5337>
- Hughes, W. C., & Flack, J. E. (1984). Hydraulic jump properties over a rough Bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110 (12), 1755-1771. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1755\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1755))
- 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) ,61-70. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-12907-fa.html> (In Persian)
- Ma, F., Hou, Y., & Prinos, P. (2001). Numerical calculation of submerged hydraulic jumps. *Journal of hydraulic research*, 39(5), 493-503. <https://doi.org/10.1080/00221686.2001.9628274>
- 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), 1903-1920. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377718.66972> (In Persian)
- Nisi, K. (2013). Determining the effect of roughness on hydraulic jump characteristics in stilling basins with sudden divergence. PhD thesis in hydraulic structures, *Shahid Chamran University of Ahvaz*, Ahvaz, Iran. (In Persian)
- Nouroozi, S., & ahadiyan, J. (2017). Effect of Vortex Breaker Blades 45 Degree on Discharge Coefficient of Morning Glory Spillway Using Flow-3D. *Irrigation Sciences and Engineering Journal*, 40(1), 191-200. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.12677> (In Persian)
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Yamanaka, Y. (1991). Drag on vertical sill of forced jump. *Journal of Hydraulic Research*, 29(1), 29-47. <https://doi.org/10.1080/00221689109498991>
- Passandideh-Fard, M., Teymourtash, A. R., & Khavari, M. (2011). Numerical study of circular hydraulic jump using volume-of-fluid method. *Journal of Fluids Engineering*, 133, 011401. <https://doi.org/10.1115/1.4003307>
- Rajaratnam, N., & Subramanya, K. (1968). Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 94 (2), 481–504. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001780>
- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., & Khedri, P. (2024). Redesigning the Fuse Plug, Emergency Spillway, and Flood Warning

- System: An Application of Flood Management. *Water*, 16(24), 3694. <https://doi.org/10.3390/w16243694>
- Scorzini, A. R., Di Bacco, M., & Leopardi, M. (2016). Experimental investigation on a system of cross-beams as energy dissipator in abruptly expanding channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 142(2), 06015018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001088)
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A. R., Di Bacco, M., Sajjadi, M., & 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), 2572. <https://doi.org/10.3390/w13182572>
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Fathi Moghadam, M., Sajjadi, M., & Di Bacco, M. (2022a). Experimental investigation on the characteristics of hydraulic jump in expanding channels with a water jet injection system. *Journal of Hydraulic Structures*, 7(4), 58-75. <https://doi.org/10.22055/jhs.2022.40233.1203>
- Sharoonizadeh, S., Ahadiyan, J., Scorzini, A.R., Mario, D. B., Sajjadi, S.M., & Fathi-Moghafdam, M. (2022b). Turbulence characteristics of the flow resulting from the hydrodynamic interaction of multiple counter flow jets in expanding channels. *Acta Mech*, 233, 3867–3880. <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03250-2>
- Taghinia, Iyrin., Asfari-Pari, Seyed Amin., Shafaei-Bajestan, Mahmoud., & Ahmadian-Far, Iman. (1400). The effect of energy dissipation from the water jet exiting from the bottom and end of the stilling pond on the length of the hydraulic jump. *Hydraulic Journal*, 16(3), 17-28. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2021.268704.1504> (In Persian)
- Tahmasbipour, M., Azizi Nadian, H., Ahadiyan, J., Oliveto, G., Sajjadi, S. M., & Kiyani, A. M. (2023). Experimental Investigation of T-Jump Stabilization Using Water Jets and Sinusoidal Corrugated Beds. *Water*, 16(23), 3513. <https://doi.org/10.3390/w16233513>