



## Nitrate concentration modeling in water resources using support machine regression and metaheuristic optimization algorithm Harris Hawks

Shahab Naderi<sup>1</sup> , and Saeid Shabanlou<sup>2</sup>

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

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 29 August 2024

Received in revised form 25 November 2024

Accepted 20 January 2025

Available online 22 June 2025

#### Keywords:

nitrate,  
artificial neural network,  
groundwater,  
pollution,  
machine learning.

### ABSTRACT

**Objective:** The objective of this study is to develop a machine learning model for simulating the nitrate concentration. Simulating and predicting nitrate concentration has always been one of the most important issues in the field of water resources management.

**Method:** In this research, after collecting the data, the nitrate concentration data are first clustered using the JNB, then, an SVR model is used for each cluster. The SFFS algorithm is used to select the input variables for the model simultaneously with the training process of this model, then, based on the results of these three models, the average value of the error indices for the training stage (RMSE = 0.2387, MAE = 0.2236,  $R^2=0.9874$ ) and test (RMSE = 0.2474, MAE = 0.2350,  $R^2=0.9841$ ) are calculated. In this case, the trial and error procedure is used for this work. In the next step, the HHO algorithm is used to determine the optimal value of the parameters of the kernel functions. In this case, the values of  $R^2$ , MAE and RMSE for the training phase are 0.9961, 0.1169, and 0.1502, respectively, and their values for the test phase are 0.9845, 0.1308, and 0.9978, respectively.

**Results:** Based on the results of this study, firstly, the use of HHO to predict nitrate concentration can significantly increase the accuracy of the SVR model, secondly, the use of different machine learning models together can play an effective role in increasing the accuracy of regression models such as SVR. The results of this study show that the use of data clustering before developing machine learning models can improve the accuracy of nitrate concentration prediction. The HHO-SVR hybrid model has performed better in different clusters with proper selection of kernel function and has provided optimal results. Also, this study emphasizes that the different statistical characteristics of each cluster have a significant effect on the performance of the models. Therefore, to more accurately predict nitrate concentration in groundwater, it is recommended to first cluster the data and then develop a specific model for each cluster.

**Conclusions:** The results of this study show that the use of data clustering before developing machine learning models can improve the accuracy of nitrate concentration prediction. The HHO-SVR hybrid model has performed better in different clusters with proper selection of kernel function and has provided optimal results. Also, this study emphasizes that the different statistical characteristics of each cluster have a significant effect on the performance of the models. Therefore, to more accurately predict nitrate concentration in groundwater, it is recommended to first cluster the data and then develop a specific model for each cluster.

**Cite this article:** Naderi, Sh., & Shabanlou, S. (2025). Nitrate concentration modeling in water resources using support machine regression and metaheuristic optimization algorithm Harris Hawks. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 1-21. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.11300.1143>



© The Author(s)

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

Publisher: Razi University.

## **Introduction**

Nitrate is one of the contaminants which can pollute groundwater in different ways. So, we always try to use accurate methods to simulate and predict its concentration. The objective of this study is to develop a machine learning model for simulating the nitrate concentration.

## **Method**

In this research, the SVM model is used for simulating the nitrate concentration and Harris Hawks optimization (HHO) algorithm to determine the parameters of the kernel function of the SVR model. The linear kernel, RBF, sigmoid and polynomial kernel functions are used to develop the SVR model. The data used in this study include 1453 water samples (from 2000 to 2020) for each of which the physical and chemical parameters are measured. After performing the necessary pre-processing including identifying outlier data and correcting incomplete information to avoid biasing the model, all data are normalized between zero and one. First, all the data are divided into three clusters using the JNB algorithm, then, a HHO-SVR mode is developed for each cluster. Based on the results of this study, the HHO-SVR model has the best performance for the first, second and third clusters with the PK, RBF, and SK kernel functions, respectively. Based on the results of this study, due to the differences in the results of the HHO-SVR model in different clusters, it is better to cluster the nitrate data before developing the HH-SVR model and then develop a model for each cluster because the samples belonging to each cluster have different statistical characteristics.

## **Results**

Simulating and predicting nitrate concentration has always been one of the most important issues in the field of water resources management. In this research, after collecting the data, the nitrate concentration data are first clustered using the JNB, then, an SVR model is used for each cluster. The SFFS algorithm is used to select the input variables for the model simultaneously with the training process of this model, then, based on the results of these three models, the average value of the error indices for the training stage (RMSE = 0.2387, MAE = 0.2236,  $R^2=0.9874$ ) and test (RMSE = 0.2474, MAE = 0.2350,  $R^2=0.9841$ ) are calculated. In this case, the trial and error procedure is used for this work. In the next step, the HHO algorithm is used to determine the optimal value of the parameters of the kernel functions. In this case, the values of  $R^2$ , MAE and RMSE for the training phase are 0.9961, 0.1169, and 0.1502, respectively, and their values for the test phase are 0.9845, 0.1308, 0.9978, respectively. Based on the results of this study, firstly, the use of HHO to predict nitrate concentration can significantly increase the accuracy of the SVR model, secondly, the use of different machine learning models together can play an effective role in increasing the accuracy of regression models such as SVR.

## **Conclusions**

The results of this study show that the use of data clustering before developing machine learning models can improve the accuracy of nitrate concentration prediction. The HHO-SVR hybrid model has performed better in different clusters with proper selection of kernel function and has provided optimal results. Also, this study emphasizes that the different statistical characteristics of each cluster have a significant effect on the performance of the models.

Therefore, to more accurately predict nitrate concentration in groundwater, it is recommended to first cluster the data and then develop a specific model for each cluster.

***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.



## مدل سازی غلظت نیترات در منابع آب با بهره گیری از رگرسیون ماشین پشتیبان و الگوریتم

### بهینه سازی متاهیوریستیک شاهین هریس

شهاب نادری<sup>۱</sup>، و سعید شعبانلو<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران. رایانامه: [sh.naderi66@gmail.com](mailto:sh.naderi66@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [sacid.shabanlou@gmail.com](mailto:sacid.shabanlou@gmail.com)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                     | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۰۶/۰۸</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۰۹/۰۵</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۳/۱۱/۰۱</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۴/۰۴/۰۱</p> | <p><b>هدف:</b> هدف این مطالعه توسعه یک مدل یادگیری ماشین برای شبیه سازی غلظت نیترات است. شبیه سازی و پیش بینی غلظت نیترات همیشه از مهم ترین مسائل در حوزه مدیریت منابع آب بوده است.</p> <p><b>روش پژوهش:</b> در این تحقیق بعد از جمع آوری داده ها ابتدا داده های مربوط به غلظت نیترات با استفاده از JNB خوشه بندی شدند، سپس برای هر خوشه یک مدل SVR توسعه داده شد، هم زمان با فرایند آموزش این مدل از الگوریتم SFFS برای انتخاب متغیرهای وردی به مدل استفاده شد، سپس بر اساس نتایج حاصل از این سه مدل مقدار متوسط شاخص های خطا برای مرحله آموزش و تست محاسبه شدند، در این حالت از روش سعی و خطا برای این کار استفاده شد. در گام بعد از الگوریتم HHO برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای توابع کرنل استفاده شد.</p> <p><b>یافته ها:</b> بر اساس نتایج حاصل از این سه مدل مقدار متوسط شاخص های خطا برای مرحله آموزش (RMSE = 0.2474 , MAE = 0.2350 , R<sup>2</sup> = 0.9874) و تست (RMSE = 0.2387 , MAE = 0.2236 , R<sup>2</sup> = 0.9841) شامل مقدار شاخص های R<sup>2</sup> , MAE و RMSE برای مرحله آموزش به ترتیب برابر ۰/۹۹۶۱، ۰/۱۱۶۹ و ۰/۱۵۰۲ است و مقدار آن ها برای مرحله تست به ترتیب برابر ۰/۹۸۴۵، ۰/۱۳۰۸، ۰/۹۹۷۸ است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه اولاً استفاده از HHO برای پیش بینی غلظت نیترات میتواند باعث افزایش چشمگیر دقت مدل SVR می شود، دوماً استفاده به جا از مدل های یادگیری ماشین مختلف در کنار هم میتواند نقش موثری در افزایش دقت مدل های رگرسیونی مانند SVR داشته باشد.</p> <p><b>نتیجه گیری:</b> این تحقیق نشان داد که با انتخاب مناسب متغیرها، حتی در صورت استفاده از یک مدل نسبتاً ساده مانند SVR، می توان به نتایج بسیار دقیقی دست یافت. این نشان می دهد که کیفیت داده ها و انتخاب ورودی های مناسب به اندازه پیچیدگی خود مدل اهمیت دارد. در نهایت، این تحقیق تأیید می کند که ترکیب الگوریتم های بهینه سازی مانند HHO با مدل های یادگیری ماشین و به کارگیری روش های انتخاب ویژگی، می تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود دقت پیش بینی ها در مسائل مرتبط با منابع آب، به ویژه در پیش بینی آلاینده های مهم، مورد استفاده قرار گیرد. این راهبردها می توانند در مدیریت بهتر منابع آب و کاهش آلودگی های ناشی از نیترات و سایر آلاینده ها به کار گرفته شوند.</p> |

**استناد:** نادری، شهاب؛ و شعبانلو، سعید. (۱۴۰۴). مدل سازی غلظت نیترات در منابع آب با بهره گیری از رگرسیون ماشین پشتیبان و الگوریتم بهینه سازی

متاهیوریستیک شاهین هریس. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۲)، ۱-۲۱.

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



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

### مقدمه

در بسیاری از نقاط دنیا، آب های زیرزمینی به عنوان منبع اصلی آب آشامیدنی در نواحی شهری و روستایی مورد استفاده قرار می گیرند. با این حال، در سال های اخیر گسترش فعالیت های صنعتی و کشاورزی منجر به افزایش غلظت آلاینده های سمی مانند آنیون های معدنی، یون های فلزی، مواد شیمیایی خطرناک در آب های زیرزمینی شده اند (عادلجو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۱). در میان آلاینده های مختلف آنیون های معدنی از اهمیت بالایی برخوردارند؛ زیرا حتی غلظت های بسیار پایین، در حد  $\text{ppb}$  این آنیون ها سمی و برای بدن انسان و سایر حیوانات مضر است (وو و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰)، از طرفی حضور مقادیر بسیار کم آن ها در آب آشامیدنی معمولاً تغییرات ظاهری قابل تشخیصی در آن ایجاد نمی کند، بنابراین گاهی شناسایی آن ها بر اساس تغییرات ویژگی های فیزیکی آب بسیار دشوار است (مزرعه و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۳). غلظت نیترات در آب های سطحی و زیرزمینی باتوجه به شرایط جغرافیایی (نوع ساختارهای زمین شناسی هر منطقه)، مدیریت ضایعات انسانی و حیوانی، مقادیر استفاده از کودهای شیمیایی از ته و تخلیه ترکیبات از ته توسط صنایع متفاوت خواهد بود (ژانگ و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۱). غلظت مجاز نیترات در آب آشامیدنی در چند سال اخیر به عنوان یک موضوع سلامت عمومی مورد توجه است (مزرعه و همکاران، ۲۰۲۳). باتوجه به مطالعات به عمل آمده توسط سازمان بهداشت جهانی در مورد نیترات، این سازمان حداکثر مجاز نیترات را ( $\text{mg L}^{-1}$  ۰۹ برحسب نیترات) اعلام نموده است (سازمان بهداشت جهانی<sup>۵</sup>، ۲۰۲۲).

### ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

به دلیل پیشرفت های چشمگیر علم هوش مصنوعی در سال های اخیر، امروزه بسیاری از مطالعات برای پیش بینی غلظت نیترات مبتنی بر روش های یادگیری ماشین هستند (وو و همکاران، ۲۰۱۰). در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات که در خارج از کشور مورد بررسی قرار گرفته است، ارائه شده است.

ریاضی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۹) برای تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان یک MABLR را توسعه دادند، آن ها برای توسعه این مدل از ۱۵ فاکتور مختلف که با استفاده از الگوریتم FSLR انتخاب شدند، استفاده کردند. همچنین از الگوریتم FLS برای بهینه سازی آن استفاده کردند. بعد از توسعه این مدل تعمیم پذیری آن را با بررسی عملکرد آن را در مقیاس بزرگ بررسی کردند. آن ها برای بررسی دقت این مدل علاوه بر محاسبه شاخص های خطا مانند RMSE از مقایسه عملکرد آن با مدل های شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)، رگرسیون لجستیک (LR) و مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) نیز استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، این مدل روشی مناسب برای تهیه GAPM و کاهش بایاس و واریانس مدل است.

لاهجوج و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۰) در یک مطالعه موردی برای بررسی اسب پذیری آب های زیرزمینی دشت ساسیس در شمال مراکش و تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان از RF استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه در صورت داشتن اطلاعات کافی به خوبی می توان از این مدل برای تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان های آلوده به نیترات استفاده کرد.

الزاین و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۲۱) کارایی مدل ANFIS برای شبیه سازی غلظت نیترات و تهیه نقشه آسی پذیری آبخوان را بررسی کردند، سپس کارایی الگوریتم های PSO، DE، GA برای بهبود دقت آن را بررسی کردند. در این مطالعه از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) و خطای میانگین مربعات (MSE) برای ارزیابی نتایج استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل مدل ANFIS-PSO نسبت به همه مدل ها عملکرد بهتری دارد.

1. Adeloju et al
2. Wu et al
3. Mazraeh et al
4. Zhang et al
5. World Health Organization et al
6. Rizzei et al
7. Lahjouj et al
8. Elzain et al

ال امری و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) برای آنالیز غلظت نیترات در آبخوان های کم عمق، شناسایی مناطق آسیب پذیر و پیش بینی غلظت نیترات از مدل های ANN and ARIMA استفاده کردند. در واقع آن ها در این مطالعه از مدل ANN برای شبیه سازی غلظت نیترات و از مدل ARIMA برای پیش بینی غلظت آن در آینده استفاده کردند. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه به خوبی می توان از این مدل ها برای مدیریت آبخوان استفاده کرد.

از دیگر تحقیقات در زمینه موضوع این تحقیق می توان به تحقیقات عزیزی و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۳)؛ امیری و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۲۱)؛ شعبانلو<sup>۴</sup> (۲۰۱۸)؛ اسماعیلی و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۱)؛ فلاحی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۲۳) و پناهی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۲) اشاره کرد.

## روش پژوهش

این پژوهش در محدوده مطالعاتی دشت بهار در استان همدان انجام شد. دشت بهار بین طول های جغرافیایی ۴۸° تا ۴۸°۲۶' شرقی و عرض های جغرافیایی ۳۴° تا ۳۴°۴۸' شمالی واقع شده است. این دشت در بخش مرکزی استان همدان قرار دارد و شامل مساحتی در حدود ۱۵۰۰ کیلومتر مربع است. بخش عمده ای از این محدوده شامل زمین های زراعی و کشاورزی بوده و سایر مناطق آن شامل ارتفاعات و اراضی طبیعی است. منابع آبی این دشت از جمله سفره های آب زیرزمینی و رودخانه های محلی برای تأمین آب کشاورزی و شرب منطقه حیاتی هستند. بالاترین نقطه ارتفاعی در محدوده دشت بهار همدان در حدود ۲۴۰۰ متر از سطح دریا واقع شده و پایین ترین نقطه آن در حدود ۱۶۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. از مراکز جمعیتی مهم این محدوده می توان به شهر بهار و روستاهای اطراف آن اشاره کرد. در این منطقه، تعداد ۸۵۰ حلقه چاه برای برداشت سالانه حدود ۷۵ میلیون متر مکعب آب شناسایی شده است. همچنین ۱۲۰ دهنه چشمه با تخلیه سالانه ۱۰ میلیون متر مکعب و ۸ رشته قنات با تخلیه ۳ میلیون متر مکعب نیز شناسایی شده اند. حجم کل برداشت منابع آب زیرزمینی در این محدوده مطالعاتی حدود ۸۸ میلیون متر مکعب در سال است که بخش عمده آن مربوط به دشت بهار بوده و مابقی به مناطق کوهپایه ای و ارتفاعات مجاور اختصاص دارد. در سطح آبخوان آبرفتی دشت بهار تعداد ۸۰۰ حلقه چاه، ۱۰ دهنه چشمه و ۵ رشته قنات وجود دارد که به صورت مجموع سالانه ۸۵ میلیون متر مکعب آب برداشت و تخلیه می کنند.

## ۱. رگرسیون با ماشین بردار پشتیبان

یکی از بهترین و دقیق ترین روش های یادگیری با نظارت است که اولین بار در سال ۱۹۶۸ توسط وپنیک معرفی شد. در این روش هدف اصلی جداسازی داده ها با استفاده از یک ابر صفحه است. موقعیت این ابر صفحه بر اساس فاصله بین داده های دو کلاس تعیین می شود. دو صفحه دیگر به موازات این ابر صفحه و وجود دارند، موقعیت این صفحه ها بر اساس موقعیت بردارای پشتیبان تعیین می شود، در نهایت هدف نهایی SVM حداکثر کردن فاصله این دو صفحه باتوجه به موقعیت بردارهای پشتیبان است (نوبل<sup>۸</sup>، ۲۰۰۶). اگر داده های دو کلاس به صورت خطی تفکیک پذیر باشند می توان از مدل HM-SVMs<sup>۹</sup> داده های دو کلاس را از یکدیگر تفکیک کرد؛ اما با استفاده از این مدل نمیتوان داده های غیرخطی را تفکیک کرد؛ لذا برای تفکیک داده های غیرخطی باید از مدل SM-SVMs<sup>۱۰</sup> استفاده کرد (واپنیک و چرووننکیس<sup>۱۱</sup>، ۱۹۷۱).

1. El Amri 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. Noble

9. Hard-margin support vector machines

10. Soft-margin support vector machines (SM-SVMs)

11. Vapnik and Chervonenkis

اگر  $S = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_l, y_l)\}$  مجموعه ای از داده های آموزشی باشد به طوری که  $x_i \in \mathbb{R}^n$  ورودی و  $y_i \in \mathbb{R}^n$  خروجی است و  $i=1,2,3,\dots,l$  است و  $\mathbb{R}^n$  ابعاد بردار ورودی است هدف مدل SVR یافتن تابع  $f(x)$  است، به طوری که برای همه نمونه های آموزشی حداکثر به میزان  $\varepsilon$  از مقادیر مشاهده شده ( $y_0$ ) اختلاف داشته باشد. دوماً تا حد ممکن فلت<sup>۱</sup> باشد یا به عبارتی مقدار  $w$  بسیار ناچیز باشد (معادله (۱))، (هرست<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۸).

$$f(x) = w^T x + b, w \in \mathbb{R}^n, b \in \mathbb{R} \quad (۱)$$

که در آن  $x$  ورودی،  $w$  وزن و  $b$  بایاس است، باتوجه به این که یک راه برای فلت شدن تابع معادله (۱) حداقل کردن نرم  $w$  است. بنابراین مسئله SVR را می توان به صورت یک مسئله بهینه سازی محدب نوشت (معادله (۲)).

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ & \text{Subject to } \begin{cases} y_i - (w^T x_i) - b \leq \varepsilon \\ y_i - (w^T x_i) - b \geq -\varepsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (۲)$$

در حالت عادی فرض می شود تابع  $f$  برای همه داده های واقعی وجود دارد و می تواند همه داده های آموزشی را حداکثر با اختلاف  $\varepsilon$  تقریب بزند، بنابراین این مسئله بهینه سازی محدب قابل حل است. اما گاهی ممکن است معادله (۲) برای همه داده های آموزشی برقرار نباشد برای حل چنین مسائلی می توان از متغیر کمبود<sup>۳</sup> استفاده کرد، در این حالت معادله (۲) به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \xi_i^*) \\ & \text{Subject to } \begin{cases} y_i - (w^T x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i \\ y_i - (w^T x_i) - b \geq -\varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (۳)$$

ثابت  $C$  یک توازن بین میزان فلت بودن تابع  $f$  و حداکثر مقدار انحراف بیشتر از  $\varepsilon$  را برقرار می کند. این مسئله را می توان با استفاده از معادله (۴) توصیف کرد.

$$|\xi|_\varepsilon := \begin{cases} 0 & \text{if } |\xi| \leq \varepsilon \\ |\xi| - \varepsilon & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (۴)$$

با تبدیل تابع هدف به یک تابع لاگرانژی و سپس تعمیم مسئله خطی به یک مسئله غیرخطی با استفاده از یک تابع نگاشت یک تابع جدید دارای نقطه زینی<sup>۴</sup> حاصل می شود، در نهایت با استفاده از معادله (۵) مقدار این تابع را می توان محاسبه کرد. علت استفاده از تابع نگاشت این است که از معادله (۱) تنها می توان برای شبیه سازی مسائل تفکیک پذیر خطی استفاده کرد و با استفاده از آن نمیتوان مسائل تفکیک پذیر غیر خطی را شبیه سازی کرد، لذا برای شبیه سازی اینگونه مسائل باید داده ها را از بعد فضای ورودی به فضای ویژگی با ابعاد بالاتر (فضای هیلبرت با ابعاد محدود یا نامحدود) نگاشت داد.

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (a_i - a_i^*) k(x_i, x) + b \quad (۵)$$

1. Flat  
2. Hearst  
3. Slack variables  
4. Saddle point

که در آن  $a_i$  and  $a_i^*$  ضرایب لاگرانژی هستند که هنگام حل مسئله بهینه سازی حاصل می شوند.  $k(x_i, x)$  تابع کرنل است که مقدار آن برابر ضرب داخلی دو بردار  $x_i$  and  $x$  است. این تابع یکی از مهم ترین بخش های مدل SVR است، زیرا تعیین نوع آن و مقدار پارامترهای آن نقش مهمی در میزان دقت مدل SVR دارد. تاکنون توابع کرنل مختلفی برای توسعه مدل SVR معرفی شده اند (هرست و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۸). در این مطالعه از توابع خطی، RBF، سیگموئید و چندجمله ای برای توسعه مدل SVR استفاده شد که در جدول (۱) قابل مشاهده است. برای تنظیم پارامترهای هر یک از این توابع از الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس (HHO) استفاده شد، سپس با استفاده از شاخص های خطا کارایی مدل SVR با هر یکی از این توابع ارزیابی شد.

جدول ۱. توابع کرنل استفاده شده برای توسعه مدل SVR

| تابع کرنل                  | معادله ریاضی                              | پارامتر قابل تنظیم |
|----------------------------|-------------------------------------------|--------------------|
| Linear kernel(LK)          | $k(x, y) = x^T \cdot y + C$               | C                  |
| Radial Basis Function(RBF) | $k(x, y) = \exp(-\alpha \ x - y\ ^2 + C)$ | $\alpha, C$        |
| Sigmoid Kernel(SK)         | $k(x, y) = \tanh(\beta(x^T \cdot y) + C)$ | $\beta, C$         |
| Polynomial Kernel(PK)      | $k(x, y) = (\gamma(x^T \cdot y) + C)^d$   | $\gamma, C, d$     |
| Multi Quadric(MQ)          | $\sqrt{\ x - y\ ^2 + C^2}$                | C                  |

## ۲. الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس<sup>۲</sup>

الگوریتم بهینه سازی شاهین هریس (HHO) یک الگوریتم فراابتکاری الهام گرفته از رفتار شکار شاهین های هریس است که برای حل مسائل بهینه سازی عددی پیوسته و گسسته به کار می رود. این الگوریتم بر اساس رفتار گروهی و شکار هماهنگ شاهین های هریس طراحی شده است که در حیات وحش به صورت دسته جمعی و هوشمندانه طعمه خود را به دام می اندازند (حیدری و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹) در فرآیند بهینه سازی، شاهین های هریس از دو فاز اصلی استفاده می کنند: شناسایی اولیه طعمه و مرحله حمله نهایی. این دو فاز به مدل سازی جستجوی محلی و جهانی در فضای بهینه سازی کمک می کند، به طوری که با جستجوی اولیه در فضای کلی و سپس تمرکز بر نقاط پتانسیل بالا، همگامی موثری بین اکتشاف و استخراج برقرار می شود. در الگوریتم HHO، رفتار شکار به صورت ریاضی به عنوان یک فرآیند تصادفی مبتنی بر انرژی مدل سازی می شود. در مراحل اولیه، شاهین ها به دنبال شناسایی مکان بهینه طعمه هستند و این فاز معادل جستجوی گسترده در فضای راه حل های ممکن است. سپس، در مراحل بعدی، بسته به فاصله و میزان انرژی طعمه، حملات نهایی به سمت هدف صورت می گیرد که معادل جستجوی محلی و دقیق تر است. فرمولاسیون ریاضی این حمله ها به گونه ای طراحی شده است که تعادلی بین فرآیندهای اکتشاف (جستجوی گسترده) و استخراج (جستجوی دقیق) برقرار می شود، به طوری که از گیر افتادن در بهینه های محلی جلوگیری شده و همگرایی بهینه بهبود یابد. HHO به دلیل سادگی، سرعت همگرایی بالا و توانایی حل مسائل پیچیده با ابعاد بالا، به طور گسترده در حوزه های مختلف علمی و صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. این الگوریتم می تواند به طور موثر با بهینه سازی مسائل چندهدفه و چندمحدوده ای سازگار شود و عملکرد قابل توجهی در مقایسه با سایر الگوریتم های بهینه سازی همچون GA، PSO و الگوریتم رقابت استعماری (CA) نشان داده است.

در این الگوریتم انتقال بین مرحله اکتشاف و بهره برداری در هر تکرار بر اساس پارامتر انرژی فرار<sup>۴</sup> انجام می شود (رابطه ۱). اگر  $E \geq 1$  الگوریتم وارد فاز اکتشاف می شود؛ ولی اگر  $|E| \leq 1$  الگوریتم وارد فاز بهره برداری می شود، معادله (۶)، (حیدری و همکاران، ۲۰۱۹):

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (۶)$$

1. Hearst et al  
2. Harris Hawks Optimization algorithm  
3. Heidari et al  
4. Escape Energy



که در آن  $E$  انرژی آزادسازی است،  $E_0$  عدد تصادفی بین 1 and -1،  $T$  حداکثر تعداد تکرار است،  $t$  شماره تکرار فعلی است. در مرحله اکتشاف شاهین ها بر اساس دو استراتژی موقعیت طعمه ها را شناسایی می کنند، در استراتژی اول موقعیت هر طعمه به صورت تصادفی تعیین می شود ( $p \geq 0.5$ ). اما در استراتژی دوم موقعیت هر طعمه بر اساس موقعیت سایر طعمه ها تعیین می شود (معادله ۷) ( $p < 0.5$ ) (حیدری و همکاران، ۲۰۱۹).

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_{rand}^t - r_1 |X_{rand}^t - 2r_2 X_i^t| & p \geq 0.5 \\ (X_{rabbit}^t - X_m^t) - r_3 (lb + r_4 (ub - lb)) & p < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

که در آن  $X_i^t, X_i^{t+1}$  به ترتیب موقعیت شاهین در تکرار  $t$  و  $t+1$  است.  $X_{rabbit}^t$  موقعیت طعمه در تکرار  $t$ ام است.  $r_1, r_2, r_3, r_4$ ، اعداد تصادفی در بازه ۰ و ۱ هستند.  $lb$  و  $ub$  حد پایین و بالای متغیرها هستند.  $X_m^t$  و  $X_{rand}^t$  به ترتیب میانگین موقعیت جمعیت شاهین ها و موقعیت تصادفی شاهین ها در تکرار  $t$ ام است.  $p$  احتمال وقوع هر یک از استراتژی های شماره یک و دو است.

استراتژی شکار شاهین ها در مرحله اکتشاف بر اساس پارامترهای انرژی فرار و  $r$  مشخص می شود،  $r$  احتمال موفقیت یا عدم موفقیت طعمه هنگام فرار است.

اگر  $E \leq 0$ ، الگوریتم وارد مرحله محاصره نرم می شود. اما اگر  $E \geq 0$ ، الگوریتم وارد مرحله محاصره سخت می شود. در ابتدای حمله که انرژی خرگوش زیاد است شاهین ها به آهستگی به طعمه نزدیک می شوند (محاصره نرم)، با گذشت زمان و خسته شدن خرگوش حلقه محاصره شاهین ها تنگ تر می شود (محاصره سخت). بر اساس پارامترهای  $E$  and  $r$  رفتار شاهین ها در مرحله بهره برداری را می توان به چهار دسته تقسیم کرد (آلابول و همکاران ۱، ۲۰۲۱).

### الف) محاصره نرم

در این مرحله باوجود اینکه خرگوش انرژی کافی برای فرار دارد؛ اما در نهایت نمی تواند از دست شاهین ها فرار کند. ( $|E| \geq 0.5, r \geq 0.5$ )، در این حالت موقعیت هر شاهین با استفاده از معادله (۸) آپدیت می شود.

$$X_i^{t+1} = \Delta X_i^t - E |JX_{rabbit}^t - X_i^t| \quad (8)$$

$$\Delta X_i^t = X_{rabbit}^t - X_i^t \quad (9)$$

$$J = 2(1 - r_5) \quad (10)$$

که در آن  $\Delta X_i^t$  اختلاف بین بردار موقعیت طعمه و موقعیت کنونی در تکرار  $t$ ام است.  $r_5$  یک عدد تصادفی در بازه ۰ و ۱ است.  $J$  اندازه تصادفی گام خرگوش هنگام فرار است که در هر تکرار مقدار آن را با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می شود.

### ب) محاصره سخت

در این مرحله شکار به اندازه کافی خسته شده است و شاهین ها آن را به طور سخت محاصره می کنند ( $|E| < 0.5, r \geq 0.5$ ). در این حالت موقعیت هر خرگوش را می توان با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه کرد.

$$X_i^{t+1} = X_{rabbit}^t - E |\Delta X_i^t| \quad (11)$$

### ج) محاصره نرم با شیرجه های سریع پیش رونده<sup>۲</sup>

در این حالت خرگوش انرژی کافی برای فرار دارد و محاصره نرم هنوز پا برجاست ( $|E| \geq 0.5, r < 0.5$ )، در این حالت موقعیت هر خرگوش را با استفاده از معادله (۱۲) می توان محاسبه کرد.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Y & \text{if } f(Y) < f(X^t) \\ Z & \text{if } f(Z) < f(X^t) \end{cases} \quad (12)$$

که در آن مقدار  $Y, Z$  با استفاده از معادله (۱۳) و (۱۴) محاسبه می شوند.

$$Y = X_{\text{rabbit}}^t - E |JX_{\text{rabbit}}^t - X_i^t| \quad (13)$$

$$Z = Y + S \times \text{levy}_f(D) \quad (14)$$

که در آن  $D$  اندازه بعد مسئله است.  $S$  یک بردار تصادفی با اندازه  $1 \times D$ ،  $\text{levy}_f$  نیز یک تابع است که خروجی آن با استفاده از معادله (۱۵) قابل محاسبه است.

$$\text{levy}(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\alpha}}}, \sigma = \left( \frac{\Gamma(1+\alpha) \times \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \times 2^{\left(\frac{\alpha-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (15)$$

که در آن  $v$  یک عدد تصادفی بین ۰ و یک است.  $\alpha$  یک عدد ثابتی است که مقدار آن ۱.۵ در نظر گرفته می شود.

#### د) محاصره سخت با شیرجه های سریع پیش رونده<sup>۱</sup>

در این مرحله طعمه انرژی کافی برای فرار ندارد و شاهین ها تلاش می کنند با محاصره سخت طعمه را شکار کنند ( $E < 0.5$ ). در این حالت، موقعیت خرگوش در هر تکرار را با استفاده از معادله (۱۶) می توان محاسبه کرد.

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} Y & \text{if } f(Y) < f(X^t) \\ Z & \text{if } f(Z) < f(X^t) \end{cases} \quad (16)$$

که در آن مقدار  $Z$  را با استفاده از معادله (۱۰) می توان محاسبه کرد. مقدار  $Y$  نیز با استفاده از معادله (۱۷) قابل محاسبه است.

$$Y = X_{\text{rabbit}}^t - E |JX_{\text{rabbit}}^t - X_m^t| \quad (17)$$

### ۳. مدل HHO-SVR

ابتدا داده های مربوط به غلظت نیترات با استفاده از الگوریتم JNB<sup>۲</sup> خوشه بندی شدند ( $C_1, C_2, C_3$ ) (جدول ۱)، با استفاده از این الگوریتم می توان مجموعه ای از داده های عددی را به گونه ای خوشه بندی کرد که SD<sup>۳</sup> هر خوشه با سایر خوشه ها حداقل شود، در این حالت تفکیک داده ها بر اساس تابع مطلوبیت انجام شد (بوچیر و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۲). در ادامه توسعه برای هر خوشه یک مدل SVR توسعه داده شد و عملکرد آن با توابع کرنل مختلف ارزیابی شد ( $\text{SVM}^{\text{KF}}$ ). در این حالت پارامترهای هر تابع کرنل با استفاده از روش سعی و خطا<sup>۵</sup> (TE) تنظیم شدند ( $C_1\text{-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}, C_2\text{-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}, C_3\text{-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}, C_4\text{-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}$ ). یکی از چالش ها هنگام آموزش هر نوع شبکه عصبی روش انتخاب بهترین متغیرهای ورودی به مدل است، اگر تعداد متغیرها بیش از اندازه کم باشد، نمیتوان انتظار نتایج قابل قبولی را از مدل داشت، اگر هم تعداد متغیرهای مدل بیش از حد زیاد باشد به دلیل پیچیده تر شدن محاسبات ممکن است مدل همگرا نشود (پریو و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۶). در این مطالعه بهترین متغیرهای ورودی به هر مدل با استفاده از تکنیک SFFS<sup>۷</sup> انتخاب شدند ( $C_1\text{-S-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}, C_2\text{-S-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}, C_3\text{-S-SVM}_{\text{TE}}^{\text{KF}}$ ), بر این اساس هر مدل با استفاده از

1. Hard besiege with progressive rapid dives
2. Jenks Natural Breaks
3. Squared deviation
4. Bouchair et al
5. Trial and error
6. Prieto et al
7. Sequential forward floating selection

ترکیب مختلفی از متغیرهای ورودی توسعه داده می شود، سپس با مقایسه شاخص های خطا مدل های مختلف بهترین متغیرها برای شبیه سازی غلظت نیترات انتخاب می شوند. توابع کرنل از مهم ترین بخش های موثر در فرآیند یادگیری مدل SVR هستند، هر یک از این توابع پارامترهایی دارند که تعیین مقدار دقیق آن ها تاثیر قابل توجهی در کارایی مدل SVR دارد، به عنوان مثال C و  $\epsilon$  دو پارامتر مشترک بین بسیاری از توابع کرنل هستند (دنگ و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹).

C یک پارامتر قابل تنظیم است که دامنه تغییرات آن بین صفر و مثبت بی نهایت است، وقتی به این پارامتر مقادیر بزرگی اختصاص داده شود SVR اجازه وقوع هیچ گونه خطای را در داده های آموزش نمی دهد، در نتیجه قدرت تعمیم مدل کاهش می یابد؛ از طرفی هر چقدر مقدار C به صفر نزدیک تر باشد سخت گیری مدل نسبت به پذیرش خطا کمتر می شود. به همین دلیل تعیین دقیق مقدار C از اهمیت ویژه ای برخوردار است (نوبل، ۲۰۰۶). دامنه تغییرات پارامتر  $\epsilon$  نیز مانند C بین صفر و مثبت بی نهایت است. این پارامتر نقش مهمی در تعیین موقعیت بردارهای پشتیبان دارد، هر چه مقدار آن بیشتر باشد تعداد بردارهای پشتیبان کمتر و پیچیدگی مدل نیز کمتر خواهد شد. اما هر چه مقدار این پارامتر کمتر باشد، تعداد بردارهای پشتیبان بیشتر و در نتیجه فرآیند آموزش مدل نیز پیچیده تر می شود (لیانگ و ژانگ<sup>۲</sup>، ۲۰۲۱). در صورت استفاده از تابع کرنل چندجمله ای یکی از پارامترهایی که مقدار آن باید مشخص شود d است، با استفاده از این پارامتر درجه چند جمله ای مشخص می شود. هر چه مقدار آن بیشتر باشد سری زمانی را با دقت بیشتری می توان شبیه کرد؛ اما مدل SVR پیچیده تر و در نتیجه سرعت همگرا شدن آن به دلیل افزایش محاسبات کمتر و زمان آموزش مدل نیز طولانی تر می شود. اما هرچه درجه چندجمله ای کمتر باشد سری زمانی را با در نظر گرفتن جزئیات کمتری می توان شبیه سازی کرد؛ اما سرعت همگرا شدن مدل بیشتر و مدت زمان فرآیند آموزش کمتر می شود (دبنات و تاکاهاشی<sup>۳</sup>، ۲۰۰۴). در این مطالعه یک مدل هیبریدی جدیدی با در نظر گرفتن همه محدودیت های بالا توسعه داده شد. در این مدل از الگوریتم HHO برای تعیین دقیق تر مقدار پارامترهای هر تابع کرنل در مدل SVR استفاده شد ( $C_1 - S - SVM_{HHO}^{KF}$  و از سایر داده های باقیمانده برای تست استفاده شد. در نهایت برای همه مدل ها آنالیز حساسیت انجام شد و حساسیت آن ها نسبت به پارامترهای مختلف ارزیابی شد.

جدول ۲. خروجی الگوریتم JNB

| Cluster name | Lower bund | Upper bund | Number of data |
|--------------|------------|------------|----------------|
| $C_1$        | 7.43       | 13.98      | 530            |
| $C_2$        | 14         | 32.1       | 485            |
| $C_3$        | 33.58      | 70.5       | 439            |

#### ۴. شاخص های مورد استفاده برای صحت سنجی مدل

بعد از توسعه مدل های مختلف از شاخص های زیر برای ارزیابی عملکرد مدل ها استفاده شد.

$$RMSE = \left[ N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_{obs} - x_{sim})^2 \right]^{.5}, (0, +\infty] \quad (18)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{obs} - x_{sim}|, (0, +\infty] \quad (19)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{sim} - \bar{x}_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2}, (-\infty, 1] \quad (20)$$

1. Deng et al
2. Liang and Zhang
3. Debnath and Takahashi

که در آن  $X_{sim}$  و  $X_{obs}$  به ترتیب مقدار مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است.  $\bar{X}_{obs}$  مقدار متوسط داده‌های مشاهده ای است.  $N$  تعداد داده‌های مشاهده شده است.

## یافته‌های پژوهش

### ۱. خوشه اول

بر اساس نتایج حاصل از الگوریتم JNB، ۳۷ درصد از کل داده‌ها به خوشه اول تعلق دارند و متوسط غلظت نیترات در این خوشه ۱۱.۴۸۷ است، در جدول (۳) مشخصات اماری نمونه‌های متعلق به این خوشه نشان داده شده‌اند. ابتدا مدل  $SVR_{TE}$  برای این خوشه توسعه داده شد و عملکرد آن با توابع کرنل مختلف ارزیابی شد. بر اساس نتایج حاصل، برای این خوشه این مدل با تابع کرنل SK بهترین عملکرد را دارد (جدول (۳)). همچنین بر اساس نتایج حاصل از اجرای متد SFFS هم‌زمان با فرآیند آموزش،  $EC$ ،  $pH$ ،  $TDS$ ،  $HCO_3$ ،  $SO_4$  بهترین متغیرها برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در این خوشه هستند، در جدول (۴) پارامترهای مدل  $C_1-S-SVR_{TE}^{SK}$  نشان داده شده‌اند. همچنین اشکال (۴) و (۵) سری زمانی داده‌های مشاهده ای و سری زمانی حاصل از این مدل را در مرحله آموزش و تست نشان می‌دهد. در مرحله بعد مدل  $SVR_{HHO}$  برای این خوشه توسعه داده شد و مانند مدل  $SVR_{TE}$  عملکرد آن با توابع کرنل مختلف ارزیابی شد. با این تفاوت که در این حالت بهینه‌ترین مقدار پارامترهای توابع کرنل مختلف مدل  $SVR$  توسط الگوریتم HHO محاسبه شدند و سپس عملکرد مدل‌های  $SVR_{HHO}$  مختلف بایکدیگر مقایسه شدند، براساس نتایج حاصل، مدل  $SVR_{HHO}$  نیز با تابع کرنل SK بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در مرحله آموزش و تست داده‌های این خوشه دارد ( $C_1-S-SVR_{HHO}^{SK}$ )، در جدول (۶) نتایج حاصل از توسعه این مدل نشان داده شده‌اند. در جدول (۷) پارامترهای این مدل و در شکل‌های (۶) و (۷) سری زمانی داده‌های مشاهده ای و سری زمانی حاصل از این مدل در مرحله آموزش و تست نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. ویژگی های آماری متغیر وابسته و متغیرهای مستقل در خوشه ۱

| Variable         | Unit     | Mean   | StDev  | CoefVar | Minimum | Maximum |
|------------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Na               | mg/L     | 26.65  | 13.91  | 46.46   | 1.81    | 51.50   |
| Ca               | mg/L     | 56.48  | 19.71  | 33.15   | 21.63   | 91.42   |
| Mn               | mg/L     | 0.13   | 0.03   | 0.61    | 0.12    | 0.13    |
| K                | mg/L     | 5.33   | 3.02   | 47.65   | 0.66    | 10.91   |
| Fe               | mg/L     | 0.209  | 0.00   | 0.28    | 0.20    | 0.21    |
| Al               | mg/L     | 0.11   | 0.00   | 0.40    | 0.11    | 0.11    |
| F                | mg/L     | 9.19   | 4.00   | 40.52   | 2.60    | 15.80   |
| Cl               | mg/L     | 19.58  | 10.93  | 49.73   | 0.88    | 38.34   |
| SO <sub>4</sub>  | mg/L     | 66.39  | 36.67  | 52.57   | 0.95    | 132.06  |
| CO <sub>3</sub>  | mg/L     | 1.49   | 0.78   | 51.48   | 0.50    | 2.46    |
| HCO <sub>3</sub> | mg/L     | 230.36 | 69.71  | 27.53   | 107.88  | 352.80  |
| PO <sub>4</sub>  | mg/L     | 2.43   | 0.73   | 27.75   | 1.51    | 3.35    |
| NO <sub>2</sub>  | mg/L     | 1.59   | 0.81   | 51.07   | 0.58    | 2.62    |
| Br               | mg/L     | 0.01   | 0.00   | 17.34   | 0.042   | 0.07    |
| CO <sub>2</sub>  | mg/L     | 11.15  | 5.46   | 48.99   | 2.15    | 20.18   |
| WT <sup>1</sup>  | C°       | 21.27  | 4.87   | 22.91   | 12.80   | 29.59   |
| AT <sup>2</sup>  | C°       | 25.00  | 6.65   | 26.61   | 13.5    | 36.39   |
| pH               | -        | 6.59   | 0.04   | 0.68    | 6.50    | 6.67    |
| Alkalinity       | mg/L     | 256.50 | 76.61  | 29.87   | 120.06  | 394.31  |
| TH <sup>3</sup>  | mg/L     | 339.99 | 148.41 | 42.34   | 84.18   | 596.75  |
| TDS              | mg/L     | 291.65 | 65.34  | 18.55   | 166.81  | 416.62  |
| EC               | μmohs/cm | 636.68 | 139.25 | 19.90   | 395.26  | 878.08  |
| NO <sub>3</sub>  | mg/L     | 11.48  | 1.43   | 12.51   | 7.63    | 13.97   |
| Turbidity        | NTU      | 0.80   | 0.20   | 23.98   | 0.43    | 1.16    |
| Mg               | mg/L     | 26.59  | 11.19  | 38.29   | 7.16    | 45.92   |

جدول ۴. نتایج شاخص های ارزیابی مدل C<sub>1</sub>-S-SVR<sup>SK</sup><sub>TE</sub> در مرحله آموزش و تست

| Training |        |        |        |        |                | Testing |        |        |        |        |                |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| RMSE     | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> | RMSE    | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> |
| 0.2423   | 0.2389 | 0.9954 | 0.9720 | 0.9781 | 0.9814         | 0.2534  | 0.2407 | 0.9924 | 0.9656 | 0.9744 | 0.9823         |

جدول ۵. مقدار بهینه پارامترهای مدل C<sub>1</sub>-S-SVR<sup>SK</sup><sub>TE</sub> در مرحله آموزش و تست

| Model | Parameter              | Value                                           |
|-------|------------------------|-------------------------------------------------|
| SFFS  | Best input Combination | EC, pH, TDS, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> |
| SVR   | Kernel Function        | SK                                              |
|       | C                      | 0.00894                                         |
|       | β                      | 0.05913                                         |

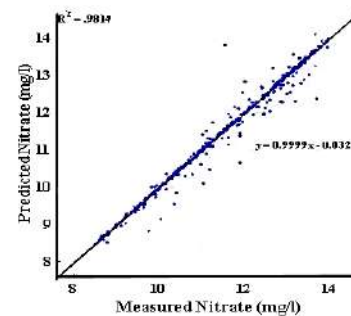
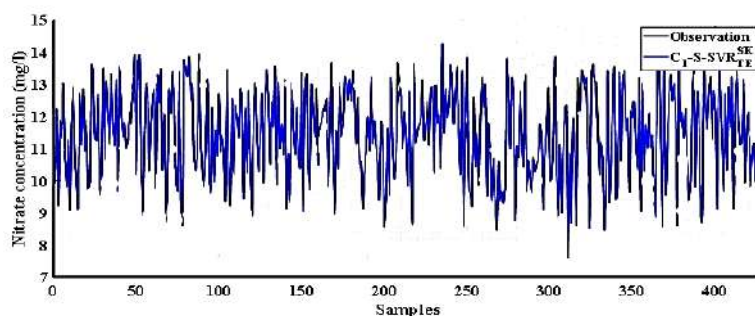
جدول ۶. نتایج شاخص های ارزیابی مدل C<sub>1</sub> - S - SVR<sup>SK</sup><sub>HHO</sub> در مرحله آموزش و تست

| Training |        |        |        |        |                | Testing |        |        |        |        |                |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| RMSE     | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> | RMSE    | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> |
| 0.1489   | 0.1187 | 0.9977 | 0.9926 | 0.9956 | 0.9969         | 0.1304  | 0.0747 | 0.9984 | 0.9967 | 0.9974 | 0.9983         |

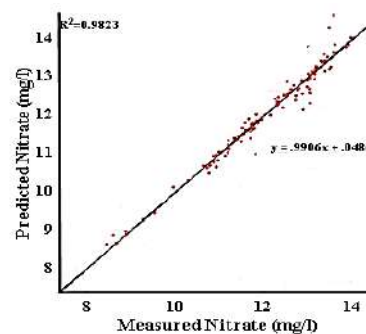
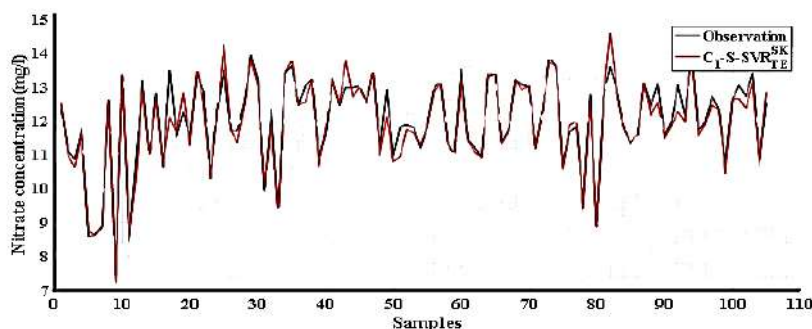
1. Water temperature
2. Air temperature
3. Total hardness

جدول ۷. مقدار بهینه پارامترهای مدل  $C_1$ -S-SVR $_{HHO}^{SK}$  در مرحله آموزش و تست

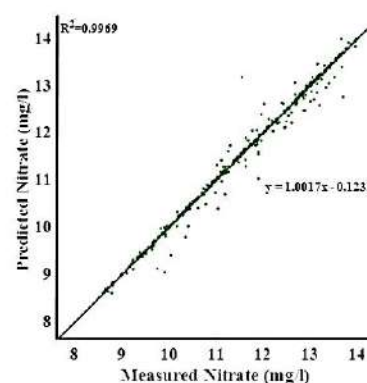
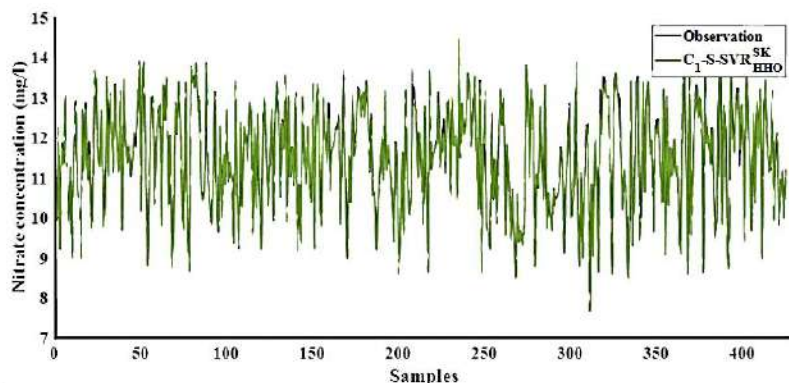
| Model | Parameter                    | Value                                            |
|-------|------------------------------|--------------------------------------------------|
| SFFS  | Best input combination       | EC, pH , TDS, HCO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> |
| HHO   | Number of search agents      | 100                                              |
|       | Maximum number of iterations | 1000                                             |
| SVR   | Kernel Function              | SK                                               |
|       | C                            | 0.02691                                          |
|       | $\beta$                      | 0.5061                                           |



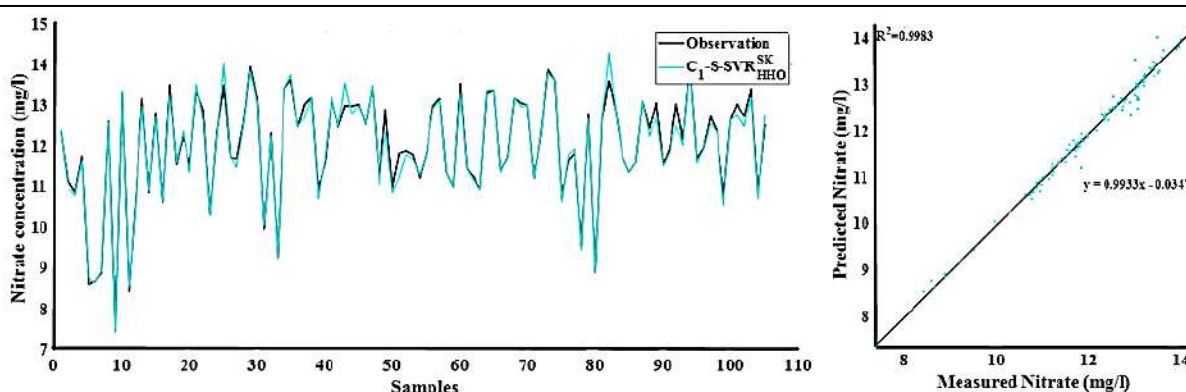
شکل ۴. عملکرد مدل  $C_1$ -S-SVR $_{TE}^{SK}$  در مرحله آموزش برای پیش بینی غلظت نیترات



شکل ۵. عملکرد مدل  $C_1$ -S-SVR $_{TE}^{SK}$  در مرحله تست برای پیش بینی غلظت نیترات



شکل ۶. عملکرد مدل  $C_1$ -S-SVR $_{HHO}^{SK}$  در مرحله آموزش برای پیش بینی غلظت نیترات



شکل ۷. عملکرد مدل  $C_1$ -S-SVR $_{HHO}^{SK}$  در مرحله تست برای پیش‌بینی غلظت نیترات

## ۲. خوشه دوم

روند شبیه‌سازی داده‌های خوشه دوم ( $C_2$ ) شبیه روند شبیه‌سازی داده‌های م خوشه اول است، ۳۴ درصد داده‌ها متعلق به این خوشه هستند و متوسط غلظت نیترات در این خوشه ۲۲/۲۸۳ است که در جدول (۸) نشان داده شده است. برای این خوشه نیز ابتدا عملکرد مدل  $SVR_{RBF}$  با توابع کرنل مختلف ارزیابی شد، بر اساس نتایج حاصل، این مدل با تابع کرنل  $SK$  بهترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست داده‌های این خوشه را دارد ( $C_2$ -S-SVR $_{TE}^{RBF}$ ) که در جدول (۹) نتایج ارائه شده است. همچنین باتوجه‌به اجرای متد  $SFFS$  هم‌زمان با فرآیند آموزش  $EC$ ,  $pH$ ,  $TDS$ ,  $HCO_3$ ,  $Cl$  بهترین متغیرها برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در این خوشه هستند. در جدول (۱۰) پارامترهای مدل  $C_2$ -S-SVR $_{TE}^{RBF}$  نشان داده شده‌اند، همچنین در شکل‌های (۸) و (۹) سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای و سری زمانی حاصل از این مدل را نشان می‌دهد. در مرحله بعد مدل  $SVR_{HHO}$  برای این خوشه توسعه داده شد. بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای تابع کرنل مختلف مدل  $SVR_{HHO}$  با تابع کرنل  $RBF$  بهترین عملکرد را برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در مرحله آموزش و تست این خوشه دارد ( $C_2$ -S-SVR $_{HHO}^{RBF}$ )، نتایج حاصل از توسعه این مدل در جدول (۱۱) نشان داده شده‌اند. در جدول (۱۲) پارامترهای مختلف این مدل و در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) سری زمانی حاصل داده‌های مشاهده‌ای و سری زمانی حاصل از این مدل را نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت این مدل همانند مدل  $C_1$ -S-SVR $_{HHO}^{SK}$  نسبت به  $EC$  بیشترین حساسیت را دارد، اما نسبت به  $TDS$  کم‌ترین حساسیت را دارد.

جدول ۸. ویژگی‌های آماری متغیر وابسته و متغیرهای مستقل در خوشه ۲

| Variable         | Unit     | Mean   | StDev  | CoefVar | Minimum | Maximum |
|------------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Na               | mg/L     | 29.99  | 16.28  | 54.31   | 2.44    | 57.78   |
| Ca               | mg/L     | 59.55  | 21.62  | 36.30   | 22.60   | 95.98   |
| Mn               | mg/L     | 0.10   | 0.00   | 0.58    | 0.099   | 0.101   |
| K                | mg/L     | 6.36   | 3.59   | 56.44   | 0.80    | 12.86   |
| Fe               | mg/L     | 0.21   | 0.00   | 0.29    | 0.20    | 0.21    |
| Al               | mg/L     | 0.12   | 0.00   | 0.44    | 0.12    | 0.13    |
| F                | mg/L     | 9.90   | 4.31   | 43.53   | 2.80    | 16.98   |
| Cl               | mg/L     | 22.00  | 12.38  | 56.28   | 0.99    | 43.00   |
| SO <sub>4</sub>  | mg/L     | 70.16  | 40.20  | 57.30   | 1.00    | 139.00  |
| CO <sub>3</sub>  | mg/L     | 1.5    | 0.81   | 53.15   | 0.52    | 2.55    |
| HCO <sub>3</sub> | mg/L     | 253.55 | 70.21  | 27.69   | 120.77  | 389.35  |
| PO <sub>4</sub>  | mg/L     | 2.68   | 0.81   | 30.53   | 1.66    | 3.69    |
| NO <sub>2</sub>  | mg/L     | 1.36   | 0.69   | 51.13   | 0.49    | 2.22    |
| Br               | mg/L     | 0.06   | 0.01   | 19.46   | 0.04    | 0.08    |
| CO <sub>2</sub>  | mg/L     | 11.19  | 5.49   | 49.12   | 2.15    | 20.19   |
| WT               | C°       | 21.24  | 4.89   | 23.04   | 12.85   | 29.71   |
| AT               | C°       | 25.00  | 6.632  | 26.53   | 13.60   | 36.41   |
| pH               | -        | 7.33   | 0.05   | 0.79    | 7.23    | 7.42    |
| Alkalinity       | mg/L     | 257.04 | 76.08  | 29.60   | 120.32  | 394.48  |
| TH               | mg/L     | 350.15 | 130.62 | 37.30   | 60.76   | 637.84  |
| TDS              | mg/L     | 352.77 | 93.19  | 26.42   | 202.40  | 503.24  |
| EC               | μmohs/cm | 699.74 | 355.61 | 50.82   | 261.8   | 1138.90 |
| NO <sub>3</sub>  | mg/L     | 22.28  | 4.48   | 20.11   | 13.85   | 32      |
| Turbidity        | NTU      | 0.85   | 0.22   | 26.21   | 0.47    | 1.28    |
| Mg               | mg/L     | 29.23  | 12.39  | 42.40   | 8.23    | 50.60   |

جدول ۹. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل C<sub>2</sub>-S-SVR<sup>RBF</sup><sub>TE</sub> در مرحله آموزش و تست

| Training |        |        |        |        |                | Testing |        |        |        |        |                |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| RMSE     | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> | RMSE    | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> |
| 0.2547   | 0.2476 | 0.9904 | 0.9633 | 0.9679 | 0.9816         | 0.2608  | 0.2488 | 0.9884 | 0.9625 | 0.9657 | 0.9801         |

جدول ۱۰. مقدار بهینه پارامترهای مدل C<sub>2</sub>-S-SVR<sup>RBF</sup><sub>TE</sub> در مرحله آموزش و تست

| Model | Parameter              | Value                              |
|-------|------------------------|------------------------------------|
| SFFS  | Best input Combination | EC, pH, TDS, HCO <sub>3</sub> , Cl |
|       | Kernel Function        | RBF                                |
| SVR   | $\alpha$               | 0.04196                            |
|       | $C$                    | 3                                  |

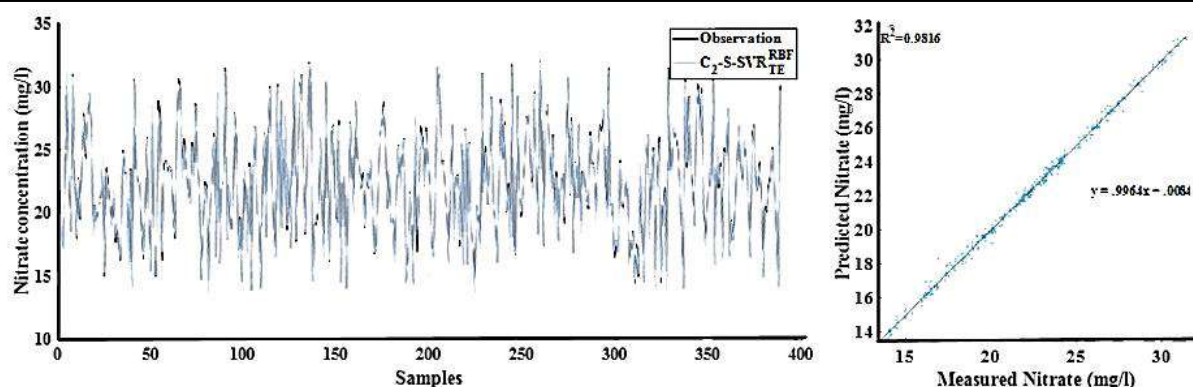
جدول ۱۱. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل C<sub>2</sub>-S-SVR<sup>RBF</sup><sub>HHO</sub> در مرحله آموزش و تست

| Training |        |        |        |        |                | Testing |        |        |        |        |                |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| RMSE     | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> | RMSE    | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> |
| 0.1698   | 0.2476 | 0.1303 | 0.9951 | 0.9924 | 0.9942         | 0.1585  | 0.1299 | 0.9959 | 0.9917 | 0.9940 | 0.9955         |

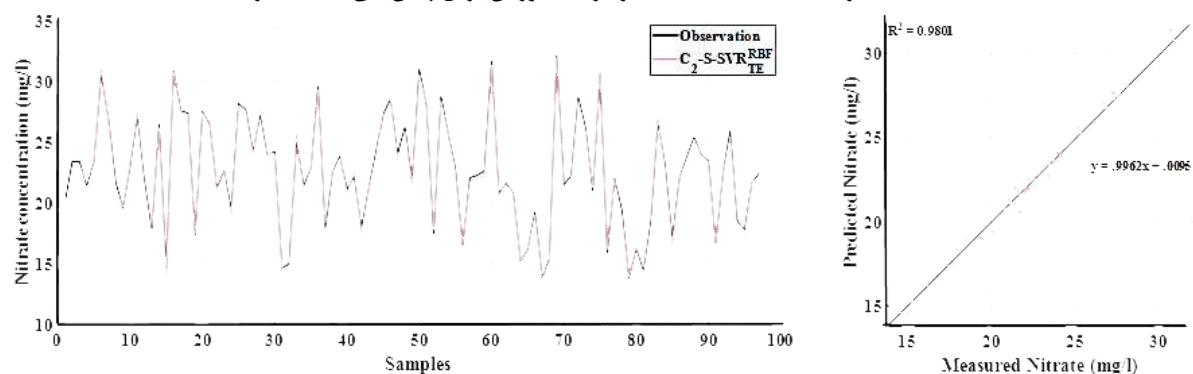
جدول ۱۲. مقدار بهینه پارامترهای مدل C<sub>2</sub>-S-SVR<sup>RBF</sup><sub>HHO</sub> در مرحله آموزش و تست

| Model | Parameter                    | Value                              |
|-------|------------------------------|------------------------------------|
| SFFS  | Best input combination       | EC, pH, TDS, HCO <sub>3</sub> , Cl |
| HHO   | Number of search agents      | 100                                |
|       | Maximum number of iterations | 1000                               |
| SVR   | Kernel Function              | RBF                                |
|       | $\alpha$                     | 0.07004                            |
|       | $C$                          | 4                                  |

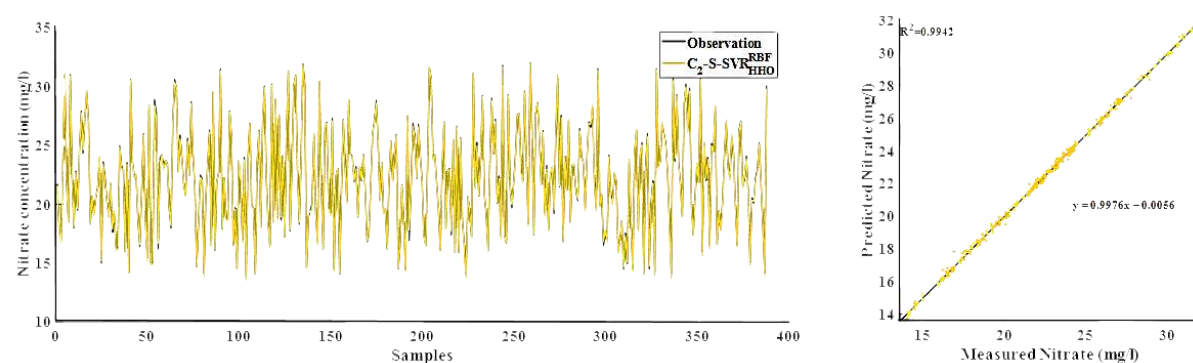




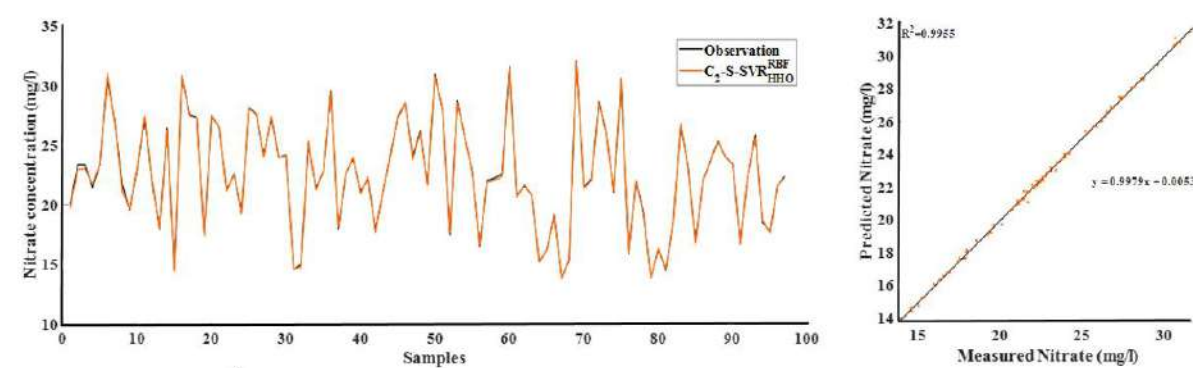
شکل ۸. عملکرد مدل  $C_2-S-SVR_{TE}^{RBF}$  در مرحله آموزش برای پیش‌بینی غلظت نیترات



شکل ۹. عملکرد مدل  $C_2-S-SVR_{TE}^{RBF}$  در مرحله تست برای پیش‌بینی غلظت نیترات



شکل ۱۰. عملکرد مدل  $C_2-S-SVR_{HHO}^{RBF}$  در مرحله آموزش برای پیش‌بینی غلظت نیترات



شکل ۱۱. عملکرد مدل  $C_2-S-SVR_{HHO}^{RBF}$  در مرحله تست برای پیش‌بینی غلظت نیترات

## ۳. خوشه سوم

۳۰ درصد داده‌ها به خوشه سوم تعلق دارند و متوسط غلظت نیترات در این خوشه ۴۴/۱۱۹ است که در جدول (۱۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل از توسعه مدل  $SVR_{TE}$  و مطابق جدول (۱۳)، این مدل برای این خوشه با تابع کرنل PK بهترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست را دارد ( $C_3-S-SVR_{TE}^{PK}$ ). همچنین بر اساس نتایج حاصل از اجرای متد SFFS،  $HCO_3$ , Ca, Na, EC, pH, TDS, بهترین متغیرها برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در این خوشه هستند. در جدول (۱۴) پارامترهای مختلف این مدل نشان داده شده‌اند ( $C_3-S-SVR_{TE}^{PK}$ ). همچنین در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط این مدل نشان داده شده‌اند. در مرحله آخر بخش  $SVR_{HHO}$  برای این خوشه توسعه داده شد، بر اساس نتایج حاصل مدل  $SVR_{HHO}$  با تابع کرنل PK برای این خوشه ( $C_3-S-SVR_{HHO}^{PK}$ ) بهترین عملکرد را در مرحله آموزش و تست دارد که در جدول (۱۵) نشان داده شده است. در جدول (۱۶) پارامترهای مختلف این مدل نشان داده شده‌اند. شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نیز سری زمانی داده‌های مشاهده‌ای برای خوشه سوم و سری زمانی حاصل از مدل ( $C_3-S-SVR_{HHO}^{PK}$ ) را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲. ویژگی‌های آماری متغیر وابسته و متغیرهای مستقل در خوشه ۳

| Variable   | Unit     | Mean   | StDev  | CoefVar | Minimum | Maximum |
|------------|----------|--------|--------|---------|---------|---------|
| Na         | mg/L     | 27.90  | 14.58  | 48.62   | 1.93    | 53.56   |
| Ca         | mg/L     | 57.09  | 19.70  | 33.14   | 21.85   | 92.63   |
| Mn         | mg/L     | 0.09   | 0.00   | 3.47    | 0.02    | 0.10    |
| K          | mg/L     | 6.13   | 3.45   | 54.07   | 0.78    | 12.42   |
| Fe         | mg/L     | 0.20   | 0.00   | 0.27    | 0.20    | 0.211   |
| Al         | mg/L     | 0.10   | 0.00   | 0.41    | 0.10    | 0.11    |
| F          | mg/L     | 8.89   | 3.88   | 39.37   | 2.52    | 15.28   |
| Cl         | mg/L     | 20.46  | 11.52  | 52.40   | 0.92    | 39.99   |
| SO4        | mg/L     | 62.30  | 35.63  | 50.90   | 0.89    | 123.71  |
| CO3        | mg/L     | 1.40   | 0.73   | 48.32   | 0.47    | 2.32    |
| HCO3       | mg/L     | 238.44 | 75.88  | 29.92   | 111.39  | 364.25  |
| PO4        | mg/L     | 2.53   | 0.76   | 28.99   | 1.57    | 3.51    |
| NO2        | mg/L     | 2.07   | 1.06   | 51.10   | 0.75    | 3.40    |
| Br         | mg/L     | 0.05   | 0.00   | 17.34   | 0.03    | 0.07    |
| CO2        | mg/L     | 11.17  | 5.45   | 48.85   | 2.15    | 20.19   |
| WT         | C°       | 21.29  | 4.94   | 23.22   | 12.82   | 29.70   |
| AT         | C°       | 25.01  | 6.64   | 26.58   | 13.56   | 36.43   |
| pH         | -        | 7.17   | 0.04   | 0.76    | 7.08    | 7.27    |
| Alkalinity | mg/L     | 256.49 | 82.64  | 32.22   | 119.87  | 391.85  |
| TH         | mg/L     | 315.58 | 155.99 | 44.48   | 55.74   | 575.80  |
| TDS        | mg/L     | 334.61 | 77.94  | 22.13   | 191.46  | 478.42  |
| EC         | μmohs/cm | 698.20 | 564.10 | 80.80   | 21.18   | 1377.29 |
| NO3        | mg/L     | 44.11  | 8.53   | 19.34   | 33.58   | 70.50   |
| Turbidity  | NTU      | 0.80   | 0.21   | 26.00   | 0.44    | 1.21    |
| Mg         | mg/L     | 27.77  | 11.76  | 40.24   | 7.44    | 48.04   |

جدول ۱۳. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل  $C_3-S-SVR_{TE}^{PK}$  در مرحله آموزش و تست

| Training |        |        |        |        |                | Testing |        |        |        |        |                |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| RMSE     | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> | RMSE    | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> |
| 0.2191   | 0.1843 | 0.1843 | 0.9993 | 0.9970 | 0.9993         | 0.2282  | 0.2156 | 0.9965 | 0.9984 | 0.9963 | 0.9901         |

جدول ۱۴. مقدار بهینه پارامترهای مدل  $C_3-S-SVR_{TE}^{PK}$  در مرحله آموزش و تست

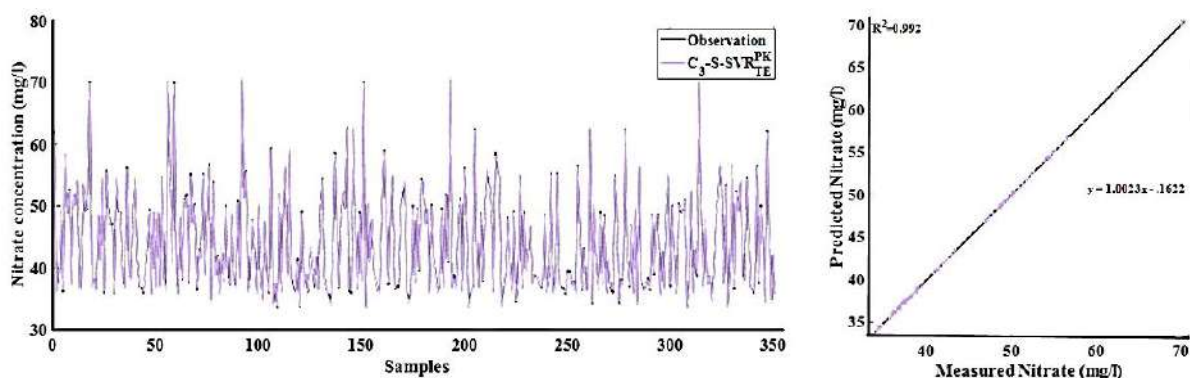
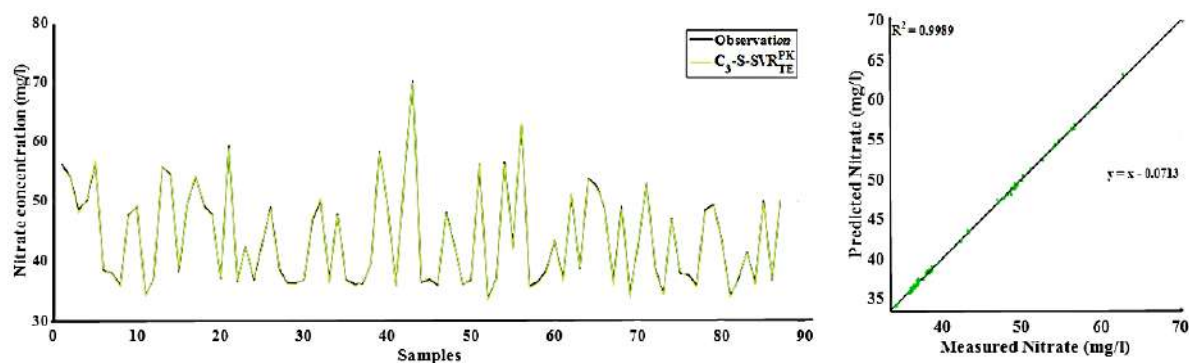
| Model | Parameter              | Value                                  |
|-------|------------------------|----------------------------------------|
| SFFS  | Best input Combination | EC, pH, TDS, HCO <sub>3</sub> , Ca, Na |
| SVR   | Kernel Function        | SK                                     |
|       | C                      | 0.0727                                 |
|       | $\Gamma$               | 0.3066                                 |
|       | D                      | 4                                      |

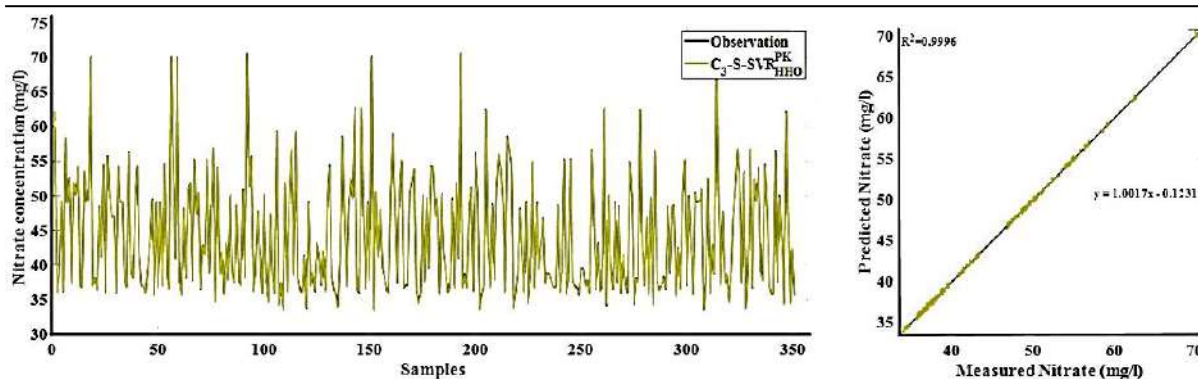
جدول ۱۵. نتایج شاخص های ارزیابی مدل  $C_3-S-SVR_{HHO}^{PK}$  در مرحله آموزش و تست

| Training |        |        |        |        |                | Testing |        |        |        |        |                |
|----------|--------|--------|--------|--------|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| RMSE     | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> | RMSE    | MAE    | WI     | EVS    | KGE    | R <sup>2</sup> |
| 0.1319   | 0.1018 | 0.9981 | 0.9958 | 0.9968 | 0.9973         | 0.1217  | 0.0490 | 0.9999 | 0.9997 | 0.9985 | 0.9997         |

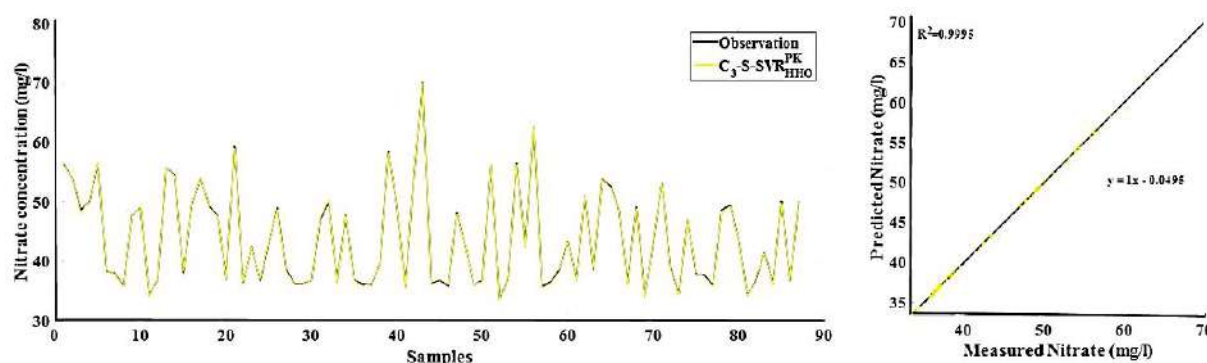
جدول ۱۶. مقدار بهینه پارامترهای مدل  $C_3-S-SVR_{HHO}^{PK}$  در مرحله آموزش و تست

| Model | Parameter                    | Value                                  |
|-------|------------------------------|----------------------------------------|
| SFFS  | Best input combination       | EC, pH, TDS, HCO <sub>3</sub> , Ca, Na |
| HHO   | Number of search agents      | 100                                    |
|       | Maximum number of iterations | 1000                                   |
| SVR   | Kernel Function              | PK                                     |
|       | C                            | 0.01196                                |
|       | $\Gamma$                     | 0.2750                                 |
|       | D                            | 4                                      |

شکل ۱۲. عملکرد مدل  $C_3-S-SVR_{TE}^{PK}$  در مرحله آموزش برای پیش بینی غلظت نیتراتشکل ۱۳. عملکرد مدل  $C_3-S-SVR_{TE}^{PK}$  در مرحله تست برای پیش بینی غلظت نیترات



شکل ۱۴. عملکرد مدل  $C_3-S-SVR_{HHO}^{PK}$  در مرحله آموزش برای پیش بینی غلظت نیترات



شکل ۱۵. عملکرد مدل  $C_3-S-SVR_{HHO}^{PK}$  در مرحله تست برای پیش بینی غلظت نیترات

### بحث

شبیه سازی و پیش بینی غلظت نیترات همیشه از مهم ترین مسائل در حوزه مدیریت منابع آب بوده است، در این تحقیق بعد از جمع آوری داده ها ابتدا داده های مربوط به غلظت نیترات با استفاده از JNB خوشه بندی شدند، سپس برای هر خوشه یک مدل SVR توسعه داده شد، هم زمان با فرآیند آموزش این مدل از الگوریتم SFFS برای انتخاب متغیرهای ورودی به مدل استفاده شد، سپس بر اساس نتایج حاصل از این سه مدل مقدار متوسط شاخص های خطا برای مرحله آموزش ( $RMSE=0.2387$ )،  $MAE=0.2236$ ،  $R^2=0.9874$  و تست ( $RMSE=0.2474$ ،  $MAE=0.2350$ ،  $R^2=0.9841$ ) محاسبه شدند، در این حالت از روش سعی و خطا برای این کار استفاده شد. در گام بعد از الگوریتم HHO برای تعیین مقدار بهینه پارامترهای توابع کرنل استفاده شد، در این حالت مقدار شاخص های  $R^2$  و  $MAE$ ،  $RMSE$  برای مرحله آموزش به ترتیب برابر  $0.9961$ ،  $0.1169$ ،  $0.1502$  است و مقداران ها برای مرحله تست به ترتیب برابر  $0.9945$ ،  $0.1308$ ،  $0.9978$  است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه اولاً استفاده از HHO برای پیش بینی غلظت نیترات میتواند باعث افزایش چشمگیر دقت مدل SVR می شود، دوماً استفاده به جا از مدل های یادگیری ماشین مختلف در کنار هم میتوانند نقش موثری در افزایش دقت مدل های رگرسیونی مانند SVR داشته باشد.

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، استفاده از الگوریتم HHO به طور قابل توجهی دقت مدل SVR را در پیش بینی غلظت نیترات بهبود بخشیده است. این بهبود نه تنها در شاخص های مرحله آموزش بلکه در مرحله تست نیز به وضوح مشاهده می شود. به کارگیری الگوریتم های بهینه سازی در تعیین پارامترهای مدل های یادگیری ماشین همچون SVR نشان دهنده اهمیت بالای انتخاب بهینه پارامترها در افزایش کارایی مدل ها است. این امر به ویژه در حوزه منابع آب و پیش بینی آلاینده های مهمی مانند نیترات می تواند راهگشا باشد. علاوه بر این، خوشه بندی داده ها پیش از مدل سازی نقش کلیدی در بهبود عملکرد مدل ایفا کرده است. داده های مختلف با ویژگی های آماری متفاوت، اگر به درستی خوشه بندی و به صورت مستقل مدل سازی شوند، می توانند منجر به نتایج دقیق تر

و قابل اعتمادتری شوند. این تحقیق نشان داد که خوشه بندی داده ها با استفاده از روش JNB و به کارگیری مدل های جداگانه برای هر خوشه می تواند به بهبود قابل توجه پیش بینی ها منجر شود و استفاده از این رویکرد در تحقیقات آینده توصیه می شود. همچنین استفاده از الگوریتم SFFS نیز برای انتخاب متغیرهای ورودی مدل به عنوان یکی دیگر از دستاوردهای این تحقیق برجسته شد. انتخاب بهینه و دقیق متغیرهای ورودی می تواند تأثیر زیادی بر عملکرد مدل داشته باشد و این تحقیق نشان داد که با انتخاب مناسب متغیرها، حتی در صورت استفاده از یک مدل نسبتاً ساده مانند SVR، می توان به نتایج بسیار دقیقی دست یافت. این نشان می دهد که کیفیت داده ها و انتخاب ورودی های مناسب به اندازه پیچیدگی خود مدل اهمیت دارد. در نهایت، این تحقیق تأیید می کند که ترکیب الگوریتم های بهینه سازی مانند HHO با مدل های یادگیری ماشین و به کارگیری روش های انتخاب ویژگی، می تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود دقت پیش بینی ها در مسائل مرتبط با منابع آب، به ویژه در پیش بینی آلاینده های مهم، مورد استفاده قرار گیرد. این راهبردها می توانند در مدیریت بهتر منابع آب و کاهش آلودگی های ناشی از نیترات و سایر آلاینده ها به کار گرفته شوند.

## 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

- Adeloju, S.B., Khan, S., & Patti, A.F. (2021). Arsenic Contamination of Groundwater and Its Implications for Drinking Water Quality and Human Health in Under-Developed Countries and Remote Communities—A Review. *Appl. Sci.* 11, 1926. <https://doi.org/10.3390/app11041926>
- Alabool, H.M., Alarabiat, D., Abualigah, L., Heidari, A.A. (2021). Harris hawks optimization: a comprehensive review of recent variants and applications. *Neural Comput & Applic*, 33, 8939–8980. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05720-5>
- 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>
- Bouchair, A., Yagoubi, B., & Makhlouf, S.A. (2022). A Cluster-Oriented Policy for Virtual Network Embedding in SDN-Enabled Distributed Cloud. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 11(1), 365-353. <https://dx.doi.org/10.12785/ijcds/120129>
- 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, 1247-1250. <https://dx.doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Chen, J., Xin, B., Peng, Zh., Dou, L., & Zhang, J. (2009). Optimal contraction theorem for exploration–exploitation tradeoff in search and optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 39(3), 680-691. <https://dx.doi.org/10.1109/TSMCA.2009.2012436>
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-Vector Networks. *Machine Learning*, 20, 273-297. <https://dx.doi.org/10.1007/BF00994018>
- Debnath, R., & Takahashi, H. (2004). Kernel selection for the support vector machine. *IEICE transactions on information and systems*, 87(12), 2903-2904. [https://www.researchgate.net/publication/220237100\\_Kernel\\_selection\\_for\\_the\\_support\\_vector\\_machine](https://www.researchgate.net/publication/220237100_Kernel_selection_for_the_support_vector_machine)
- Deng, W., Yao, R., Zhao, H., Yang, X., & Li, G. (2019). A novel intelligent diagnosis method using optimal LS-SVM with improved PSO algorithm. *Soft Comput*, 23, 2445–2462. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2940-9>
- Di Bucchianico, A. (2008). Coefficient of determination ( $R^2$ ). *Encyclopedia of statistics in quality and reliability*, 1, Wiley Publicatins. <https://doi.org/10.1002/9780470061572.eqr173>
- El Amri, A., M'nassri, S., Nasri, N., Nsir, H., & Majdoub, R. (2022). Nitrate concentration analysis and prediction in a shallow aquifer in central-eastern Tunisia using artificial neural network and time series modelling. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 43300-43318. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18174-y>
- Elzain, H. E., Chung, S.Y., Park, K.H., Senapathi, V., Sekar, S., Sabarathinam, Ch., Hassan, M. (2021). ANFIS-MOA models for the assessment of groundwater contamination vulnerability in a nitrate contaminated area. *Journal of Environmental Management*, 286, 112162. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112162>
- Esmaeili, 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>



- 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>
- Fried, J.J. (1975) Groundwater pollution. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=102612>
- Hearst, M. A., Dumais, S.T., Osuna, E., Platt, J., & Scholkopf, B. (1998). Support vector machines. *IEEE Intelligent Systems and their applications*, 13(4), 18-28. <https://doi.org/10.1109/5254.708428>
- Heidari, A. A., Mirjalili, S.A., Faris, H., Aljarah, I., Mafarja, M., & Chen, H. (2019). Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future generation computer systems*, 97, 849-872. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
- Lahjouj, A., Hmaidi, A.E. Bouhafa, K., & Boufala. M. (2020). Mapping specific groundwater vulnerability to nitrate using random forest: case of Sais basin, Morocco. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1451-1466. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-020-00761-6>
- Liang, Z., & Zhang, L. (2021). Support vector machines with the  $\epsilon$ -insensitive pinball loss function for uncertain data classification. *Neurocomputing*, 457, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.06.044>
- 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>
- Noble, W. (2006). What is a support vector machine? *Nat Biotechnol*, 24, 1565–1567. <https://doi.org/10.1038/nbt1206-1565>
- 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>
- Prieto, A., Prieto, B., Ortigosa, E.M., Ros, E., Pelayo, F., Ortega, J., & Rojas, I. (2016). Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges. *Neurocomputing*, 214, 242-268. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.06.014>
- Rizeei, H. M., Pradhan, B., Saharkhiz, A., & Lee, S. (2019). Groundwater aquifer potential modeling using an ensemble multi-adoptive boosting logistic regression technique. *Journal of Hydrology*, 579, 124172. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124172>
- 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>
- Vapnik, V., & Chervonenkis, A. (1971). On the uniform convergence of relative frequencies of events to their probabilities. *Theory of Probability & Its Applications*, 16(2), 264-280. <https://doi.org/10.1137/1116025>
- World Health Organization. (2022). Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda, *WHO publications*, Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>

- Wu, Q., Zhang, T., Sun, H., & Kannan, K. (2010). Perchlorate in tap water, groundwater, surface waters, and bottled water from China and its association with other inorganic anions and with disinfection byproducts. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 58(3), 543-550. <http://dx.doi.org/10.1007/s00244-010-9485-6>
- Zhang, Q., Qian, H., Xu, P., & Li, W. (2021). Effect of hydrogeological conditions on groundwater nitrate pollution and human health risk assessment of nitrate in Jiaokou Irrigation District. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126783. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126783>





## A comprehensive review of integrated modeling studies of surface water and groundwater resources using SWAT and MODFLOW models

Omid Raja<sup>1✉</sup>, Masoud Parsinejad<sup>2</sup>, and Afshin Khorsand<sup>3</sup>

1. Corresponding author, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: [omid.raja@ut.ac.ir](mailto:omid.raja@ut.ac.ir)
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: [parsinejad@ut.ac.ir](mailto:parsinejad@ut.ac.ir)
3. Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. E-mail: [af.kh67@gmail.com](mailto:af.kh67@gmail.com)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 13 November 2024

Received in revised form 31

January 2025

Accepted 13 April 2025

Available online 22 June 2025

#### Keywords:

balance component,

MODFLOW-NWT,

recharge,

SWAT,

water resources.

### ABSTRACT

**Objective:** The purpose of this study was to comprehensively review the studies conducted on surface water and groundwater resources modeling using SWAT, MODFLOW, and SWAT-MODFLOW models and analyze their limitations and capabilities.

**Method:** The research team was built by publishing an online environment among colleagues. The project was described in the online environment and the work steps were explained. The sample of articles included 235 articles from SID, Magiran, Scopus and ScienceDirect databases with keywords "SWAT", "MODFLOW", "SWAT-MODFLOW" until 1403. The titles of the articles, abstracts and, if necessary, parts of the articles were studied in order to answer the main question of the study, which is to investigate the limitations and capabilities of surface water and groundwater resource modeling.

**Results:** Investigations have shown that the uncertainty in determining recharge parameter will have a significant effect on the results of the simulation of the underground water flow and the estimation of the water balance components. Various methods and models have been used to determine the amount of groundwater recharge caused by deep infiltration and irrigation return flows, such as SWAT, WATLAC, HEC\_HMS, HYDRUS, MOBIDIC, etc. These models are often used in combination with the MODFLOW groundwater model to increase the accuracy in the simulation of the groundwater level and the effectiveness of different scenarios of combined extraction from surface and groundwater sources on the components of the water balance. In general, the studies have shown that the SWAT model is a comprehensive surface water simulation model for estimating recharge and evapotranspiration at the watershed scale; So that the effect of recharge values obtained from SWAT model as one of the most important input components of groundwater models in the simulation of water level and groundwater balance components using MODFLOW model as a comprehensive and integrated model of surface water and groundwater resources (SWAT-MODFLOW) has been approved in most studies. In total, the results of the research show that SWAT-MODFLOW integrated model can be used as a practical tool in explaining the appropriate exploitation pattern of integrated surface and underground water resources under the influence of different management scenarios.

**Conclusions:** This study provides an in-depth understanding of the use of surface water and groundwater models to researchers and managers, so that they can use the best tools based on available data and tools, and appropriate to the objectives of the studies. The use of these models can be used as a guide for the optimal and sustainable allocation of surface water and groundwater resources in competitive and highly fragile basins.

**Cite this article:** Raja, O., Parsinejad, M., & Khorsand, A. (2025). A comprehensive review of integrated modeling studies of surface water and groundwater resources using SWAT and MODFLOW models. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 22-52. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11367.1144>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11367.1144>

Publisher: Razi University.

## **Introduction**

The requirement for planning and managing water resources, especially in critical situations, is a comprehensive understanding of its ambiguous and complex situation. Obviously, the requirement of this knowledge is to have a tool that does not have a general and brief view of these conditions, so that it can take into account all the ongoing processes in the surface and subsurface systems. The components of the surface water and groundwater balance must be determined with proper accuracy. Considering the expansion of numerical models over the past two decades, there is still a lack of comprehensive models for integrated management of surface water and groundwater resources. Especially, the connection of surface water and ground water models; So not only do the results of the surface water models affect the inputs of the groundwater system, but also consider the effect of the groundwater system in the unsaturated zone and especially the root development zone. On the other hand, in recent decades, supplying the required water from groundwater sources has led to the development of management strategies for exploiting surface water and groundwater resources. These models can be used to optimize water consumption according to the pattern of supplying irrigation needs of agricultural lands from consolidated sources

## **Method**

Many studies of SWAT, MODFLOW, and combined SWAT-MODFLOW models have been used in small or large watersheds to estimate water balance components (runoff, recharge, exchange rate, and interaction between surface water and groundwater resources). In this study, a comprehensive review of the use of these models has been done so that the capabilities and limitations of each model have been explained and finally summarized. This work is an effort of Iranian researchers. The research team was built organically by circulating an open invitation for coauthors among colleagues. The invitation described the project, explained the online work environment, listed requirements for coauthorship, and generally followed recommendations for conducting an open, online paper. The sample of papers included 235 articles from the SID, Magiran, Scopus, and ScienceDirect databases with the keywords SWAT, MODFLOW, and SWAT-MODFLOW up through 2024.

## **Results**

Surveys show that groundwater models such as MODFLOW have been accepted as a standard groundwater flow simulation model; however, in this model, the amounts of recharge caused by rainfall and return flows of irrigation water are defined, as one of the most important input components of groundwater models, as a percentage of rainfall and total irrigation water. Investigations have shown that the uncertainty in determining this parameter will have a significant effect on the results of the simulation of the underground water flow and the estimation of the water balance components. Various methods and models have been used to determine the amount of groundwater recharge due to deep percolation and irrigation return flows. These models are often used in combination with the MODFLOW groundwater model to increase the accuracy in the simulation of the groundwater level and the effectiveness of different scenarios of combined extraction from surface water and groundwater sources on the components of the water balance. Investigations have shown that the SWAT model is a comprehensive surface water simulation model for estimating recharge and evapotranspiration at the watershed scale (Aloui et al., 2023). Therefore, the effect of recharge values obtained from the SWAT model as one of the most important input components of groundwater models in the simulation of water table and groundwater balance components using the MODFLOW

model as a comprehensive and integrated model of surface water and groundwater resources has been confirmed in most studies. In other studies, other models of simulating surface runoff, recharge and groundwater were used with the approach of simulating and optimizing the hydrological components of the catchment basin, and finally evaluating the state of combined exploitation of surfacewater and groundwater resources. The effect of water saving solutions and climate changes, in most of them the MODFLOW model has been used, on the groundwater level and water balance components have been investigated.

## **Conclusions**

The use of comprehensive and integrated models of surface and underground water resources such as SWAT-MODFLOW can be a good tool in examining the water balance components and evaluating the implementation of different management and exploitation scenarios; But due to the large volume of information in modeling, the data must have sufficient temporal and spatial distribution and they must have proper accuracy. Because the uncertainty in the use of the data will be effective in achieving the desired results and estimating the components of the water balance. Overall, these models can be used as a guide for optimal allocation and a practical tool in explaining the pattern of sustainable and appropriate exploitation of consolidated surface water and groundwater resources under the influence of different management scenarios in competitive and very fragile basins. This study provides an in-depth understanding of the use of surface water and groundwater models to researchers and managers, so that they can use the best tools based on available data and tools, and appropriate to the objectives of the studies

## **Author Contributions**

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

## **Data Availability Statement**

Data and links available on request from the authors.

## **Ethical Considerations**

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

## **Funding**

Not applicable.

## **Acknowledgements**

The authors from the University of Tehran and Urmia Lake Restoration Headquarters who provided the access to the information needed to prepare this article express their gratitude

## **Conflict of Interest**

The authors declare no conflict of interest.



## مروری جامع بر مطالعات مدل سازی تلفیقی منابع آب سطحی و آب زیرزمینی با استفاده از

### مدل های SWAT و MODFLOW

امید رجا<sup>۱</sup>، مسعود پارسی نژاد<sup>۲</sup>، و افشین خورسند<sup>۳</sup>

۱. نویسنده مسئول، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: [omid.raja@ut.ac.ir](mailto:omid.raja@ut.ac.ir)

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: [parsinejad@ut.ac.ir](mailto:parsinejad@ut.ac.ir)

۳. موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران. رایانامه: [af.kh67@gmail.com](mailto:af.kh67@gmail.com)

#### چکیده

#### اطلاعات مقاله

**هدف:** هدف این مطالعه بررسی جامع مطالعات انجام شده مدل سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل های SWAT، MODFLOW و SWAT-MODFLOW و تجزیه و تحلیل محدودیت ها و قابلیت آن ها بود.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

**روش پژوهش:** تیم تحقیقاتی با انتشار یک محیط آنلاین در میان همکاران ساخته شد. پروژه در محیط آنلاین تشریح و مراحل انجام کار توضیح داده شد. نمونه مقالات شامل ۲۳۵ مقاله از پایگاه های اطلاعاتی Magiran، SID، Scopus و ScinceDirect با کلید واژه های "SWAT"، "MODFLOW"، "SWAT-MODFLOW" تا سال ۱۴۰۳ بود. عناوین مقالات، چکیده ها و در صورت نیاز، بخش هایی از مقالات مطالعه شد تا به سوال اصلی مطالعه یعنی بررسی محدودیت ها و قابلیت های مدل سازی منابع آب سطحی و آب زیرزمینی پاسخ داده شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

**یافته ها:** بررسی ها نشان داده است که عدم قطعیت در تعیین پارامتر تغذیه آب زیرزمینی، به میزان قابل توجهی در نتایج شبیه سازی جریان آب زیرزمینی و برآورد مؤلفه های بیلان آب تأثیر خواهد داشت. از روش ها و مدل های متنوعی برای تعیین میزان تغذیه آب های زیرزمینی ناشی از نفوذ عمقی و جریانات برگشتی آبیاری مانند SWAT، WATLAC، HEC\_HMS، HYDRUS، MOBIDIC و... استفاده شده است. این مدل ها غالباً در ترکیب با مدل آب زیرزمینی MODFLOW برای افزایش دقت در شبیه سازی سطح آب زیرزمینی و اثربخشی سناریوهای مختلف برداشت توأمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر مؤلفه های بیلان آب استفاده شده است. به طور کلی بررسی ها نشان داده است که مدل SWAT به عنوان یک مدل جامع شبیه سازی آب های سطحی برای برآورد تغذیه و تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس حوضه آبریز است؛ به طوری که تأثیر مقادیر تغذیه حاصل از مدل SWAT به عنوان یکی از مهم ترین مؤلفه های ورودی مدل های آب زیرزمینی در شبیه سازی تراز سطح ایستابی و مؤلفه های بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW به عنوان یک مدل جامع و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی (SWAT-MODFLOW) در اکثر مطالعات تأیید شده است. در مجموع نتایج تحقیقات نشان می دهد از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW می توان به عنوان یک ابزار کاربردی در تبیین الگوی بهره برداری مناسب از منابع آب تلفیقی سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر سناریوهای مختلف مدیریتی استفاده کرد.

کلیدواژه ها:

تغذیه،

منابع آب،

مؤلفه بیلان،

MODFLOW-NWT،

SWAT

**نتیجه گیری:** بررسی این مطالعه بینش عمیقی در استفاده از مدل های آب سطحی و زیرزمینی را در اختیار محققین، پژوهشگران و مدیران قرار می دهد تا بتوانند بر اساس داده ها و ابزارهای موجود و متناسب با اهداف مطالعات و چالش های موجود در مناطق مختلف، بهترین ابزارها را به کار گیرند تا عدم قطعیت و خطاهای مدل سازی را به حداقل برسانند. به طور کلی استفاده از این مدل ها می تواند به عنوان راهنمای تخصیص بهینه و پایدار منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه های رقابتی و بسیار شکننده مورد استفاده قرار گیرد.

**استناد:** رجا، امید؛ پارسی نژاد، مسعود؛ و خورسند، افشین. (۱۴۰۴). مروری جامع بر مطالعات مدل سازی تلفیقی منابع آب سطحی و آب زیرزمینی با استفاده از مدل های

SWAT و MODFLOW. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۲)، ۵۲-۲۲.

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

© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

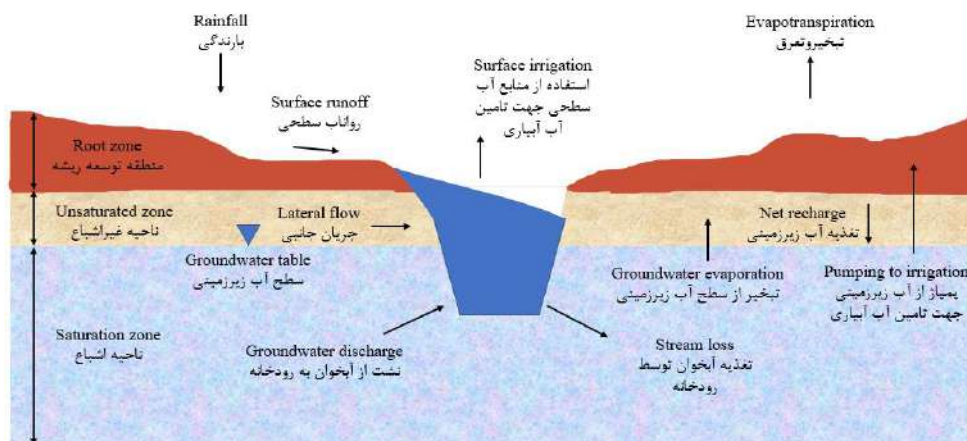




### مقدمه

تغییرات زمانی و مکانی منابع آب، رابطه مستقیمی با شناخت قوانین حاکم بر چرخه هیدرولوژیک دارد. نگرانی‌ها در خصوص وضعیت منابع آب در شرایطی که حفظ و حتی توسعه شرایط کنونی غیرقابل اجتناب است، پیچیده‌تر نیز می‌گردد (چو و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۰). منابع آبی که برای کشاورزی استفاده می‌شود به صورت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. باتوجه به جانمایی رودخانه‌ها و موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، تبادلات تغذیه و برداشت از منابع آب سطحی و آب زیرزمینی به صورت تومانی صورت می‌گیرد. فعل و انفعالات پیچیده بین آب‌های زیرزمینی و سطحی و سطح بالای مداخله انسان در مدیریت تأمین آب آبیاری در مناطق دارای آبخوان و رودخانه یک چالش منحصربه‌فرد در این زمینه است (وی و ییلی، ۲۰۱۹<sup>۲</sup>). باتوجه به این که آب‌های سطحی و زیرزمینی در سامانه هیدرولوژی اجزای جدا از هم نیستند و در مقیاس‌های مختلف مکانی یا زمانی دارای برهم‌کنشی پویا هستند (صابری مهر و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵؛ رجا و همکاران، ۱۴۰۱)؛ لذا برای دستیابی به بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع آب، مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی و سطحی (تغذیه و تخلیه) و پتانسیل منابع آب زیرزمینی باید بادقت نسبی شناسایی گردد (آرومی و همکاران، ۲۰۰۹<sup>۳</sup>).

لازمه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب به‌ویژه در شرایط بحرانی، شناخت کامل و جامع از وضعیت مبهم و پیچیده آن است. بدیهی است لازمه این شناخت، در اختیار داشتن ابزاری است که فاقد نگاه کلی و اجمالی به این شرایط باشد؛ به‌طوری که بتواند کلیه فرآیندهای در حال انجام در سامانه‌های سطحی و زیرسطحی را مدنظر قرار دهد که در شکل (۱) نشان داده شده است؛ بنابراین، ارائه یک مدل جامع با خصوصیات خاص مقیاس زمانی و مکانی که بتواند اثربخشی الگوهای بهره‌برداری تلفیقی بر مؤلفه‌های بیلان آب در محدوده مطالعاتی را برآورد کند به طور قطع خواهد توانست زیرساخت‌های لازم برای حل تناقضات بین عرضه و تقاضای منابع آب را فراهم آورد (کاردان مقدم و همکاران، ۲۰۱۸<sup>۴</sup>).



شکل ۱. نمایی از کلیه فرآیندهای سطحی و زیرزمینی

### ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مدل MODFLOW به‌عنوان یک مدل استاندارد شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در حالت پایدار و ناپایدار پذیرفته شده است

1. Chu et al
2. Wei & Baiely
3. Arumi et al
4. Kardan Moghaddam et al

(کادرون پالما و بنتلی، ۲۰۰۷<sup>۱</sup>؛ بارازولی و همکاران، ۲۰۰۸<sup>۲</sup>؛ سیبندا و همکاران، ۲۰۰۹<sup>۳</sup>؛ و بدکار و همکاران، ۲۰۱۲<sup>۴</sup>). مطالعات متعددی در رابطه با این مدل عددی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است که در ادامه به تعدادی از آن ها اشاره شده است.

## ۱. مطالعات داخلی

رجا و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعات خود نشان دادند که مقادیر تغذیه حاصل از بارش و نشت از رودخانه ها، کانال های آبیاری و انهار سنتی متأثر از محیط خیس شده متفاوت در مقاطع رودخانه ها و کانال ها بر اساس الگوی متفاوت تشکیل رواناب و برداشت از آن ها در سال های آبی مختلف و همچنین تغذیه ناشی از مدیریت های مختلف آبیاری شامل تأمین مقادیر متفاوت آب آبیاری در سال های مختلف آبی و در پهنه های مختلف دشت حاصل از مدل SWAT به عنوان ورودی مدل آب زیرزمینی MODFLOW مورد استفاده قرار می گیرد.

## ۲. مطالعات خارجی

اسفوکولئوس<sup>۵</sup> (۲۰۰۵) و اسکالون و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۶) در مطالعات خود بیان کردند که در این مدل مقادیر تغذیه ناشی از بارندگی و جریانات برگشتی آب آبیاری به عنوان یکی از مهم ترین مؤلفه های ورودی مدل های آب های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک به عنوان درصدی از بارندگی و کل آب آبیاری تعریف می شود.

ارزیابی مدل ها در مطالعات اسفوکولئوس و پرکینز<sup>۷</sup> (۲۰۰۰)؛ سان و کورنیش<sup>۸</sup> (۲۰۰۵)؛ و باجورندا و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۷) نشان می دهد تلفیق مدل های SWAT و MODFLOW می توانند با ابعاد مختلف مکانی، با شناخت شرایط هیدرولوژیکی در یک منطقه، امکان شبیه سازی دقیق تر تبادلات جریانات آب های سطحی رودخانه ها، انهار طبیعی و زیرزمینی را فراهم آورد.

و در<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۰) در ارزیابی های خود نشان داده است که عدم قطعیت در تعیین این پارامتر، به میزان قابل توجهی در نتایج شبیه سازی جریان آب زیرزمینی تأثیر خواهد داشت. در نتیجه تا زمانی که نرخ دقیق تغذیه به عنوان ورودی مدل جریان آب زیرزمینی برآورد نشود، نمی توان تأثیرات برداشت از آب های زیرزمینی را به درستی ارزیابی کرده و با اطمینان رفتار طولانی مدت یک آبخوان را تحت سناریوهای مختلف مدیریتی تخمین زد.

روش ها و مدل های متنوعی برای تعیین میزان تغذیه آب های زیرزمینی موجود است. در زمینه برآورد دقیق نفوذ عمقی و جریانات برگشتی آبیاری، مدل های مختلفی مانند WATLAC، HEC\_HMS، SWAT، HYDRUS، MOBIDIC و... در ترکیب با مدل آب زیرزمینی MODFLOW برای افزایش دقت در شبیه سازی سطح آب زیرزمینی و اثربخشی سناریوهای مختلف برداشت توأمان از منابع آب سطحی و آب زیرزمینی بر مؤلفه های بیلان آب استفاده شده است. بررسی ها نشان داده است که مدل SWAT به عنوان یک مدل جامع شبیه سازی آب های سطحی برای برآورد تغذیه و تبخیر و ترقق واقعی در مقیاس حوضه آبریز و زیر واحدهای هیدرولوژیکی<sup>۱۱</sup> (HRU) در سطح حوضه است. از طرفی مدل SWAT در شبیه سازی جریانات زیرسطحی دارای محدودیت است.

در مطالعات نیر و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۱)؛ بیلی و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۶)؛ دولت آبادی و زمردیان<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۶)؛ و چون و همکاران<sup>۱۵</sup>

1. Calderón Palma & Bentley
2. Barazzuoli et al
3. Sibanda et al
4. Bedekar et al
5. Sophocleous
6. Scanlon et al
7. Sophocleous & Perkins
8. Sun & Cornish
9. Bejranonda et al
10. Wheeler
11. Hydrologic Response Unit
12. Nair et al
13. Bailey et al
14. Dowlatabadi & Zomorodian
15. Chunn et al



(۲۰۱۹) نشان داده شده است که با استفاده هم‌زمان از دو مدل، برآورد نفوذ حاصل از رواناب سطحی و جریان جانبی در خاک به شبکه جریان و امکان بررسی بیلان آب زیرزمینی و برآورد نوسانات سطح ایستابی فراهم است. همچنین، در صورت استفاده هم‌زمان نه تنها محدودیت‌های دو مدل (برآورد تغذیه در مدل MODFLOW و جریان‌ات زیرسطحی در SWAT) را می‌توان پوشش داد، بلکه خصوصیات زمانی - مکانی منطقه مورد نظر را به طور مناسبی منعکس کرد (کیم و همکاران،<sup>۱</sup> ۲۰۰۸؛ پارک و بیل،<sup>۲</sup> ۲۰۱۷؛ و وی و همکاران،<sup>۳</sup> ۲۰۱۹).

مزیت مهم دیگر مدل تلفیقی بررسی مؤلفه‌های بیلان و اندرکنش آب‌های سطحی و آب زیرزمینی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مؤلفه‌های بیلان است. درعین‌حال می‌توان تغییرات سطح ایستابی و شیب آبخوان تحت الگوهای مختلف برداشت و مدیریت بهره‌برداری، میزان نرخ برداشت از چاه‌های بهره‌برداری از آبخوان تحت سناریوهای مختلف را مدیریت کرد (ایزدی و همکاران،<sup>۴</sup> ۲۰۱۲).

از یک سو سیر گستره نوع فعالیت‌های بهره‌برداری از منابع آب و عدم توجه کافی به برنامه‌ریزی و مدیریت تلفیقی منابع آب و از طرف دیگر عدم توازن مکانی و زمانی توزیع منابع آب و محدودیت‌های استفاده از آب‌های سطحی، ضرورت تحقیق در خصوص بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی را ایجاب می‌نماید (کیم و همکاران،<sup>۱</sup> ۲۰۰۸؛ و بیل و همکاران،<sup>۲</sup> ۲۰۱۶). باتوجه به گسترش مدل‌های عددی طی دو دهه گذشته، هنوز هم کمبود استفاده از مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت همه‌جانبه و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی وجود دارد. اتصال مدل‌های آب سطحی و آب زیرزمینی نه تنها نتایج مدل‌های آب سطحی، ورودی‌های سامانه آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه تأثیر سامانه آب زیرزمینی در منطقه غیراشباع و به‌ویژه منطقه توسعه ریشه را نیز مدنظر قرار می‌دهد. از طرفی در دهه‌های اخیر، تأمین آب مورد نیاز از منابع زیرزمینی منجر به توسعه استراتژی‌های مدیریتی توأمان بهره‌برداری از منابع آب سطحی و آب زیرزمینی شده است. این مدل‌ها می‌تواند برای بهینه‌سازی مصرف آب باتوجه به الگوی تأمین نیاز آبیاری اراضی کشاورزی از منابع تلفیقی مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی در این مطالعه بررسی جامعی از مطالعات شبیه‌سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی توسط مدل‌های SWAT، MODFLOW و ترکیب این دو مدل (SWAT-MODFLOW) انجام شده است. هدف اصلی از انجام این مطالعه سنتز مطالعات انجام شده است تا قابلیت‌ها و محدودیت‌های مدل‌های ذکر شده بیان شود تا محققین بتوانند بر اساس این ویژگی‌ها مدل‌های مناسب را در مناطق مختلف و چالش‌های آن‌ها انتخاب کنند. درعین‌حال به سایر مقالات جفت شده با مدل MODFLOW نیز در یک بخش به اختصار اشاره شده است.

## روش پژوهش

در سال‌های اخیر مدل‌های هیدرولوژیکی ظهور کرده است که در آن فرایندهای آب‌های سطحی و زیرزمینی با هم مرتبط هستند. در این زمینه، مدل‌های مختلفی در سطح حوضه‌های رودخانه‌ای و حتی در مقیاس قاره‌ای استفاده شده‌اند. اگرچه اکثریت مدل‌های به‌کارگرفته‌شده در مقیاس کوچک بوده و عمدتاً محدود به مطالعات نظری یا مطالعات خاص دولتی انجام شده و اغلب منتشر نشده‌اند (گازمن و همکاران،<sup>۵</sup> ۲۰۱۵؛ بارتل و بانزاف،<sup>۶</sup> ۲۰۱۶). برخی از این مدل‌ها معادلات آب‌های سطحی و زیرزمینی را هم‌زمان با در نظر گرفتن تبادلات و اندرکنش بین آب‌های سطحی در کانال‌ها، رودخانه و آبخوان، در یک بسته نرم‌افزاری واحد حل می‌کنند. در حین فرآیند انتخاب مدل‌های توسعه‌یافته تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی بایستی ملاحظات از جمله در دسترس بودن داده‌ها، سهولت استفاده، دقت مطلوب شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شود تا اطمینان حاصل شود که مدل قادر به تأمین خواسته‌های مطالعه است؛ بنابراین، توسعه یک مدل یکپارچه هیدرولوژیکی همه‌جانبه که تمام فعل‌وانفعالات عمده انتقال

1. Kim et al
2. Park & Bailey
3. Wei et al
4. Izady et al
5. Guzman et al
6. Barthel & Banzhaf



آب در یک سامانه کشاورزی در مقیاس بزرگ (در حوضه آبریز) را در کنار اعمال سناریوهای مدیریتی مختلف و اثربخشی هر کدام از آن‌ها ضروری است؛ به‌طوری‌که با مدیریت منابع آب در سطح این مقیاس می‌توان عوامل انسانی، اجتماعی و مدیریتی همراه با پیچیدگی و ناهمگنی سامانه را شبیه‌سازی و منعکس کرد (ایرواین و همکاران، ۲۰۱۲<sup>۱</sup>).

در مطالعات زیادی از مدل‌های SWAT و MODFLOW و همچنین از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW در حوضه‌های آبریز کوچک یا برای تخمین مؤلفه‌های بیلان آب (رواناب، تغذیه، نرخ تبادلات و اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی) استفاده شده است. این مطالعه تلاش محققان ایرانی است. تیم تحقیقاتی با انتشار یک محیط آنلاین در میان همکاران ساخته شد. در این محیط آنلاین، پروژه تشریح و مراحل انجام کار توضیح داده شد. نمونه مقالات شامل ۲۳۵ مقاله از پایگاه‌های اطلاعاتی SID، Magiran، Scopus و ScinceDirect با کلید واژه‌های "SWAT"، "MODFLOW"، "SWAT-MODFLOW" تا سال ۱۴۰۳ بود. عناوین مقالات، چکیده‌ها و در صورت نیاز، بخش‌هایی از مقالات مطالعه شد تا به سوال اصلی مطالعه یعنی بررسی محدودیت‌ها و قابلیت‌های مدل‌سازی منابع آب سطحی توسط مدل SWAT و آب زیرزمینی توسط مدل MODFLOW و ترکیب این دو مدل یعنی SWAT-MODFLOW پاسخ دهند. در این مطالعه بررسی جامعی در خصوص استفاده از این مدل‌ها در مطالعات مختلف پرداخته شده است؛ به‌طوری‌که قابلیت‌ها و محدودیت‌های هر یک از مدل‌ها تشریح و در نهایت جمع‌بندی انجام شد.

## یافته‌های پژوهش

### ۱. مدل SWAT

امروزه برای مطالعه و برنامه‌ریزی پایدار و مؤثر در مدیریت جامع حوضه‌های آبریز از مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. SWAT نمونه‌ای از مدل‌های نیمه توزیعی و هیدرولوژیک با مبنای فیزیکی است که بر اساس ویژگی‌های حوضه آبریز و شرایط اقلیمی آن به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و همچنین به پیش و محاسبه فرآیندهای مرتبط بیلان آب می‌پردازد (نیتسچ و همکاران، ۲۰۱۱<sup>۲</sup>؛ و جان‌جیک و تادیک، ۲۰۲۳<sup>۳</sup>). محققین بسیاری از مدل SWAT متناسب با اهداف مطالعه خود برای تحلیل مسائل مربوط به حوضه آبریز استفاده کرده‌اند که در جدول (۱) نشان داده شده است. بررسی نتایج مطالعات حاکی از پیش‌بینی و برآورد قابل قبول جریان‌ات سطحی، اثرات بلندمدت شیوه‌های مدیریت اراضی بر روی اجزای بیلان آب، رسوب و عملکرد مواد شیمیایی، شبیه‌سازی و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه‌های آبریز بزرگ با شرایط متنوع مدیریتی، نوع خاک و کاربری اراضی بوده است (لی و همکاران، ۲۰۱۲<sup>۴</sup>؛ و مو و همکاران، ۲۰۲۰<sup>۵</sup>).

به‌طور کلی نتایج محققان نشان می‌دهد که مدل SWAT به‌عنوان یک مدل هیدرولوژیکی در مدیریت جامع و پایدار حوضه‌های آبریز معرفی و پذیرفته شده است (آکاکو و همکاران، ۲۰۲۱<sup>۶</sup>؛ و آلویی و همکاران، ۲۰۲۳<sup>۷</sup>)؛ به‌طوری‌که این مدل با توجه به مبنای فیزیکی و تئوری قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان‌ات سطحی، شبیه‌سازی رسوب، مواد مغذی، بررسی تغییر اقلیم، مقادیر تغذیه حاصل از بارندگی و تغذیه مجدد از آبیاری، اثرات بلندمدت شیوه‌های مدیریت اراضی بر روی اجزای بیلان آب، شبیه‌سازی و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب از طریق تعریف و تقسیم‌بندی حوضه‌های بزرگ در مقیاس HRU است (رجا و همکاران، ۱۴۰۰)، اما مدل SWAT در محاسبات جریان‌ات زیرسطحی (آب زیرزمینی) دارای محدودیت است. مدل SWAT، مدلی نیمه توزیعی است که ماژولی برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی دارد. ماژول آب زیرزمینی آن کاملاً ساده شده است که در آن سیستم آب زیرزمینی به یک سفره آب زیرزمینی کم‌عمق و عمیق تقسیم می‌شود (رجا و همکاران، ۱۴۰۲)؛ به‌طوری‌که مؤلفه آب زیرزمینی مدل SWAT بر

1. Irvine et al
2. Neitsch et al
3. Janjić & Tadić
4. Li et al
5. Mo et al
6. Akoko et al
7. Aloui et al

اساس مدل های فله ای<sup>۱</sup> و مخزن خطی پایه گذاری شده است؛ بنابراین، به اندازه کافی دقیق نیست تا بتواند پارامترهای توزیعی هیدروژئولوژی آب های زیرزمینی مانند هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه و مقادیر متغیر پمپاژ را به صورت توزیعی در نظر بگیرد (کیم و همکاران، ۲۰۰۸؛ و علیاری و همکاران، ۲۰۱۹<sup>۲</sup>). نهایت فرآیندهای آب زیرزمینی را بیش از حد ساده می کند و سطح آب زیرزمینی را نمی توان به طور دقیق شبیه سازی کرد. علاوه بر این، نمی توان تأثیر برداشت و پمپاژ از چاه ها را بر شیب سطح آب های زیرزمینی شبیه سازی کرد (اسپرویل و همکاران، ۲۰۰۰<sup>۳</sup>؛ و چو و شیرمحمدی، ۲۰۰۴<sup>۴</sup>). با این حال، در مورد تخلیه از آب های زیرزمینی در فصول و دوره های خشک این امر کمتر اتفاق افتاده است که به احتمال زیاد به دلیل تقسیم آبخوان در مدل SWAT به دو آبخوان مجزا است. علی رغم این کمبود، به طور کلی شبیه سازی ها نتایج رضایت بخشی از تخلیه آب زیرزمینی توسط SWAT نیز داشته است (آیزن و همکاران، ۲۰۰۰<sup>۵</sup>؛ آرنولد و فوهرر، ۲۰۰۵<sup>۶</sup>؛ و ریسال و همکاران، ۲۰۲۰<sup>۷</sup>). در حقیقت، این آبخوان کم عمق است که تخلیه آب زیرزمینی (جریان پایه) را حفظ می کند؛ در حالی که آبخوان عمیق، آب را به رودخانه های خارج از حوضه انتقال می دهد و در بیلان هیدرولوژیکی، مدل SWAT به درستی در نظر گرفته نمی شود (رجا و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین مدل SWAT در شبیه سازی آب زیرزمینی به نهرها و نش جریان آب به آبخوان محدود شده است، زیرا آبخوان کم عمق را با تعیین آستانه ای برای برآورد تغذیه رودخانه مقایسه می کند و ارتفاع کف رودخانه و عمق آبخوان را در نظر نمی گیرد (فیکلین و همکاران، ۲۰۱۳<sup>۸</sup>؛ دیویا و همکاران، ۲۰۱۵<sup>۹</sup>؛ نگوین و دیتریچ، ۲۰۱۸<sup>۱۰</sup>؛ و مولینا-ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹<sup>۱۱</sup>).

جدول ۱. مطالعات انجام شده توسط مدل SWAT به همراه اهداف آن ها

| نام مدل | اهداف مطالعه                                                      | منابع                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SWAT    | شبیه سازی بارش - رواناب و رسوب                                    | ون لیو، ۲۰۰۳؛ رستمیان، ۲۰۰۸؛ لی و همکاران، ۲۰۱۲؛ خو و پنگ، ۲۰۱۳؛ لین و همکاران، ۲۰۱۲؛ پری هان و همکاران، ۲۰۲۰؛ حسینی و خالقی، ۲۰۲۰؛ عثمانی و همکاران، ۱۳۹۲؛ نوحه گر و همکاران، ۱۳۹۵؛ غلامی و همکاران، ۱۳۹۶؛ ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۷؛ شاهویی و همکاران، ۱۳۹۷؛ اعلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ نیکخو امیری و همکاران، ۱۳۹۸؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۸؛ رجا و همکاران، ۱۴۰۰؛ و چزگی و حامدی، ۱۴۰۲ |
|         | بررسی بیلان آب                                                    | گوساین و همکاران، ۲۰۰۵؛ جایا کریشان و همکاران، ۲۰۰۵؛ فرامرزی و همکاران، ۲۰۰۹؛ ریدوانسیا و همکاران، ۲۰۲۰؛ مو و همکاران، ۲۰۲۰؛ احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۳؛ فرخ نیا و همکاران، ۱۳۹۷ا؛ فرخ نیا و همکاران، ۱۳۹۷ب؛ فرخ نیا و همکاران، ۱۳۹۷c؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۲                                                                                                                             |
|         | بررسی راهکارهای صرفه جویی مصرف آب (تغییر سامانه آبیاری،)          | جان جیک و تادیک، ۲۰۲۳؛ احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۳، فرخ نیا و همکاران، ۱۳۹۷a؛ فرخ نیا و همکاران، ۱۳۹۷b؛ فرخ نیا و همکاران، ۱۳۹۷c؛ و رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۸                                                                                                                                                                                                                            |
|         | بررسی تغییرات کاربری اراضی و تغییر اقلیم بر مؤلفه های هیدرولوژیکی | آلویی و همکاران، ۲۰۲۳؛ پاتیل و ناتاراجا، ۲۰۲۰؛ ریدوانسیا و همکاران، ۲۰۲۰؛ چن و همکاران، ۲۰۲۰؛ ریسال و همکاران، ۲۰۲۰؛ جول ژول و همکاران، ۲۰۱۸؛ قدوسی و همکاران، ۱۳۹۳؛ خلیلیان و همکاران، ۱۳۹۹؛ حاجی قاسمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ و اصغری سرسکانرود و سعیدی ستا، ۱۴۰۲                                                                                                                          |

1. Models Lumped
2. Aliyari et al
3. Spruill et al
4. Chu & Shirmohammadi
5. Aizen et al
6. Arnold et al
7. Risal et al
8. Ficklin et al
9. Devia et al
10. Nguyen & Dietrich
11. Molina-Navarro et al

## ۲. مدل MODFLOW

مدل MODFLOW یک مدل آب زیرزمینی سه بعدی جریان غیرماندگار در محیط متخلخل اشباع، غیرهمگن و غیر ایزوتروپ است که به خوبی قادر به شبیه سازی آب زیرزمینی و بررسی ارتباط هیدرولیکی، تبادلات و اندرکنش آبخوان و رودخانه را داراست (اومار و احمد، ۲۰۰۹<sup>۱</sup>؛ و لیک و بارلو، ۲۰۱۳<sup>۲</sup>). از قابلیت های دیگر این مدل می توان به شبیه سازی و بررسی گزینه های مدیریتی مختلف برداشت از منابع آب سطحی و زیرزمینی، توسعه آبخوان با حفر چاه های جدید، حذف برداشت های غیرمجاز از منابع آب زیرزمینی و سطحی از طریق چاه های غیرمجاز و موتورپمپ ها، تأثیر زهکش ها در مناطق زه دار، اثرات احداث سدها و همچنین تغذیه مصنوعی بر وضعیت آب های سطحی و زیرزمینی اشاره کرد که در جدول (۲) ارائه شده است. بررسی مطالعات مختلف حاکی از برآورد و پیش بینی قابل قبول مدل MODFLOW در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی، تلفات نشت از کانال های شبکه آبیاری و اراضی آبی بر سطح آب زیرزمینی، اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی، شبیه سازی سناریوهای مختلف برداشت از آب زیرزمینی، شبیه سازی جبهه آب شور بین آبخوان ساحلی و دریاچه، تعیین نرخ پمپاژ بهینه در راستای پایداری آب زیرزمینی، تأثیر سناریوهای مختلف صرفه جویی مصرف آب از قبیل تغییر الگوی کشت، روش های نوین آبیاری بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، بررسی تأثیر حفر چاه های جدید، نصب سامانه زهکش یا حذف چاه های غیرمجاز بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، تأثیر تغذیه مصنوعی، سد و مخزن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان، تأثیر کاربری اراضی و توزیع تغذیه بر نوسانات آب زیرزمینی (کتابچی و همکاران، ۱۳۹۶؛ جنوبی و همکاران، ۱۳۹۷؛ ولی وند و کتیبه، ۱۳۹۸؛ پائول، ۲۰۰۶<sup>۳</sup>؛ و راین و همکاران، ۲۰۰۱<sup>۴</sup>) و شبیه سازی کیفی آب زیرزمینی بوده است (جدول ۲). به طور کلی این مدل به عنوان یک مدل استاندارد شبیه سازی آب زیرزمینی پذیرفته شده است. بررسی ها نشان داده است که مقادیر تغذیه حاصل از بارندگی و آب های برگشتی کشاورزی و نشت از رودخانه تأثیر قابل توجهی در تعیین بیلان آب دارد (ال سعید و همکاران، ۲۰۲۰<sup>۵</sup>؛ و لانگ وین و همکاران، ۲۰۲۴<sup>۶</sup>). همچنین نتایج مطالعات نشان داده است که برآورد مقادیر تغذیه، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره در شبیه سازی تراز سطح ایستابی بسیار مهم است. عدم برآورد دقیق این پارامترها بر محاسبات بیلان آب مدل تأثیر زیادی می گذارد (خالدی علمداری و همکاران، ۱۴۰۱؛ و وی و بیلی، ۲۰۱۹).

1. Umar & Ahmed
2. Leake & Barlow
3. Paul
4. Rayne et al
5. El Saeed et al
6. Langevin et al

جدول ۲. مطالعات انجام‌شده توسط مدل MODFLOW به همراه اهداف آن‌ها

| نام مدل                                             | اهداف مطالعه                                                                                    | منابع                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MODFLOW<br>(SEAWAT,<br>MT3DMS,<br>MT3D,<br>MODPATH) | شبیه‌سازی آب زیرزمینی (شرایط موجود و پیش‌بینی آینده)                                            | جوادی و همکاران، ۲۰۱۸؛ آلی و همکاران، ۲۰۱۹؛ لانگ‌وین و همکاران، ۲۰۲۴؛ چیت‌سازان و همکاران، ۱۳۹۴؛ و موحیدیان و چیت‌سازان، ۱۳۹۵                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                                     | شبیه‌سازی تلفات نشت از کانال‌های شبکه آبیاری و اراضی آبی بر سطح آب زیرزمینی                     | رودریگوز و همکاران، ۲۰۰۶؛ آرومی و همکاران، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ و رجائیان و همکاران، ۲۰۲۴                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                                     | اندرکنش بین منابع آب سطحی و زیرزمینی                                                            | رودریگوز و همکاران، ۲۰۰۶؛ آرومی و همکاران، ۲۰۰۹؛ کارول و همکاران، ۲۰۱۰؛ لیک و بارلو، ۲۰۱۳؛ وانگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ چیت‌سازان و همکاران، ۱۳۹۴؛ موحیدیان و چیت‌سازان، ۱۳۹۵؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۸؛ سروری و همکاران، ۱۳۹۸؛ دادآفرید و همکاران، ۱۳۹۸؛ سلطانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۱                                                                                                                                 |
|                                                     | شبیه‌سازی سناریوهای مختلف برداشت از آب چاه‌ها بر نوسانات آب زیرزمینی آبخوان                     | عبداله، ۲۰۰۹؛ لین و همکاران، ۲۰۱۲؛ آلوارز و همکاران، ۲۰۱۲؛ نگوین و دیتریچ، ۲۰۱۸؛ آلفایفی و همکاران، ۲۰۱۷؛ تریکی و همکاران، ۲۰۲۰؛ چیت‌سازان و همکاران، ۱۳۹۴؛ شیخی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ قبادی علمداری و همکاران، ۱۳۹۸؛ لایسائوی و همکاران، ۲۰۱۸؛ شاکور و همکاران، ۲۰۱۸؛ عقل‌مند و عباسی، ۲۰۱۹؛ تراس‌وینا-کاریلو و همکاران، ۲۰۱۹؛ ال‌سعید و همکاران، ۲۰۲۰؛ موندتیا و همکاران، ۲۰۲۴؛ رضایی و همکاران، ۱۴۰۱؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۱ |
|                                                     | شبیه‌سازی کیفی آب زیرزمینی                                                                      | جوادی و همکاران، ۲۰۱۸؛ بالوشا و همکاران، ۲۰۱۹؛ چودهاری و رهنوما، ۲۰۲۳؛ زانگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ و طاهریان و همکاران، ۱۳۹۷                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|                                                     | تأثیر سناریوهای مختلف صرفه‌جویی مصرف آب (تغییر الگوی کشت، روش‌های نوین آبیاری بر                | آلی و همکاران، ۲۰۱۹؛ راحیم و همکاران، ۲۰۲۳؛ و جنوبی و همکاران، ۱۳۹۷                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|                                                     | تأثیر تغذیه مصنوعی، سد و مخزن بر نوسانات سطح آب زیرزمینی آبخوان                                 | وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پارسا‌صدر و همکاران، ۱۳۹۵؛ شیخی‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ عباس‌نوبین‌پور و همکاران، ۱۳۹۸؛ ولی‌وند و کتیبه، ۱۳۹۸؛ یوسفی و همکاران، ۱۴۰۱؛ و کرباسی معروف و همکاران، ۱۴۰۲                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                     | بررسی تأثیر حفر چاه‌های جدید، نصب سامانه زهکش یا حذف چاه‌های غیرمجاز بر نوسانات سطح آب زیرزمینی | کینگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ جُداری و همکاران، ۲۰۲۴؛ کتابچی و همکاران، ۱۳۹۶؛ و سروری و همکاران، ۱۳۹۸                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|                                                     | تأثیر کاربری اراضی و توزیع تغذیه بر نوسانات آب زیرزمینی                                         | راین و همکاران، ۲۰۰۱؛ پائول، ۲۰۰۶؛ جنوبی و همکاران، ۱۳۹۷؛ کتابچی و همکاران، ۱۳۹۶؛ و ولی‌وند و کتیبه، ۱۳۹۸                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

در این مدل محاسبه‌ی تغذیه‌ی توزیعی آب زیرزمینی حاصل از مقادیر بارندگی و آبیاری دارای عدم قطعیت زیاد بوده و با مشکل مواجه است (بیلی و همکاران، ۲۰۱۶). یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی مقادیر تغذیه حاصل از بارش و تغذیه مجدد از طریق آبیاری است و تعریف نادرست و غیر دقیق این مقادیر در شبیه‌سازی آب زیرزمینی منجر به کاهش دقت در نتایج و در نتیجه مدیریت منابع آب زیرزمینی خواهد شد (ال یائوتی و همکاران، ۲۰۰۸<sup>۱</sup>؛ و تایی سمیرومی و کوچ،<sup>۲</sup>

1. El Yaouti et al

2. Taie Semiromi and Koch

۲۰۱۹). در نتیجه تا زمانی که نرخ تغذیه به عنوان ورودی مورد نیاز مدل سازی جریان آب زیرزمینی دقیق برآورد نشود، نمی توان تأثیرات برداشت از آب های زیرزمینی از آبخوان ها را به درستی ارزیابی کرده و رفتار طولانی مدت یک آبخوان را تحت سناریوهای مختلف مدیریتی با اطمینان تخمین زد (اسفوکولئوس و پرکینز، ۲۰۰۰؛ چانگ و همکاران، ۲۰۱۰<sup>۱</sup>؛ مولینا- ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹؛ و راحیم و همکاران، ۲۰۲۳<sup>۲</sup>). مدل های متنوعی برای تعیین میزان تغذیه آب های زیرزمینی با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر میزان تغذیه موجود است. حتی علی رغم اینکه تلاش های زیادی برای افزایش دقت تخمین نرخ تغذیه در مدل MODFLOW از طریق ترکیب فرآیندهای منطقه غیراشباع، به عنوان مثال از طریق بسته جریان منطقه غیراشباع<sup>۳</sup> (UZFI) (نیس وانگر و همکاران، ۲۰۱۱<sup>۴</sup>) انجام شده است، اما باز هم نمی توان فرآیندهای مربوط به آب و هوایی را به درستی در مدل به کار برد؛ بنابراین، ارزیابی شیوه های مدیریتی زمین و تأثیرات تغییرات آب و هوایی بر فعل و انفعالات آب های سطحی و زیرزمینی حتی باتوجه به پیشرفت و توسعه های صورت گرفته در مدل جریان آب زیرزمینی با عدم قطعیت قابل توجهی روبرو است؛ زیرا مدل MODFLOW فرآیندهای سطحی مانند فعل و انفعالات زمین و جو، نفوذ عمقی و رواناب سطحی، رشد گیاه و تأثیر شیوه های مدیریتی در سامانه های کشاورزی را شبیه سازی نمی کند (گازمن و همکاران، ۲۰۱۵؛ و چانگ و همکاران، ۲۰۱۰).

### ۳. مدل SWAT-MODFLOW

به دلیل محدودیت های هر یک از کدهای SWAT و MODFLOW، تلفیق این دو مدل در طی سال های اخیر کاربردهای موفقیت آمیز گسترده ای داشته است که در جدول (۳) نتایج آن ارائه شده است. مدل SWAT دارای ویژگی های نیمه توزیعی است و بخش آب زیرزمینی آن پارامترهای توزیع شده مانند هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را در نظر نمی گیرد (پوتی ویدها و لانامسی، ۲۰۱۱<sup>۵</sup>؛ نگوین و دیتریچ، ۲۰۱۸؛ و مولینا- ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹). برآورد دقیق مقادیر تغذیه آب زیرزمینی به اندازه محاسبه تراز آب زیرزمینی و میزان نرخ پمپاژ و توزیع آن دشوار و مهم است. از طرف دیگر از مهم ترین ورودی های شرایط مرزی در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی مقادیر تغذیه، تبخیر و تعرق و نحوه توزیع آن ها در هر دشت و منطقه ای است (سعادت پور و همکاران، ۱۳۹۸؛ رجا و همکاران، ۱۴۰۱؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۲). تعریف نادرست از این مقادیر در شبیه سازی آبخوان منجر به کاهش دقت و عدم کارایی مدل در مدیریت منابع آب زیرزمینی می گردد. برای حل این مشکل، از نتایج شبیه سازی جریان آب سطحی با مدل SWAT برای مقادیر تغذیه و تبخیر و تعرق به عنوان ورودی های مدل MODFLOW استفاده می شود (کیم و همکاران، ۲۰۰۸؛ و بیلی و همکاران، ۲۰۱۶). کلیه فرایند مدل سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW در شکل (۲) نشان داده شده است. در واقع در مدل سازی ترکیبی، مقادیر تغذیه با قطعیت بالاتر و توزیع مناسب تری قابل تعریف است. به عبارت دیگر به منظور حل این مشکل روشی پیشنهاد شده است که به موجب آن مشخصات واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) در مدل SWAT با سلول های مدل MODFLOW مبادله می شود (وی و بیلی، ۲۰۱۹؛ تابی سمیرومی و کوچ، ۲۰۱۹). با استفاده از این رابط از طریق تبدیل سلول HRU می توان میزان تغذیه آب زیرزمینی توزیع شده و تبخیر و تعرق آب زیرزمینی را به طور مؤثرتری برآورد و شبیه سازی کرد.

1. Chung et al
2. Raheem et al
3. Unsaturated-Zone Flow
4. Niswonger et al
5. Putthividhya and Laonamsai

جدول ۳. مطالعات مرتبط با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW برای بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی

| نام مدل      | اهداف مطالعه                                                                                                                                                                                | منابع                                                                                                                                                                           |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SWAT-MODFLOW | شبیه‌سازی رواناب سطحی و مقادیر تغذیه حاصل از بارش و جریان برگشتی آب آبیاری در افزایش دقت مدل‌سازی آب زیرزمینی                                                                               | کیم و همکاران، ۲۰۰۸؛ دولت آبادی و زمردیان، ۲۰۱۶؛ اتیات و همکاران، ۲۰۱۸؛ مولینا-ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹؛ موساسه و همکاران، ۲۰۱۹؛ وار و همکاران، ۲۰۲۳؛ و سعادت‌پور و همکاران، ۱۳۹۸ |
|              | شبیه‌سازی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی بین آبخوان و رودخانه                                                                                                                             | گال‌بیاتی و همکاران، ۲۰۰۶؛ اتیات و همکاران، ۲۰۱۸؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ دب و همکاران، ۲۰۱۹؛ موساسه و همکاران، ۲۰۱۹؛ سی‌سای و همکاران، ۲۰۲۳؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۱               |
|              | ارزیابی وضعیت بهره‌برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی                                                                                                                                       | اسفوکولئوس و پرکینز، ۲۰۰۰؛ چانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ گائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ سلمانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ سعادت‌پور و همکاران، ۱۳۹۸؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۱                                 |
|              | شبیه‌سازی کمی و کیفی یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی                                                                                                                                       | اتیات و همکاران، ۲۰۱۸؛ کورریا-گونزالز و همکاران، ۲۰۲۳؛ و یفرو و همکاران، ۲۰۲۴                                                                                                   |
|              | شبیه‌سازی سناریوهای مختلف برداشت از منابع آب زیرزمینی بر سطح آب زیرزمینی و مؤلفه‌های بیلان آب                                                                                               | مینکینگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ چانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ مولینا-ناوارو و همکاران، ۲۰۱۹؛ یفرو و همکاران، ۲۰۲۴؛ سعادت‌پور و همکاران، ۱۳۹۸؛ و رجا و همکاران، ۱۴۰۱                            |
|              | شبیه‌سازی تأثیر سناریوهای مختلف صرفه‌جویی مصرف آب از قبیل افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت، تغییر سامانه آبیاری، کاهش میزان آب آبیاری بر مؤلفه‌های بیلان آب و اندرکنش منابع آب سطحی و | وی و بیلی، ۲۰۱۹؛ تای سمیرومی و کوچ، ۲۰۱۹؛ دب و همکاران، ۲۰۱۹                                                                                                                    |
|              | بررسی تأثیر تغییرات آب‌وهوا و تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و مؤلفه‌های بیلان آب                                                                                                         | اسفوکولئوس و پرکینز، ۲۰۰۰؛ و آسلاام و همکاران، ۲۰۲۲                                                                                                                             |

با در نظر گرفتن تعامل بین شبکه جریان (رودخانه) و آبخوان جفت‌شدن دو مدل کامل می‌شود (چون و همکاران، ۲۰۱۹). برای این منظور، از بسته رودخانه<sup>۱</sup> در مدل MODFLOW برای تعامل رودخانه-آبخوان استفاده می‌شود (رجا و همکاران، ۱۴۰۱). در واقع امکان برآورد و شبیه‌سازی اندرکنش بین آبخوان و رودخانه و شاخه‌های جریان را فراهم می‌کند (اتیات و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۸؛ گائو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹؛ دب و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۹؛ موساسه و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۹). بنابراین با در نظر گرفتن مزایای هر دو مدل، به کمیت درآوردن کامل مؤلفه‌های هیدرولوژیکی امکان‌پذیر است. اگر تغذیه‌ی آب زیرزمینی به‌دست آمده بر اساس واحدهای پاسخ هیدرولوژیک به‌عنوان ورودی MODFLOW مورد استفاده قرار گیرد، خصوصیات زمانی-مکانی حوضه‌ی آبریز به‌طور مناسبی منعکس خواهند شد (کیم و همکاران، ۲۰۰۸).

مزایا و معایب استفاده از مدل‌های SWAT، MODFLOW و مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW در جدول (۴) آورده شده است. به‌طور کلی مدل ترکیبی قادر به شبیه‌سازی قابل قبول رواناب سطحی و مقادیر تغذیه حاصل از بارش و جریان برگشتی

1. River Package
2. Ehtiat et al
3. Gao et al
4. Deb et al
5. Mosase et al

آب آبیاری در افزایش دقت مدل سازی آب زیرزمینی، اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی بین آبخوان و رودخانه، ارزیابی وضعیت بهره برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی، شبیه سازی کمی و کیفی یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی، سناریوهای مختلف برداشت از منابع آب زیرزمینی بر سطح آب زیرزمینی و مؤلفه های بیلان آب، شبیه سازی تأثیر سناریوهای مختلف صرفه جویی مصرف آب از قبیل افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت، تغییر سامانه آبیاری، کاهش میزان آب آبیاری بر مؤلفه های بیلان آب و اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی و بررسی تأثیر تغییرات آب و هوا و تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و مؤلفه های بیلان آب بوده است که در جدول (۴) گردآوری شده است. با این حال به دلیل حجم گسترده اطلاعات در مدل سازی با توزیع زمانی و مکانی کافی (از جمله داده های آب و هوا، خاک، کاربری اراضی، داده های مدیریتی آبیاری، تأمین تلفیقی آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و غیره) و واسنجی چندمنظوره مدل ترکیبی، فرایند شبیه سازی پیچیده تر شده و زمان شبیه سازی و به کارگیری از مدل طولانی تر می شود. البته در سال های اخیر توسعه مدل ترکیبی به سمت ایجاد رابط گرافیکی کاربرپسند پیش رفته است تا مشکلات مربوط به کد نویسی، جفت کردن مدل ها و نحوه واسنجی آن ها برطرف شده و کاربران بتوانند به راحتی از این مدل استفاده کنند.

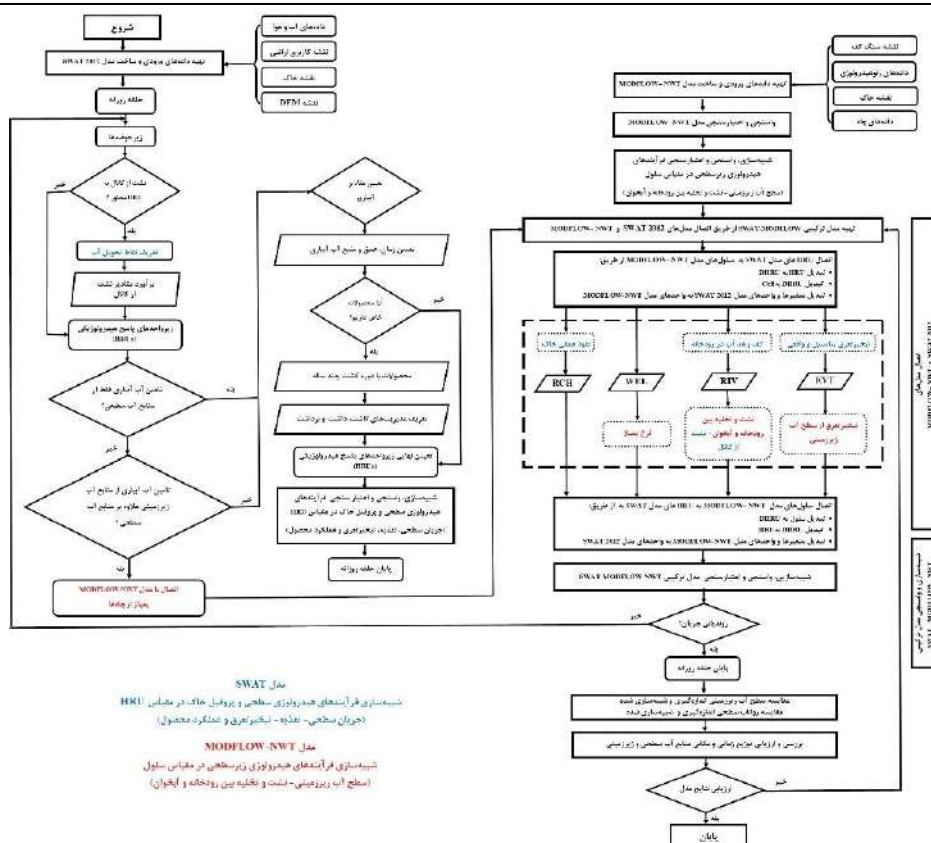
جدول ۴. مزایا و معایب در استفاده از مدل های SWAT، MODFLOW و SWAT-MODFLOW

| نام مدل | مزایا                                                                                                         | معایب                                                                          |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| SWAT    | • مدل جامع هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز                                                                      | • ماژول آب زیرزمینی کاملاً ساده                                                |
|         | • مدل نیمه توزیعی با مبنای فیزیکی                                                                             | • عدم توزیع دقیق پارامترهای توزیعی هیدروژئولوژی آب های زیرزمینی                |
|         | • شبیه سازی و برآورد مؤلفه های بیلان آب در حوضه های آبریز بزرگ با شرایط متنوع مدیریتی، نوع خاک و کاربری اراضی | • عدم شبیه سازی دقیق تأثیر برداشت و پمپاژ از چاه ها بر شیب سطح آب های زیرزمینی |
|         | • شبیه سازی جریان های سطحی، عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات                                                     | • محدودیت در شبیه سازی آب زیرزمینی به نهرها و نشت جریان آب به آبخوان           |
|         | • در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و تغییر اقلیم در شبیه سازی در مقیاس بزرگ                                          |                                                                                |
|         | • شبیه سازی اثرات بلندمدت شیوه های مدیریت اراضی بر روی اجزای بیلان آب                                         |                                                                                |
|         | • شبیه سازی رسوب و مواد مغذی عملکرد مواد شیمیایی                                                              |                                                                                |

**ادامه جدول ۴. مزایا و معایب در استفاده از مدل‌های SWAT، MODFLOW و SWAT-MODFLOW**

| نام مدل      | مزایا                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | معایب                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| MODFLOW      | <ul style="list-style-type: none"> <li>مدل آب زیرزمینی سه‌بعدی جامع در شرایط جریان غیرماندگار در محیط متخلخل اشباع، غیرهمگن و غیر ایزوتروپ</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>عدم شبیه‌سازی شیوه‌های مدیریت اراضی، نوع خاک و کاربری اراضی بر روی</li> </ul>                                                                                                                                                                                                               |
|              | <ul style="list-style-type: none"> <li>شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و مؤلفه‌های بیلان آب زیرزمینی در سطح آبخوان</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>عدم شبیه‌سازی عملکرد و تبخیر و تعرق محصولات</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                      |
|              | <ul style="list-style-type: none"> <li>بررسی ارتباط هیدرولیکی، تبادلات و اندرکنش بین آبخوان و رودخانه</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>عدم برآورد دقیق تغذیه حاصل از بارندگی و آب‌های برگشتی کشاورزی</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                    |
|              | <ul style="list-style-type: none"> <li>شبیه‌سازی و بررسی گزینه‌های مدیریتی مختلف برداشت از منابع زیرزمینی بر نوسانات آب زیرزمینی آبخوان</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>عدم در نظر گرفتن شرایط اقلیمی و تغییر اقلیم در شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ</li> </ul>                                                                                                                                                                                                           |
|              | <ul style="list-style-type: none"> <li>قابلیت شبیه‌سازی توسعه آبخوان با حفر چاه‌های جدید و یا حذف برداشت‌های غیرمجاز از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌های غیرمجاز و موتورپمپ‌ها</li> <li>شبیه‌سازی تأثیر زهکش‌ها در مناطق زه دار</li> <li>قادر به شبیه‌سازی اثرات احداث سد‌ها و همچنین تغذیه مصنوعی بر وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی</li> <li>توزیع دقیق پارامترهای توزیعی هیدروژئولوژی آب‌های زیرزمینی</li> </ul>                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| SWAT-MODFLOW | <ul style="list-style-type: none"> <li>شبیه‌سازی کلیه فرایندهای منابع آب سطحی و زیرزمینی در سطح آبخوان، دشت و حوضه</li> <li>رفع محدودیت‌های مربوط به مدل‌های SWAT و MODFLOW</li> <li>شبیه‌سازی کلیه مؤلفه‌های بیلان آب شامل رواناب سطحی، تبخیر و تعرق، عملکرد محصولات، سطح آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق از سطح آب زیرزمینی</li> <li>شبیه‌سازی اندرکنش و تبادلات بین آبخوان و رودخانه</li> <li>شبیه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر مؤلفه‌های بیلان آب</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>حجم گسترده اطلاعات در مدل‌سازی با توزیع زمانی و مکانی کافی (از جمله داده‌های آب‌وهوا، خاک، کاربری اراضی، داده‌های مدیریتی آبیاری، تأمین تلفیقی آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و غیره)</li> <li>واسنجی چندمنظوره مدل و پیچیده‌تر و طولانی‌تر شدن فرایند محاسبات در مدل ترکیبی</li> </ul> |





شکل ۲. مدل‌سازی تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW

## بحث

شناخت جامع از وضعیت پیچیده یک سامانه هیدرولوژیکی لازمه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع است. ابزاری که بتواند بدون نگاه کلی و اجمالی به یک سامانه هیدرولوژیک بسیار پیچیده، ارتباط فرآیندهای مختلف و چگونگی مدیریت و کنترل آن‌ها را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف مطابق با شرایط سامانه و نیازهای آن بررسی کند، به‌طور قطع خواهد توانست زیرساخت‌های لازم را برای حل و مدیریت چالش‌های موجود در مدیریت منابع آب را فراهم کند. الگوی تأمین آب مورد نیاز و بهره‌برداری توأمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی ضرورت استفاده از مدل‌های جامع برای ارزیابی و مدیریت همه‌جانبه و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد. علاوه بر لزوم تلفیق مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی، امکان استفاده از نتایج مدل‌های آب سطحی، به‌عنوان ورودی‌های سامانه آب زیرزمینی و همچنین لحاظ کردن تأثیر سامانه آب زیرزمینی در منطقه غیراشباع به‌خصوص منطقه توسعه ریشه در ارائه تصویر جامعی از تبادلات منابع آب سطحی و زیرزمینی ضروری است. درک تغییرات زمانی - مکانی نفوذ و تغذیه در مدل‌سازی آب زیرزمینی در مناطق تحت آبیاری بسیار مهم است. در واقع مقادیر تغذیه ناشی از نفوذ بارندگی و جریان‌ات برگشتی آب آبیاری یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های ورودی مدل‌های آب‌های زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است.

## نتیجه‌گیری

در بیشتر پژوهش‌های پیشین در ایران و حتی در مطالعات خارج از کشور، مقادیر تغذیه به‌صورت درصدی از میانگین بارش منطقه برای تغذیه و مقادیر تبخیر ثبت شده در ایستگاه‌های تبخیرسنجی برای تبخیر و تعرق تعریف و با روند سعی و خطا در مرحله واسنجی مدل MODFLOW استفاده شده است. حال آنکه این مقادیر مستقل از فرآیندهای هیدرولوژیکی سطحی نبوده و با عواملی مانند بارش، رواناب سطحی و ویژگی‌های جریان در ناحیه غیراشباع خاک در ارتباط است. بررسی‌ها نشان داده است که عدم قطعیت در تعیین این پارامتر، به میزان قابل توجهی در نتایج شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی تأثیر خواهد داشت. همچنین مدل

MODFLOW فاقد تعیین شرایط از نظر فرآیندهای هیدرولوژیکی در سطح زمین و حوضه است. از آنجاکه نرخ تغذیه آب‌های زیرزمینی به دلیل شرایط آب‌وهوایی، کاربری زمین و ناهمگنی هیدروژئولوژیکی از تنوع مکانی - زمانی برخوردار است، برای غلبه بر این محدودیت‌ها، استفاده از یک روش توسعه‌یافته تخمین تغذیه بر اساس اجزای تعادل آب و مرتبط با مدل یکپارچه آب زیرزمینی و سطحی ضروری است؛ بنابراین، این مدل MODFLOW اغلب با مدل‌های هیدرولوژیکی (آب سطحی) متصل و جفت می‌شود. در زمینه برآورد دقیق نفوذ عمقی و جریانات برگشتی آبیاری مدل‌های مختلفی مانند HEC\_HMS, WATLAC, MOBIDIC, SWAT, HYDRUS و... در ترکیب با مدل آب زیرزمینی MODFLOW برای افزایش دقت در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی و اثربخشی سناریوهای مختلف برداشت تومانی از منابع آب سطحی و زیرزمینی بر مؤلفه‌های بیلان آب استفاده شده است. هر کدام از این مدل‌ها توانسته‌اند با دقت قابل قبولی متناسب با اهداف مطالعات این نقیصه را برطرف کنند. با این حال، نتایج مطالعات نشان داده است که استفاده از مقادیر تغذیه برآورد شده مدل SWAT می‌تواند امکان شبیه‌سازی و برآورد دقیق‌تر نوسانات سطح ایستابی و بیلان آب زیرزمینی توسط مدل MODFLOW را با ابعاد مختلف مکانی فراهم کند.

به‌طور کلی بررسی نتایج حاصل از تحقیقات مبین این نکته است که استفاده هم‌زمان از دو مدل MODFLOW و SWAT برای شناخت شرایط هیدرولوژیکی در یک منطقه به‌خوبی توانسته است نقایص مرتبط با محدودیت‌های نیمه توزیعی و توزیعی بودن دو مدل را پوشش دهد. در اکثر این مطالعات تمرکز اصلی روی دو پارامتر تغذیه و تبخیر و تفرق و تلاش در راستای افزایش دقت مقادیر این دو پارامتر در شبیه‌سازی‌ها بوده است. همچنین استفاده از مدل‌های جامع و یکپارچه منابع آب سطحی و زیرزمینی مانند SWAT-MODFLOW می‌تواند ابزار خوبی در بررسی مؤلفه‌های بیلان آب و ارزیابی اعمال سناریوهای مدیریتی و بهره‌برداری مختلف باشد. همچنین مدل ترکیبی قادر خواهد بود اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی در پهنه‌های مختلف دشت و آبخوان متناسب با تفاوت‌های سهم تأمین آب کشاورزی از منابع آب تلفیقی را شبیه‌سازی کند. بررسی اندرکنش منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از یک مدل تلفیقی آب سطحی و آب زیرزمینی در تأمین آب کشاورزی قادر به پیش‌بینی تبادلات مابین آب‌های سطحی و زیرزمینی دارد که تأثیر قابل توجهی بر جریانات سطحی و نوسانات سطح ایستابی در پهنه‌های مختلف دشت دارد. چالش اصلی بررسی برهم‌کنش و پایش سطح ایستابی و جریانات سطحی در دامنه حریم جریانات طبیعی است. در واقع مدل تلفیقی باید قادر باشد مقادیر تبادلات بین منابع آب سطحی و زیرزمینی را با توجه به شیب هیدرولیکی بین آب زیرزمینی و جریان رودخانه برآورد کند.

با این حال لازم به ذکر است که به دلیل حجم گسترده اطلاعات در مدل‌سازی، باید داده‌ها دارای توزیع زمانی و مکانی کافی (از جمله داده‌های خاک، کاربری اراضی، داده‌های مدیریتی آبیاری، تأمین تلفیقی آبیاری از منابع آب سطحی و زیرزمینی و غیره) بوده و باید از دقت مناسبی برخوردار باشند؛ زیرا عدم قطعیت در استفاده از داده‌های مذکور در دستیابی به نتایج مطلوب و برآورد مؤلفه‌های بیلان آب تأثیرگذار خواهد بود. واسنجی چندمنظوره مدل ترکیبی منجر به پیچیده‌تر شدن فرایند و زمان شبیه‌سازی می‌شود. البته توسعه و ایجاد رابط گرافیکی کاربرپسند برای مدل ترکیبی در سال‌های اخیر باعث کاهش مشکلات مربوط به کدنویسی، جفت کردن مدل‌ها و نحوه واسنجی آن‌ها توسط کاربران می‌شود. همچنین استفاده از داده‌های میدانی از جمله عملکرد و تبخیر و تفرق محصولات با مقیاس مکانی و زمانی مناسب در واسنجی مدل بر دقت و اعتبار نتایج خواهد افزود. تبخیر و تفرق مهم‌ترین مصرف و خروجی از دشت در مناطق با سطح زیر کشت آبی است؛ بنابراین مقادیر تبخیر و تفرق محصولات باید با داده‌های میدانی از جمله لایسیمتر و یا برآورد تصاویر ماهواره‌ای مقایسه شود؛ چرا که مقادیر این مؤلفه بر سایر مؤلفه‌های بیلان آب تأثیر مستقیم می‌گذارد. از طرف دیگر در صورت برداشت‌های غیرمجاز از منابع آب سطحی و زیرزمینی از طریق موتورپمپ‌ها و چاه‌های غیرمجاز بایستی در مدل‌سازی تعریف شود؛ زیرا در صورت عدم لحاظ این مقادیر، مؤلفه‌های بیلان آب در محدوده با خطا و عدم قطعیت برآورد خواهد شد. در این مطالعه بررسی جامعی در خصوص مدل‌سازی منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل‌های SWAT، MODFLOW و مدل ترکیبی SWAT-MODFLOW انجام شده است؛ درحالی‌که مدل‌های دیگر و حتی الگوریتم‌های مختلف شبکه عصبی برای شبیه‌سازی آب سطحی و زیرزمینی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در جهت شبیه‌سازی منابع آب تلفیقی استفاده می‌شوند که بایستی در مطالعات آینده به آن‌ها توجه شود. بررسی این مطالعه بینش عمیقی در استفاده از

مدل های آب سطحی و زیرزمینی را در اختیار محققین، پژوهشگران و مدیران قرار می دهد تا بتوانند بر اساس داده ها و ابزارهای موجود متناسب با اهداف مطالعات و بر اساس چالش های موجود در مناطق مختلف، بهترین ابزارها را به کار گیرند تا عدم قطعیت و خطاهای مدل سازی را به حداقل برسانند. به طور کلی استفاده از این مدل ها می تواند به عنوان راهنمای تخصیص بهینه و پایدار منابع آب سطحی و زیرزمینی در حوضه های رقابتی و بسیار شکننده مورد استفاده قرار گیرد.

## 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 آنها است.

### مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به طور یکسان در مفهوم سازی مقاله و نوشتن پیش نویس های اصلی و بعدی مشارکت داشتند.

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

### سپاسگزاری

نگارندگان از دانشگاه تهران و ستاد احیای دریاچه ارومیه که امکان دسترسی به اطلاعات مورد نیاز تنظیم این مقاله را فراهم آوردند مراتب قدردانی و سپاس خود را اعلام می دارند.

## منابع

- ابراهیمی، پیام، سلیمی کوچی، جمیله، و محسنی ساروی، محسن. (۱۳۹۷). واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در شبیه سازی رواناب، مطالعه موردی: حوزه آبخیز نکا. *مجله مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۰ (۳)، ۲۷۹-۲۶۶. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117332>
- احمدزاده، حجت، مرید، سعید، و دلاور، مجید. (۱۳۹۳). ارزیابی تغییرات عملکرد محصولات کشاورزی و ورودی به دریاچه ارومیه در حوضه زرنه رود تحت تاثیر تغییر سیستم های آبیاری از سطحی به تحت فشار با استفاده از مدل SWAT. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱ (۸)، ۱-۱۵. [https://idj.iaid.ir/article\\_54532.html](https://idj.iaid.ir/article_54532.html)
- اصغری سرسکانرود، صیاد، و سعیدی ستا، علیرضا. (۱۴۰۲). بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی روی رواناب حوضه رودخانه قره چای با استفاده از مدل SWAT. *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۴ (۳)، ۹۵-۱۱۸. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.134432.1535>
- اعلمی، محمدتقی، عباسی، حبیب، و نیک سخن، محمدحسین. (۱۳۹۷). مقایسه دو روش متفاوت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد میزان رواناب و بار مواد جامد معلق حوضه. *مجله دانش آب و خاک*، ۲۸ (۳)، ۵۳-۶۴. [https://water-soil.abrizu.ac.ir/article\\_8123.html](https://water-soil.abrizu.ac.ir/article_8123.html)
- پارسا صدر، حسین، محمدزاده، حسین، و ناصری، حمیدرضا. (۱۳۹۵). شبیه سازی عددی آبخوان دشت روداب سبزوار و بررسی اثرات احداث سد روداب بر آن، *مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک*، ۲۳ (۱)، ۱۱۹-۱۳۵. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3022>
- پریسان، طاهریان، انصاری، حسین، داوری، کامران، بهشتی، علی اصغر، و ضیایی، علی نقی. (۱۴۰۰). مدلسازی جریان و تغییرات کیفی (شوری) آب زیرزمینی در دشت نیشابور توسط کدهای MODFLOW و MT3DMS. *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵ (۱)، ۲۷-۳۷. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.3.3>
- جنوبی، رزا، رضادری نژاد، وحید، بهمنش، جواد، و عباسپور، کریم. (۱۳۹۷). بررسی تغییرات کمی آب زیرزمینی دشت میاندوآب متأثر از مدیریت بهره برداری از منابع آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW-NWT. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۹ (۲)، ۴۶۷-۴۸۱. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.239340.667731>
- چزگی، جواد، و حامدی، احسان. (۱۴۰۲). اولویت بندی سیلخیزی زیرحوضه های رودخانه سرباز با استفاده از مدل SWAT. *مجله پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم*، ۳ (۱)، ۷۳-۸۶. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6478.1026>
- چیت سازان، منوچهر، جوادچاوشی، زهرا، و ناصری، حمیدرضا. (۱۳۹۴). پیش بینی اثر متقابل آبخوان- رودخانه در دشت دوسلق، استان خوزستان با استفاده از مدل MODFLOW. *مجله پژوهش آب ایران*، ۹ (۴)، ۱۳۹-۱۴۷. [https://iwrj.ku.ac.ir/article\\_11104.html](https://iwrj.ku.ac.ir/article_11104.html)
- حاجی قاسمی، شهاب، ذاکری نیری، محمود، و نجفی جیلانی، عطااله. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب سطحی با مدل SWAT (مورد مطالعه: رودخانه مزلقان). *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۵ (۱)، ۱۳۷-۱۲۱. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1>
- حیدری، جواد، چیت سازان، منوچهر، و میرزایی، سیدیحیی. (۱۳۹۸). مدل سازی رابطه هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت صحنه- بیستون با رودخانه گاماسیاب و مدیریت آبخوان. *مجله هیدروژئولوژی*، ۴ (۱)، ۱۴۰-۱۵۲. <https://doi.org/10.22034/hydro.2019.8447>

- خالدی علمداری، محمد، مجنونی هریس، ابوالفضل، و فاخری فرد، احمد. (۱۴۰۱). برآورد هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره آبخوان دشت شبستر با استفاده از مدل عددی. مجله هیدروژئولوژی، ۷ (۱)، ۴۲-۵۲.
- [https://hydro.abrizu.ac.ir/article\\_13724.html](https://hydro.abrizu.ac.ir/article_13724.html)
- خلیلیان، سودابه، سرائی تبریزی، مهدی، بابازاده، حسین، و صارمی، علی. (۱۳۹۹). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان ورودی به سد زاینده رود. مجله علوم آب و خاک، ۲۴ (۴)، ۲۷۱-۲۵۵.
- <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.4.7492>
- دادآفرید، سمانه، حصار، بهزاد، و عبقری، هیراد. (۱۳۹۸). مدل سازی اندرکنش سطح آب دریاچه ارومیه و آبخوان ساحلی با استفاده از GMS. مجله پژوهش آب ایران، ۱۳ (۳۳)، ۱۳۷-۱۲۹.
- [https://iwrij.ku.ac.ir/article\\_10648.html](https://iwrij.ku.ac.ir/article_10648.html)
- دوستی رضایی، مهرنگ، زینالزاده، کامران، بشارت، سینا، و امیرعطایی، بابک. (۱۴۰۱). تأثیر سناریوهای مدیریتی و اقلیمی در تغییرات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی مدلسازی عددی در آبخوان دشت سلماس). مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶ (۲)، ۲۹۳-۲۸۰.
- <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.2.2.1>
- رجا، امید، پارسی نژاد، مسعود، و تجریشی، مسعود. (۱۴۰۰). واسنجی چندمنظوره مدل SWAT در برآورد رواناب، تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات (مطالعه موردی: دشت مهاباد). مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷ (۴)، ۳۴-۱۱.
- <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.4.1.8>
- رجا، امید، پارسی نژاد، مسعود، و تجریشی، مسعود. (۱۴۰۱). ارزیابی اندرکنش آبخوان و رودخانه با استفاده از مدل تلفیقی SWAT-MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت مهاباد). مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۴۵ (۴)، ۷۲-۴۹.
- <https://doi.org/10.22055/jise.2022.40163.2018>
- رجا، امید، پارسی نژاد، مسعود، و تجریشی، مسعود. (۱۴۰۱). شبیه سازی بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT (مطالعه موردی: دشت مهاباد). مجله آب و خاک، ۳۶ (۱)، ۵۲-۳۱.
- <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74890.1138>
- رجا، امید، پارسی نژاد، مسعود، و تجریشی، مسعود. (۱۴۰۲). برآورد و ارزیابی مولفه های بیلان آب با واسنجی مدل SWAT. مطالعه موردی: دشت مهاباد. مجله مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۵ (۱)، ۱۲۹-۱۰۹.
- <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357631.1957>
- رضایی مقدم، محمدحسین، حجازی، میراسداله، و بهبودی، عبدالله. (۱۳۹۸). برآورد میزان رواناب حوضه آبریز لنبران چای در استان آذربایجان شرقی: کاربرد مقایسه ای روش های واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT. مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۸ (۳۱)، ۷۵-۵۹.
- <https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81998>
- رضایی مقدم، محمدحسین، رحیم پور، توحید، و نخستین روحی، مهسا. (۱۳۹۵). پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل شبکه ای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه های آبریز منتهی به دشت تبریز). /کوهیدرولوژی، ۳ (۳)، ۳۸۹-۳۷۹.
- <https://doi.org/10.22059/ije.2016.60026>
- سروری، سعید، ضیائی، علی نقی، و جودوی، عطااله. (۱۳۹۸). بررسی اندرکنش رودخانه و آبخوان در دشت بجنورد به وسیله اندازه گیری های میدانی و مدل سازی عددی. آب و خاک، ۳۳ (۵)، ۶۸۳-۶۷۱.
- <https://doi.org/10.22067/jsw.v33i5.72735>
- سعادت پور، عالییه، علیزاده، امین، نقی ضیائی، علی، و ایزدی، عزیزاله. (۱۳۹۸). مدل سازی یکپارچه آب سطحی و زیرزمینی در مناطق متکی بر سیستم کشاورزی آبی با استفاده از مدل SWAT-MODFLOW (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور). آب و خاک، ۳۳ (۴)، ۵۳۶-۵۲۱.
- <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.74658>

- سلطانی، فرزانه، جوادی، سامان، روزبهرانی، عباس، مساح بوانی، علیرضا، و لطفی، سعید. (۱۴۰۱). شبیه سازی تبادلات آب سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW-OWHM (منطقه مورد مطالعه: دشت شازند). نشریه /کوهیدرولوژی، ۹ (۱)، ۲۱۰-۱۹۹. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.336586.1595>
- شاهویی، سیدوحید، پرهت، جهانگیر، صدقی، حسین، حسینی، مجید، و صارمی، علی. (۱۳۹۷). شبیه سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT و بررسی و ارزیابی مدل در دوره های واسنجی و اعتبارسنجی، مطالعه موردی: حوضه روانسر سنجابی استان کرمانشاه در کشور ایران. نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۰ (۳)، ۴۷۷-۴۶۴. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109516.1273>
- شیخی پور، بنفشه، جوادی، سامان، و بنی حبیب، محمد ابراهیم. (۱۳۹۷). ارزیابی اثربخشی سناریوهای احیای آبخوان توسط شاخص های پایداری و بهره برداری منابع آب، مطالعه موردی: آبخوان شهرکرد. مجله آب و خاک، ۳۲ (۲)، ۲۸۱-۲۶۷. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i1.68794>
- صابری مهر، صادق، اصغری مقدم، اصغر، و ندیری، عطاله. (۱۳۹۶). شبیه سازی جریان آب زیرزمینی و نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی دشت شبستر با استفاده از نرم افزار GMS. دو فصلنامه کوآرترنری / ایران، ۳ (۱)، ۵۰-۴۱. <https://doi.org/10.22034/irqua.2017.701896>
- عابدی کویابی، جهانگیر، و گلابچیان، مریم. (۱۳۹۴). برآورد ضرایب هیدرودینامیک منابع آب زیرزمینی حوضه آبخیز کوهپایه- سگری با استفاده از مدل MODFLOW. مجله علوم آب و خاک، ۱۹ (۷۲)، ۲۹۲-۲۸۱. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.72.24>
- عباس نوین پور، اسفندیار، محمد حسین زاده، مهسا، و رضایی، حسین. (۱۳۹۸). اثر احداث سد مخزنی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی سد مخزنی شهرچای، دشت ارومیه، ایران). نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۶ (۴)، ۹۳-۷۵. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.16103.3144>
- عثمانی، هیوا، معتمد وزیری، بهارک، و معینی، ابوالفضل. (۱۳۹۲). شبیه سازی دبی، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT. مطالعه موردی: حوضه بالادست سد لتیان تهران. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۵ (۲)، ۱۴۳-۱۳۴. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2013.101809>
- غلامی، عباس، شاهی، کاکا، حبیب نژاد روشن، محمود، وفاخواه، مهدی، و سلیمانی، کریم. (۱۳۹۶). ارزیابی کارایی مدل نیمه توزیعی SWAT در شبیه سازی جریان رودخانه ای (مطالعه موردی حوضه آبخیز تالار استان مازندران). مجله تحقیقات آب و خاک / ایران، ۴۸ (۳)، ۴۷۶-۴۶۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.63414>
- فرخ نیا، اشکان، مرید، سعید، دلاور، مجید، و عباسپور، کریم. (۱۳۹۷). توسعه مدل SWAT-LU برای بررسی و شبیه سازی علل افت تراز دریاچه ارومیه و ارزیابی اثربخشی راه کارهای مطرح در احیای آن (نقش عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات هیدرولوژیکی حوضه و دریاچه). مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲ (۵)، ۱۰۵۸-۱۰۴۱. [https://idj.aid.ir/article\\_81775.html](https://idj.aid.ir/article_81775.html)
- فرخ نیا، اشکان، مرید، سعید، دلاور، مجید، و عباسپور، کریم. (۱۳۹۷b). توسعه مدل SWAT-LU برای بررسی و شبیه سازی علل افت تراز دریاچه ارومیه و ارزیابی اثربخشی راه کارهای مطرح در احیای آن بخش سوم: تحلیل حسابداری آب و ارزیابی راه کارهای احیای دریاچه ارومیه. مجله آبیاری و زهکشی / ایران، ۱۲ (۶)، ۱۳۸۱-۱۳۶۲. [https://idj.iaid.ir/article\\_85904.html](https://idj.iaid.ir/article_85904.html)
- فرخ نیا، اشکان، مرید، سعید، عباسپور، کریم، و دلاور، مجید. (۱۳۹۷c). توسعه مدل SWAT-LU برای بررسی و شبیه سازی علل افت تراز دریاچه ارومیه و ارزیابی اثربخشی راه کارهای مطرح در احیای آن بخش اول: توسعه، واسنجی و صحت سنجی

مدل SWAT-LU. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۲ (۳)، ۶۶۵-۶۴۷.

[https://idj.iaid.ir/article\\_73673.html](https://idj.iaid.ir/article_73673.html)

قبادی علمداری، شعله، اصغری مقدم، اصغر، و شهسواری، علی اکبر. (۱۳۹۸). امکان سنجی استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در دشت دهلران با استفاده از مدل MODFLOW. مجله علوم آب و خاک، ۲۳ (۴)، ۵۷-۴۵.

<http://dx.doi.org/10.47176/jwss.23.4.33561>

قدوسی، میثم، دلاور، مجید، و مرید، سعید. (۱۳۹۳). اثر تغییرات کاربری اراضی بر هیدرولوژی حوضه آبریز آجی چای و ورودی آن به دریاچه ارومیه. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۲۵ (۲)، ۱۳۳-۱۲۳.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.51614>

کتاجچی، حامد، محمودزاده، داود، و فرهودی هفدران، رضا. (۱۳۹۶). برآورد تبادل آب بین تالاب و آبخوان (مطالعه موردی: تالاب کنای برازان). مجله اکوهیدرولوژی، ۳ (۴)، ۷۰۹-۶۹۹.

<https://doi.org/10.22059/ije.2017.62503>

کرباسی معروف، محمدتقی، ناصری، حمیدرضا، و علیجانی، فرشاد. (۱۴۰۲). نشت آب و تأثیر انحلال در پایداری سد بار نیشابور، مجله زمین شناسی ایران، (۶۵)، ۳۲-۱۹.

<https://dori.net/dor/20.1001.1.17357128.1402.17.65.2.4>

موحدیان، علی، و چیت سازان، منوچهر. (۱۳۹۵). بررسی اثر متقابل آبخوان و رودخانه کارون در دشت گتوند- عقیلی، با استفاده از مدل MODFLOW. مجله پژوهش های آبخیزداری، ۱۱۱، ۹-۱۸.

<https://doi.org/10.22092/wmej.2016.113417>

نوحه گر، احمد، ملکیان، آرش، حسینی، مجید، حلی ساز، ارشک، و تقوای سلیمی، ادریس. (۱۳۹۵). تفاوت الگوریتم های SUFI-2 و GLUE در شبیه سازی رواناب حوزه های آبخیز جنگلی، مطالعه موردی: حوزه آبخیز شفارود. مجله مهندسی

و مدیریت آبخیز، ۸ (۴)، ۳۸۹-۳۹۹.

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107185>

نیکخوا امیری، صدیقه، خوش روش، مجتبی، و نوروز ولاشدی، رضا. (۱۳۹۸). شبیه سازی سری زمانی جریان در محل خروجی سد شهید رجایی با استفاده از مدل SWAT. نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰ (۳۷)، ۸۰-۶۷.

<https://doi.org/10.22125/iwe.2019.95875>

ولی وند، فرشته، و کتیبه، همایون. (۱۳۹۸). ارزیابی اثرات کمی بلندمدت شرایط مدیریت و بهره برداری کنونی بر آبخوان دشت ورامین. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۶ (۲)، ۲۶۱-۲۵۱.

<https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15448.3067>

یوسفی، علی، سرائی تبریزی، مهدی، پرهمت، جهانگیر، و بابازاده، حسین. (۱۴۰۱). مطالعه طرح تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: محدوده مطالعاتی هشتگرد). مجله پژوهش آب ایران، ۱۶ (۲)، ۳۲-۱۵.

<https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.10020.2340>



## References

- Aalami, M., Abbasi, H., & Niksokhan, M. (2018). Comparison of two Calibration-Uncertainty Methods for Soil and Water Assessment Tool in Stream Flow and Total Suspended Solids Modeling. *Water and Soil Science*, 28(3), 53-64. [https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_8123.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_8123.html) (In Persian)
- Abbas NovinPour, E., Mohammad Hoseinzadeh, M., & Rezaie, H. (2019). The effect of reservoir dam construction on groundwater fluctuations (Case study Reservoir Dam ShahreChay, Urmia Plain, IRAN). *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 75-93. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.16103.3144> (In Persian)
- Abdalla, O.A. (2009). Groundwater modeling in semiarid Central Sudan: adequacy and long-term abstraction. *Arabian Journal of Geosciences*, 2(4), 321-335. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0042-4>
- Abedi Koupai, J., & Golabchian, M. (2015). Estimation of Hydrodynamic Parameters of Groundwater Resources in Kouhpayeh- Segzi Watershed Using MODFLOW. *Journal of Water and Soil Science*, 19 (72), 281-293. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.72.24> (In Persian)
- Abiye, T., Masindi, K., Mengistu, H., & Demlie, M. (2018). Understanding the groundwater level fluctuations for better management of groundwater resource: a case in the Johannesburg region. *Groundw. Sustain. Develop.*, 7, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.02.004>
- Aghlmand, R., & Abbasi, A. (2019). Application of MODFLOW with boundary conditions analyses based on limited available observations: A case study of Birjand plain in East Iran. *Water*, 11(9), 1904. <https://doi.org/10.3390/w11091904>
- Ahmadzadeh, H., Morid, S., & Delavar, M. (2014). Assessment of changes in agricultural crop yields and inflows to Lake Urmia in Zarrinehrud River basin due to changing irrigation systems from surface to pressurized using the SWAT model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 8(1), 1-15. [https://idj.iaid.ir/article\\_54532.html](https://idj.iaid.ir/article_54532.html) (In Persian)
- Ahmed, K. A., & Altunkaynak, A. (2020). Modeling groundwater flow and seawater intrusion in the Terkos Lake aquifer due to Canal Istanbul excavation. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4983-y>
- Aizen, V., Aizen, E., Glazirin, G., & Loaiciga, H. A. (2000). Simulation of daily runoff in Central Asian alpine watersheds. *Journal of hydrology*, 238(1-2), 15-34. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00319-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00319-X)
- Akoko, G., Le, T. H., Gomi, T., & Kato, T. (2021). A review of SWAT model application in Africa. *Water*, 13(9), 1313. <https://doi.org/10.3390/w13091313>
- Alfaifi, H. J., Abdelfatah, M. S., Abdelrahman, K., Zaidi, F. K., Ibrahim, E., & Alarifi, N. S. (2017). Groundwater management scenarios for the Biyadh-Wasia aquifer systems in the eastern part of Riyadh region, Saudi Arabia. *Journal of the Geological Society of India*, 89(6), 669-674. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0676-x>
- Aliyari, F., Bailey, R. T., Tasdighi, A., Dozier, A., Arabi, M., & Zeiler, K. (2019). Coupled SWAT-MODFLOW model for large-scale mixed agro-urban river basins. *Environmental Modelling & Software*, 115, 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.014>
- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326, 116799. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>



- Alvarez, M., Trovatto, M. M., Hernández, M. A., & González, N. (2012). Groundwater flow model, recharge estimation and sustainability in an arid region of Patagonia, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 66(7), 2097-2108. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1435-8>
- Aly, M. M., Sakr, S. A., & Fayad, S. A. (2019). Evaluation of the impact of Lake Nasser on the groundwater system in Toshka under future development scenarios, Western Desert, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(17), 553. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4701-9>
- Arnold, J. G., & Fohrer, N. (2005). SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 563-572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Arumí, J. L., Rivera, D., Holzapfel, E., Boochs, P., Billib, M., & Fernald, A. (2009). Effect of the irrigation canal network on surface and groundwater interactions in the lower valley of the Cachapoal river, Chile [Efecto de la red de canales de riego en las interacciones de agua superficial y subterránea en la parte baja del valle del Río Cachapoal, Chile]. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69, Nr. 1, 69(1), 12-20. <https://doi.org/10.4067/s0718-58392009000100002>
- Asghari Sersekanroud, S., & Saeedi Seta, A. (2023). Investigating the Effects of Land Use Changes on the Runoff of Qara Chai River Basin Using the SWAT Model. *Geography and Environmental Planning*, 34(3), 95-118. <https://doi.org/10.22108/gep.2023.134432.1535> (In Persian)
- Aslam, R. A., Shrestha, S., Usman, M. N., Khan, S. N., Ali, S., Sharif, M. S., ... & Arshad, A. (2022). Integrated SWAT-MODFLOW modeling-based groundwater adaptation policy guidelines for lahore, Pakistan under projected climate change, and human development scenarios. *Atmosphere*, 13(12), 2001. <https://doi.org/10.3390/atmos13122001>
- Baalousha, H. M., Fahs, M., Ramasomanana, F., & Younes, A. (2019). Effect of pilot-points location on model calibration: Application to the northern karst aquifer of Qatar. *Water*, 11(4), 679. <https://doi.org/10.3390/w11040679>
- Bailey, R. T., Wible, T. C., Arabi, M., Records, R. M., & Ditty, J. (2016). Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrological processes*, 30(23), 4420-4433. <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>
- Barazzuoli, P., Nocchi, M., Rigati, R., & Salleolini, M. (2008). A conceptual and numerical model for groundwater management: a case study on a coastal aquifer in southern Tuscany, Italy. *Hydrogeology Journal*, 8(16), 1557-1576. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0324-z>
- Barthel, R., & Banzhaf, S. (2016). Groundwater and surface water interaction at the regional-scale—a review with focus on regional integrated models. *Water resources management*, 30(1), 1-32. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1163-z>
- Bedekar, V., Niswonger, R.G., Kipp, K., Panday, S., & Tonkin, M. (2012). Approaches to the simulation of unconfined flow and perched groundwater flow in MODFLOW. *Ground Water*, 187–198. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00829.x>
- Bejranonda, W., Koontanakulvong, S., & Koch, M. (2007). Surface and Groundwater Dynamic Interactions in the Upper Great Chao Phraya Plain of Thailand: Semi-Coupling of SWAT and MODFLOW; Groundwater and Ecosystems, IAH Selected Papers on Hydrogeology; International Association of Hydrology: Goring, UK, 17–21. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1007-y>
- Berihun, M. L., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Dile, Y. T., Tsubo, M., Fenta, A. A., ... & Srinivasan, R. (2020). Evaluating runoff and sediment responses to soil and water

- conservation practices by employing alternative modeling approaches. *Science of the Total Environment*, 747, 141118. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141118>
- Calderón Palma, H., & Bentley, L. R. (2007). A regional-scale groundwater flow model for the Leon-Chinandega aquifer, Nicaragua. *Hydrogeology Journal*, 15(8), 1457-1472. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0197-6>
- Carroll, R. W., Pohll, G., McGraw, D., Garner, C., Knust, A., Boyle, D., ... & Pohlmann, K. (2010). Mason Valley Groundwater Model: Linking Surface Water and Groundwater in the Walker River Basin, Nevada 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 46(3), 554-573. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00434.x>
- Chen, Y., Niu, J., Sun, Y., Liu, Q., Li, S., Li, P., ... & Li, Q. (2020). Study on streamflow response to land use change over the upper reaches of Zhanghe Reservoir in the Yangtze River basin. *Geoscience Letters*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00155-7>
- Chezgi, J., & Hamed, E. (2023). Flood Prioritization of Sarbaz River Sub-Basins Using SWAT Model. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(3), 73-86. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6478.1026> (In Persian)
- Chitsazan, M., javadchavoshi, Z., & Nassery, H. (2015). Predicting aquifer-river interactions using MODFLOW in the Dosalah plain, Khuzestan Province. *Iranian Water Researches Journal*, 9(4), 139-147. [https://iwrij.sku.ac.ir/article\\_11104.html](https://iwrij.sku.ac.ir/article_11104.html) (In Persian)
- Chowdhury, A., & Rahnema, M. (2023). Groundwater contaminant transport modeling using MODFLOW and MT3DMS: a case study in Rajshahi City. *Water Practice & Technology*, 18(5), 1255-1272. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.076>
- Chu, J., Zhang, C., & Zhou, H. (2010). Study on interface and frame structure of SWAT and MODFLOW models coupling. *Geophysical Research Abstracts*, V12, EGU2010-4559. <https://www.semanticscholar.org/paper/Study-on-interface-and-frame-structure-of-SWAT-and-Chu-Zhang/fca1754a98b1c68a4089fc29f8802f62e63acc00>
- Chu, T. W., & Shirmohammadi, A. (2004). Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the ASAE*, 47(4), 1057-1073. <https://doi.org/10.3724/sp.j.1227.2011.00164>
- Chung, I. M., Kim, N. W., Lee, J., & Sophocleous, M. (2010). Assessing distributed groundwater recharge rate using integrated surface water-groundwater modelling: application to Mihocheon watershed, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 18(5), 1253. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0593-1>
- Chunn, D., Faramarzi, M., Smerdon, B., & Alessi, D. S. (2019). Application of an integrated SWAT-MODFLOW model to evaluate potential impacts of climate change and water withdrawals on groundwater-surface water interactions in West-Central Alberta. *Water*, 11(1), 110. <https://doi.org/10.3390/w11010110>
- Correa-González, A., Hernández-Bedolla, J., Martínez-Cinco, M. A., Sánchez-Quispe, S. T., & Hernández-Hernández, M. A. (2023). Assessment of nitrate in groundwater from diffuse sources considering spatiotemporal patterns of hydrological systems using a coupled SWAT/MODFLOW/MT3DMS model. *Hydrology*, 10(11), 209. <https://doi.org/10.3390/hydrology10110209>
- Dadafarid, S., Hessari, B., & Abghari, H. (2019). Modelling of interaction between Urmia Lake water level and costal aquifer with GMS. *Iranian Water Researches Journal*, 13(2), 129-137. [https://iwrij.sku.ac.ir/article\\_10648.html](https://iwrij.sku.ac.ir/article_10648.html) (In Persian)
- Deb, P., Kiem, A. S., & Willgoose, G. (2019). A linked surface water-groundwater modelling approach to more realistically simulate rainfall-runoff non-stationarity in semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, 575, 273-291. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.039>

- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A review on hydrological models. *Aquatic procedia*, 4, 1001-1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Dousti Rezaie, M., Zeinalzadeh, K., Besharat, S., & Amirataee, B. (2022). Effects of Management and Climate Scenarios on Groundwater Level Changes: Case Numerical Modeling Study in Salmas Plain Aquifer. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(2), 280-293. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.2.2.1> (In Persian)
- Dowlatabadi, S., & Ali Zomorodian, S. M. (2016). Conjunctive simulation of surface water and groundwater using SWAT and MODFLOW in Firoozabad watershed. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 485-496. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0354-8>
- Ebrahimi, P., Salimi Kochi, J., & Mohseni Saravi, M. (2018). Calibration and validation of SWAT Model in runoff simulation, case study: Neka Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 266-279. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117332> (In Persian)
- Ehtiat, M., Jamshid Mousavi, S., & Srinivasan, R. (2018). Groundwater modeling under variable operating conditions using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: A catchment scale approach to water resources management. *Water resources management*, 32, 1631-1649. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1895-z>
- El Saeed, G. H., Abdelmageed, N. B., Riad, P., & Komy, M. (2020). Ensuring sustainable development through groundwater management, area one, south western desert, Egypt. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(3), 1584-1593. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i3.pp1584-1593>
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., & Kaufmann, O. (2008). Modelling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou-Areg unconfined aquifer (NE Morocco). *Journal of Hydro-environment Research*, 2(3), 192-209. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2008.08.003>
- Eltarabily, M. G. A., & Negm, A. M. (2019). Groundwater management for sustainable development east of the Nile delta aquifer. *Groundwater in the Nile Delta*, 687-708. [https://doi.org/10.1007/698\\_2017\\_102](https://doi.org/10.1007/698_2017_102)
- Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Schulin, R., & Yang, H. (2009). Modelling blue and green water resources availability in Iran. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(3), 486-501. <https://doi.org/10.1002/hyp.7160>
- Farokhnia, A., Morid, S., Abbaspour, K., & Delavar, M. (2018). Development of SWAT-LU model for simulation of Lake Urmia water level decrease and assessment of the proposed actions for its restoration; Part 1: Development, calibration and validation of SWAT-LU model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(3), 647-665. [https://idj.iaid.ir/article\\_73673.html](https://idj.iaid.ir/article_73673.html) (In Persian)
- Farokhnia, A., Morid, S., Delavar, M., & Abbaspour, K. (2018). Development of SWAT-LU Model for Simulation of Urmia Lake Water Level Decrease and Assessment of the Proposed Actions for its Restoration; (Role of Anthropogenic and Climatic Factors on Hydrological Change of the Basin and Lake). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(5), 1041-1058. [https://idj.iaid.ir/article\\_81775.html](https://idj.iaid.ir/article_81775.html) (In Persian)
- Farokhnia, A., Morid, S., Delavar, M., & Abbaspour, K. (2019). Development of SWAT-LU Model for Simulation of Urmia Lake Water Level Decrease and Assessment of the Proposed Actions for its Restoration; Part 3: Water Accounting Analysis and Assessment of the Proposed Actions for Restoration of Urmia Lake. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(6), 1362-1380. [https://idj.iaid.ir/article\\_85904.html](https://idj.iaid.ir/article_85904.html) (In Persian)
- Ficklin, D. L., Luo, Y., & Zhang, M. (2013). Watershed modelling of hydrology and water quality in the Sacramento River watershed, California. *Hydrological processes*, 27(2), 236-250. <https://doi.org/10.1002/hyp.9222>

- Galbiati, L., Bouraoui, F., Elorza, F. J., & Bidoglio, G. (2006). Modeling diffuse pollution loading into a Mediterranean lagoon: development and application of an integrated surface–subsurface model tool. *Ecological Modelling*, 193(1-2), 4-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.036>
- Gao, F., Feng, G., Han, M., Dash, P., Jenkins, J., & Liu, C. (2019). Assessment of surface water resources in the big sunflower river watershed using coupled SWAT–MODFLOW model. *Water*, 11(3), 528. <https://doi.org/10.3390/w11030528>
- Ghobadi Alamdari, S., Asghari Moghaddam, A., & Shahsavari A. (2019). The Feasibility of the Conjunctive Use of Surface and Groundwater Resources in Dehloran Plain by Using the MODFLOW Model. *Journal of Water and Soil Science*, 23 (4), 45-57. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.23.4.33561> (In Persian)
- Ghodousi, M., Delavar, M., & Morid, S. (2014). Impact of Land Use Changes on Hydrology of Ajichai Basin and its Input to Urmia Lak. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2), 123-133. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2014.51614> (In Persian)
- Gholami, A., Shahedi, K., Habibnejad Rooshan, M., Vafakhah, M., & Soleimani, K. (2017). Assesment about Efficiency of SWAT Semi-Distribution Model for Simulation of Streamflow (Case Study in Talar Watershed, Mazandaran Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(3), 463-476. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.63414> (In Persian)
- Gosain, A. K., Rao, S., Srinivasan, R., & Reddy, N. G. (2005). Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru River basin using SWAT model. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 673-682. <https://doi.org/10.1002/hyp.5622>
- Guzman, J. A., Moriasi, D. N., Gowda, P. H., Steiner, J. L., Starks, P. J., Arnold, J. G., & Srinivasan, R. (2015). A model integration framework for linking SWAT and MODFLOW. *Environmental Modelling & Software*, 73, 103-116. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.011>
- HajiGhasemi, S., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. (2021). Investigating of Climate Change Effects on the Surface Runoff with SWAT Model (Case study: Mazlaghan River). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), 121-137. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.11.1> (In Persian)
- Heydari, J., Chitsazan, M., & Mirzaei, S.Y. (2019). Modeling the Hydrogeological Relationship of Sahneh-Bistoon Plain Aquifer with Gamasiab River and Aquifer Management. *Hydrogeology*, 4(1), 140-152. <https://doi.org/10.22034/hydro.2019.8447> (In Persian)
- Hosseini, S. H., & Khaleghi, M. R. (2020). Application of SWAT model and SWAT-CUP software in simulation and analysis of sediment uncertainty in arid and semi-arid watersheds (case study: The Zoshk–Abardeh watershed). *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2003-2013. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00846-2>
- Irvine, D. J., Brunner, P., Franssen, H. J. H., & Simmons, C. T. (2012). Heterogeneous or homogeneous? Implications of simplifying heterogeneous streambeds in models of losing streams. *Journal of Hydrology*, 424, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.051>
- Izady, A., Davary, K., Alizadeh, A., Ghahraman, B., Sadeghi, M., & Moghaddamnia, A. (2012). Application of "panel-data" modeling to predict groundwater levels in the Neishaboor Plain, Iran. *Hydrogeology Journal*, 20(3), 435. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0814-2>
- Janjić, J., & Tadić, L. (2023). Fields of application of SWAT hydrological model—a review. *Earth*, 4(2), 331-344. <https://doi.org/10.3390/earth4020018>
- Javadi, S., Kardan Moghaddam, H., & Neshat, A. (2018). Evaluation and Simulation of Groundwater Flow in Aquifers Enclosed with Desert Saline Areas (Case Study: Isfahan



- Province-Ardestan Aquifer). *Water Harvesting Research*, 3(1&2), 15-27. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2019.1052>
- Jayakrishnan, R. S. R. S., Srinivasan, R., Santhi, C., & Arnold, J. G. (2005). Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 749-762. <https://doi.org/10.1002/hyp.5624>
- Jódar, J., Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Martos-Rosillo, S., & Lambán, L. J. (2024). The catastrophic effects of groundwater intensive exploitation and Megadrought on aquifers in Central Chile: Global change impact projections in water resources based on groundwater balance modeling. *Science of the Total Environment*, 914, 169651. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169651>
- Jolejole, M. E., Kim, B. J., Jeon, D. J., Cayetano, M., & Kim, J. H. (2018). Scenario study of the effect of different land use to a sub-basin in Yeongsan River basin using SWAT model. *Desalination and Water Treatment*, 120, 198-204. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22884>
- Jonubi, R., Rezaverdinejad, V., Behmanesh, J., & Abbaspour, K. (2018). Investigation of quantitative changes in the groundwater table of Miandoab plain affected by surface and groundwater resources management using the MODFLOW-NWT mathematical model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 467-481. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.239340.667731> (In Persian)
- Karbasi Maroof, M.T., Nasser, H.R., & Alijani, F. (2023). Effect of water seepage and dissolution on the stability of Neyshabur bar dam, *Iranian Journal of Geology*, 65(17):19-32. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17357128.1402.17.65.2.4> (In Persian)
- Kardan Moghaddam, H., Banihabib, M. E., & Javadi, S. (2018). Quantitative sustainability analysis of aquifer system (case study: South Khorasan-Birjand aquifer). *Water and Soil*, 31(6), 1587-1601. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i6.66959>
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., & Farhodi Hafdar, R. (2017). Estimation of wetland-aquifer exchanges (Case Study: Kaniborazan wetland). *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(3), 699-709. <https://doi.org/10.22059/ije.2017.62503> (In Persian)
- Khaledi Alamdari, M., Majnooni Heris, A., & Fakheri Fard, A. (2022). Estimation of Hydraulic conductivity and Specific storage of Shabestar Plain Aquifer Using Numerical model. *Hydrogeology*, 7(1), 42-52. [https://hydro.tabrizu.ac.ir/article\\_13724.html](https://hydro.tabrizu.ac.ir/article_13724.html) (In Persian)
- Khalilian, S., Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., & Saremi, A. (2021). Assessing the Impact of Climate Change on the Inflow on Zayandehrood Dam. *Journal of Water and Soil Science*, 24 (4), 255-271. <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.4.7492> (In Persian)
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., & Arnold, J. G. (2008). Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. *Journal of hydrology*, 356(1-2), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024>
- King, K. W., Fausey, N. R., & Williams, M. R. (2014). Effect of subsurface drainage on streamflow in an agricultural headwater watershed. *Journal of hydrology*, 519, 438-445. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.035>
- Laïssaoui, M., Mesbah, M., Madani, K., & Kiniouar, H. (2018). Quantitative groundwater modelling for a sustainable water resource exploitation in a Mediterranean alluvial aquifer. *In AIP Conference Proceedings*, 1968(1), AIP Publishing, Washington, USA. <https://doi.org/10.1063/1.5039184>
- Langevin, C. D., Hughes, J. D., Provost, A. M., Russcher, M. J., & Panday, S. (2024). MODFLOW as a Configurable Multi-Model Hydrologic Simulator. *Groundwater*, 62(1), 111-123. <https://doi.org/10.1111/gwat.13351>

- Leake, S. A., & Barlow, P. M. (2013). Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow (No. 2013-3001). *US Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/fs20133001>
- Li, M., Li, Q., Cai, T., Li, P., & Zou, Z. (2012). Modeling the effects of land-use change on runoff generation in the upper Huaihe River basin, China. *In 2012 International Symposium on Geomatics for Integrated Water Resource Management*, 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/giwrn.2012.6349642>
- Lin, H. T., Tan, Y. C., Chen, C. H., Lin, W. S., & Liu, C. W. (2012). Multivariate approaches optimize locations of groundwater pumping facilities for different hydrogeological scales. *Hydrological Processes*, 26(19), 2985-2996. <https://doi.org/10.1002/hyp.8307>
- Menking, K. M., Syed, K. H., Anderson, R. Y., Shafike, N. G., & Arnold, J. G. (2003). Model estimates of runoff in the closed, semiarid Estancia basin, central New Mexico, USA. *Hydrological sciences journal*, 48(6), 953-970. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.953.51424>
- Mo, G., Zhang, Y., Huang, Y., Mo, C., & Yang, Q. (2020). Evaluation and hydrological impact of land-use changes in the Longtan basin. *Journal of Earth System Science*, 129, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01458-1>
- Molina-Navarro, E., Bailey, R. T., Andersen, H. E., Thodsen, H., Nielsen, A., Park, S., ... & Trolle, D. (2019). Comparison of abstraction scenarios simulated by SWAT and SWAT-MODFLOW. *Hydrological Sciences Journal*, 64(4), 434-454. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1590583>
- Mosase, E., Ahiablame, L., Park, S., & Bailey, R. (2019). Modelling potential groundwater recharge in the Limpopo River Basin with SWAT-MODFLOW. *Groundwater for sustainable development*, 9, 100260. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100260>
- Movahediyani, A., & Chitsazan, M. (2016). Analysis of interactions of groundwater and Karun River in Gotvand-Aghili plain using MODFLOW model. *Watershed Management Research*, 29(2), 9-18. <https://doi.org/10.22092/wmej.2016.113417> (In Persian)
- Mundetia, N., Sharma, D., & Sharma, A. (2024). Groundwater sustainability assessment under climate change scenarios using integrated modelling approach and multi-criteria decision method. *Ecological Modelling*, 487, 110544. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110544>
- Nair, S. S., King, K. W., Witter, J. D., Sohngen, B. L., & Fausey, N. R. (2011). Importance of crop yield in calibrating watershed water quality simulation tools 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(6), 1285-1297. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00570.x>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. *Texas Water Resources Institute*. <https://doi.org/10.13031/2013.23634>
- Nguyen, V. T., & Dietrich, J. (2018). Modification of the SWAT model to simulate regional groundwater flow using a multicell aquifer. *Hydrological processes*, 32(7), 939-953. <https://doi.org/10.1002/hyp.11466>
- Nikkhoo Amiri, S., khoshravesh, M., & Norooz Valashedi, R. (2019). Simulation of Outflow Time Series at Shahid Rajaee Dam using SWAT model. *Irrigation and Water Engineering*, 10(1), 66-80. <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.95875> (In Persian)
- Niswonger, R. G., Panday, S., & Ibaraki, M. (2011). MODFLOW-NWT, a Newton formulation for MODFLOW-2005. *US Geological Survey Techniques and Methods*, 6(A37), 44. <https://doi.org/10.3133/tm6a37>
- Nohegar, A., Malekian, A., Hosseini, M., Holisaz, A., & Taghvaye Salimi, E. (2016). Comparison SUFI-2 and GLUE algorithms on runoff simulation in the forest catchments, a

- case study in the Shafaroud Catchment. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 389-399. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107185> (In Persian)
- Omar, P. J., Dwivedi, S. B., & Dikshit, P. K. S. (2020). Sustainable development and management of groundwater in Varanasi, India. *In Advances in Water Resources Engineering and Management: Select Proceedings of TRACE 2018*, 201-209. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8181-2\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8181-2_15)
- Osmani, H., Motamedvaziri, B., & Moeni, A. (2013). Simulation of discharge, calibration and validation of SWAT model, case study: Tehran Latyan dam upstream. *Watershed Engineering and Management*, 5(2), 134-143. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2013.101809> (In Persian)
- Park, S., & Bailey, R. T. (2017). SWAT-MODFLOW tutorial: Documentation for preparing model simulations. Department of Civil and Environmental Engineering, *Colorado State University: Fort Collins, CO, USA*. <https://doi.org/10.21926/obm.icm.2104043>
- Parsa Sadr, H., Mohammadzadeh, H., & Nassery, H. R. (2016). Numerical simulating of Sabzevar Roudab aquifer and checking of influences of constructing Sabzevar Roudab dam on it. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(1), 119-135. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3022> (In Persian)
- Parsinejad, M., Raja, O., & Chehrenegar, B. (2022). Practical analysis of remote sensing estimations of water use for major crops throughout the Urmia Lake basin. *Agricultural water management*, 260, 107232. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107232>
- Patil, N. S., & Nataraja, M. (2020). Effect of land use land cover changes on runoff using hydrological model: a case study in Hiranyakeshi watershed. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 2345-2357. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00808-8>
- Paul, M. J. (2006). Impact of land-use patterns on distributed groundwater recharge and discharge: A case study of western Jilin, China. *Chinese Geographical Science*, 16, 229-235. <https://doi.org/10.1007/s11769-006-0229-5>
- Putthividhya, A. and Laonamsai, J. 2011. SWAT and MODFLOW Modeling of Spatio-Temporal Runoff and Groundwater Recharge Distribution. *In World Environmental and Water Resources Congress 2017* (pp. 51-65). <https://doi.org/10.1061/9780784480618.006>
- Raheem, A., Ahmad, I., Arshad, A., Liu, J., Rehman, Z. U., Shafeeque, M., ... & Iqbal, U. (2023). Numerical Modeling of Groundwater Dynamics and Management Strategies for the Sustainable Groundwater Development in Water-Scarce Agricultural Region of Punjab, Pakistan. *Water*, 16(1), 34. <https://doi.org/10.3390/w16010034>
- Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishi, M. (2022). Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain). *Water and Soil*, 36(1), 31-52. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74890.1138> (In Persian)
- Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishy, M. (2022). Multipurpose Calibration of SWAT Model in Estimating Runoff, Evapotranspiration, and Crop Yield (A Case Study: Mahabad Plain). *Iran-Water Resources Research*, 17(4), 11-34. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.4.1.8> (In Persian)
- Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishy, M. (2023). Estimation and evaluation of water balance components by calibrated SWAT Model, case study: Mahabad Plain. *Watershed Engineering and Management*, 15(1), 109-129. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.357631.1957> (In Persian)
- Raja, O., Parsinejad, M., & Tajrishy, M. (2023). Evaluation of Interaction between Aquifer and river Using Integrated SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case study: Mahabad

- plain). *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(4), 49-72. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.40163.2018> (In Persian)
- Rajaeian, S., Ketabchi, H., & Ebadi, T. (2024). Investigation on quantitative and qualitative changes of groundwater resources using MODFLOW and MT3DMS: a case study of Hashtgerd aquifer, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 26(2), 4679-4704. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02904-4>
- Rayne, T. W., Bradbury, K. R., & Muldoon, M. A. (2001). Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA. *Hydrogeology Journal*, 9, 432-450. <https://doi.org/10.1007/s100400100154>
- Rezaei Moghaddam, M.H., Hejazi, M.A., & Behbody, A. (2019). Estimation of Runoff Catchment in East Azerbaijan Province: Comparative Application of Calibration Methods and Uncertainty Analysis of SWAT Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 8(3), 59-75. <https://doi.org/10.22067/geo.v8i3.81998> (In Persian)
- Rezaei Moghaddam, M.H., Rahimpour, T., & Nakhostinrouhi, M. (2016). Potential Detection of the Groundwater Resources Using Analytic Network Process in Geographic Information System (Case Study: Basins Leading to Tabriz Plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(3), 379-389. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.60026> (In Persian)
- Ridwansyah, I., Rustini, H. A., Yulianti, M., & Harsono, E. (2020). Water balance of Maninjau watershed with SWAT hydrological model. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 535(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/535/1/012035>
- Risal, A., Parajuli, P. B., Dash, P., Ouyang, Y., & Linhoss, A. (2020). Sensitivity of hydrology and water quality to variation in land use and land cover data. *Agricultural Water Management*, 241, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106366>
- Rodríguez, L. B., Cello, P. A. and Vionnet, C. A. 2006. Modeling stream-aquifer interactions in a shallow aquifer, Choele Choel Island, Patagonia, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 14(4), 591-602. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0472-3>
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., & Abbaspour, K. C. (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological sciences journal*, 53(5), 977-988. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.977>
- Saadatpour, A., Alizadeh, A., Ziaei, A.N., & izady, A. (2019). Integrated Surface and Groundwater Flow Modeling in Neishaboor Watershed with SWAT-MODFLOW. *Water and Soil*, 33(4), 521-536. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.74658> (In Persian)
- Saberimehr, S., Asghari moghaddam, A., & Nadiri, A. (2017). Modeling groundwater flow and salinity intrusion at Shabestar plain aquifer using GMS software model. *Quaternary Journal of Iran*, 3(1), 41-50. <https://doi.org/10.22034/irqua.2017.701896> (In Persian)
- Salmani, H., Javadi, S., Eini, M. R., & Golmohammadi, G. (2023). Compilation simulation of surface water and groundwater resources using the SWAT-MODFLOW model for a karstic basin in Iran. *Hydrogeology Journal*, 31(3), 571-587. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02620-x>
- Sarvari, S., Ziaei, A.N., & Joodavi, A. (2019). Investigation of River-aquifer Interactions in Bojnourd Plain Using Reach Measurements and Numerical Modeling. *Water and Soil*, 33(5), 671-683. <https://doi.org/10.22067/jsw.v33i5.72735> (In Persian)
- Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, C. B., Edmunds, W. M., & Simmers, I. (2006). Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(15), 3335-3370. <https://doi.org/10.1002/hyp.6335>



- Shahoei, S. V., Porhemmat, J., Sedghi, H., Hosseini, M., & Saremi, A. (2018). Monthly runoff simulation through SWAT hydrological model and evaluation of model in calibration and validation periods, case study: Ravansar Sanjabi Basin in Kermanshah Province, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 464-477. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.109516.1273> (In Persian)
- Shakoor, A., Arshad, M., Ahmad, R., Khan, Z. M., Qamar, U., Farid, H. U., ... & Ahmad, F. (2018). Development of Groundwater Flow Model (MODFLOW) to Simulate the Escalating Groundwater Pumping in the Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 55(3). <https://doi.org/10.21162/pakjas/18.4909>
- Sheikhipour, B., Javadi, S., & Banihabib, M. E. (2018). Assessing the Effectiveness of Aquifer Regeneration Scenarios by Sustainability Index and Water Exploitation Indicators of Water Resources, Case Study: Shahrekord Aquifer. *Water and Soil*, 32(2), 267-281. <https://doi.org/10.22067/jsw.v32i1.68794> (In Persian)
- Sibanda, T., Nonner, J. C., & Uhlenbrook, S. (2009). Comparison of groundwater recharge estimation methods for the semi-arid Nyamandhlovu area, Zimbabwe. *Hydrogeology journal*, 17(6), 1427. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0445-z>
- Sisay, B. M., Nedaw, D., Birhanu, B., & Gigar, A. G. (2023). Application of SWAT and MODFLOW models for characterization of surface-groundwater interaction in the Modjo River catchment, central Ethiopia. *Environmental Earth Sciences*, 82(13), 341. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10988-y>
- Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., Massah Bavani, A. R., & Lotfi, S. (2022). Simulation of surface water-groundwater interaction using MODFLOW-OWHM (case study: Shazand plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 9(1), 199-210. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.336586.1595> (In Persian)
- Sophocleous, M. (2005). Groundwater recharge and sustainability in the High Plains aquifer in Kansas, USA. *Hydrogeology Journal*, 13, 351-365. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0385-6>
- Sophocleous, M., & Perkins, S. P. (2000). Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. *Journal of hydrology*, 236(3-4), 185-201. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00293-6](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00293-6)
- Spruill, C. A., Workman, S. R., & Taraba, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1431-1439. <https://doi.org/10.13031/2013.3041>
- Sun, H., & Cornish, P. S. (2005). Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(3), 795-807. <https://doi.org/10.1002/hyp.5617>
- Taherian, P., Ansari, H., Davari, K., Beheshti, A., & Ziai, A. N. (2021). Modeling the groundwater quality (salinity) variations in Neyshabour plain using MODFLOW and MT3DMS. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 15(1), 27-37. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.3.3> (In Persian)
- Taherian, P., Ansari, H., Davari, K., beheshti, A., & Ziai, A. N. (2021). Modeling the groundwater quality (salinity) variations in Neyshabour plain using MODFLOW and MT3DMS. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), 27-37. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.3.3> (In Persian)
- Taie Semiromi, M., & Koch, M. (2019). Analysis of spatio-temporal variability of surface-groundwater interactions in the Gharehsoo river basin, Iran, using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Environmental Earth Sciences*, 78(6), 201. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8206-3>

- Trasviña-Carrillo, J. A., Wurl, J., & Imaz-Lamadrid, M. A. (2019). Groundwater flow model and statistical comparisons used in sustainability of aquifers in arid regions. *Resources*, 8(3), 134. <https://doi.org/10.3390/resources8030134>
- Triki, C., Zekri, S., Al-Maktoumi, A., & Bazargan-Lari, M. R. (2020). Optimal location of wells for storage and recovery of surplus desalinated water in coastal aquifers. *Groundwater*, 58(5), 831-841. <https://doi.org/10.1111/gwat.12951>
- Upadhyay, P., Linhoss, A., Kelble, C., Ashby, S., Murphy, N., & Parajuli, P. B. (2022). Applications of the SWAT model for coastal watersheds: review and recommendations. *Journal of the ASABE*, 65(2), 453-469. <https://doi.org/10.13031/ja.14848>
- Valivand, F., & Katibeh, H. (2019). Assessment of The Long-Term Quantitative Effects of Management Conditions and Current Abstraction on Varamin Plain Aquifer. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(2), 251-261. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15448.3067> (In Persian)
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G., & Garbrecht, J. D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE*, 46(6), 1539-1551. <https://doi.org/10.13031/2013.15643>
- Wang, W., Chen, Y., Wang, W., Zhu, C., Chen, Y., Liu, X., & Zhang, T. (2023). Water quality and interaction between groundwater and surface water impacted by agricultural activities in an oasis-desert region. *Journal of Hydrology*, 617, 128937. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128937>
- Wang, X., Sun, Y., Xu, Z., Zheng, J., & Zhang, C. (2020). Feasibility prediction analysis of groundwater reservoir construction based on GMS and Monte Carlo analyses: a case study from the Dadougou Coal Mine, Shanxi Province, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4978-8>
- Ware, H. H., Mengistu, T. D., Yifru, B. A., Chang, S. W., & Chung, I. M. (2023). Assessment of Spatiotemporal Groundwater Recharge Distribution Using SWAT-MODFLOW Model and Transient Water Table Fluctuation Method. *Water*, 15(11), 2112. <https://doi.org/10.3390/w15112112>
- Wei, X., & Bailey, R. T. (2019). Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW. *Water*, 11(8), 1576. <https://doi.org/10.3390/w11081576>
- Wei, X., Bailey, R. T., Records, R. M., Wible, T. C., & Arabi, M. (2019). Comprehensive simulation of nitrate transport in coupled surface-subsurface hydrologic systems using the linked SWAT-MODFLOW-RT3D model. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104242. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.012>
- Wheater, H.S. (2010). Hydrological processes, groundwater recharge and surface-water/groundwater interactions in arid and semi-arid areas. Groundwater Modeling in Arid and Semi-Arid Areas, 1st ed. Howard S. Wheeler, Simon A. Mathias and Xin Li. Published by Cambridge University Press, 5-37. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511760280.003>
- Xu, K., & Peng, H. Q. (2013). Estimating runoff and environment protection in Tao River Basin based on SWAT Model. *Applied Mechanics and Materials*, 340, 942-946. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.340.942>
- Yifru, B. A., Lee, S., Bak, S., Bae, J. H., Shin, H., & Lim, K. J. (2024). Estimating exploitable groundwater for agricultural use under environmental flow constraints using an integrated SWAT-MODFLOW model. *Agricultural Water Management*, 303, 109024. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109024>
- Yousefi, A., Sarai Tabrizi, M., Porhemmat, J., & Babazadeh, H. (2022). Studying Groundwater Resources Balancing Plan under Climate Change Conditions (Case Study: Hashtgerd Study

- Area). *Iranian Water Researches Journal*, 16(2). <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.10020.2340> (In Persian)
- Zhang, L., Li, X., Han, J., Lin, J., Dai, Y., & Liu, P. (2024). Identification of surface water-groundwater nitrate governing factors in Jianghuai hilly area based on coupled SWAT-MODFLOW-RT3D modeling approach. *Science of the Total Environment*, 912, 168830. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168830>



## Estimation of water requirement and crop coefficients for Elephant Grass (*Pennisetum purpureum* Schumach.) using lysimetric method

Soheila Farzi<sup>1✉</sup>, Houshang Ghamarnia<sup>2✉</sup>, and Farrokh Kafilzadeh<sup>3</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: [soheilafarzi@yahoo.com](mailto:soheilafarzi@yahoo.com)
2. Corresponding author, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: [hghamarnia@razi.ac.ir](mailto:hghamarnia@razi.ac.ir)
3. Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: [kafilzadeh@razi.ac.ir](mailto:kafilzadeh@razi.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

Received 07 December 2024

Received in revised form 14 March 2025

Accepted 14 April 2025

Available online 22 June 2025

**Keywords:**

evapotranspiration,  
crop coefficients,  
Elephant Grass,  
lysimeter.

### ABSTRACT

**Objective:** This study aimed to accurately estimate the water requirement of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach.) and determine its crop coefficients at different growth stages over two agricultural years (2021 and 2022) using lysimetric condition under field condition.

**Method:** Nine drainage lysimeters were used to measure actual evapotranspiration (ET<sub>c</sub>). Reference crop evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) was calculated using the Penman-Monteith equation and meteorological data. Crop coefficients (K<sub>c</sub>) were determined at four different growth stages: initial, development, mid-season, and late-season.

**Results:** The results showed that the two-year average for reference crop evapotranspiration and actual evapotranspiration during the growing season were 1092.08 mm and 1435.57 mm, respectively. The crop coefficient was calculated as the ratio of actual evapotranspiration to reference evapotranspiration throughout the growth period. The average single crop coefficients for the different growth stages were 0.91, 1.23, 1.54, and 1.05 for the initial, development, mid-season and late-season stages, respectively. The estimation of crop coefficients revealed that the highest K<sub>c</sub> value occurred during the mid-season stage, while the lowest values were recorded during the initial and late-season stages.

**Conclusions:** This information can be utilized for irrigation planning and optimizing water management for elephant grass cultivation. The findings of this study assist farmers and water resources managers in adjusting irrigation patterns, reducing water consumption, and enhancing water use efficiency.

**Cite this article:** Farzi, S., Ghamarnia, H., & Kafilzadeh, F. (2025). Estimation of water requirement and crop coefficients for Elephant Grass (*Pennisetum purpureum* Schumach.) using lysimetric method. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 53-71. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11737.1154>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11737.1154>

Publisher: Razi University.

## Introduction

Optimal water resources management is one of the major challenges in arid and semi-arid regions. Given that more than 90% of renewable water resources in Iran are consumed in the agricultural sector, low irrigation efficiency has led to significant water loss. Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumach.), as a valuable forage crop, plays a crucial role in providing livestock feed and enhancing agricultural productivity. However, sufficient information on its water requirements and crop coefficients in Iran and globally is not available. The objective of this study is to estimate the water requirement and crop coefficients of elephant grass under lysimetric conditions over two agricultural years (2021 and 2022). This study aims to accurately estimate the evapotranspiration of elephant grass and determine its crop coefficients at different growth stages. The findings of this research can contribute to irrigation planning, optimizing water consumption, and improving forage yield.

## Method

The experiments were conducted at the Lysimetric Research Station of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah. A total of 9 drainage lysimeters with a diameter of 1.2 meters and a depth of 1.4 meters were used to measure actual evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) and determine crop coefficients (K<sub>c</sub>). Reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) was calculated using the Penman-Monteith equation and meteorological data. The values of actual evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) were measured based on the soil water balance approach in the lysimeters, and crop coefficients (K<sub>c</sub>) were determined for four different growth stages.

## Results

The two-year average reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) and actual evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) for elephant grass were 1092.08 mm and 1435.57 mm, respectively. The average single crop coefficient (K<sub>c</sub>) for different growth stages was as follows: Initial stage: 0.91, Development stage: 1.23, Mid-season stage: 1.54 and Late-season stage: 1.05. The results indicated that the K<sub>c</sub> value peaked during the mid-season stage and was lowest during the initial and late-season stages. Additionally, variations in reference evapotranspiration and actual evapotranspiration throughout the growing season demonstrated that the water requirement of elephant grass increases with leaf expansion and biomass growth.

## Conclusions

The estimation of crop coefficients and water requirements of elephant grass in this study demonstrated that precise irrigation planning and improved water resource management can optimize water consumption. The findings of this research can be useful in designing efficient irrigation systems and enhancing agricultural water productivity in arid and semi-arid regions.

## 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.



## برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی علف فیل (*Pennisetum purpureum* Schumach.) به روش لایسیمتری

سهیلا فرزی<sup>۱</sup>، هوشنگ قمرنیا<sup>۲</sup>، و فرخ کفیلزاده<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [soheilafarzi@yahoo.com](mailto:soheilafarzi@yahoo.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [hghamarnia@razi.ac.ir](mailto:hghamarnia@razi.ac.ir)

۳. گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [kafilzadeh@razi.ac.ir](mailto:kafilzadeh@razi.ac.ir)

| اطلاعات مقاله                                                                 | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| نوع مقاله: مقاله پژوهشی                                                       | <b>هدف:</b> در این مطالعه به برآورد دقیق نیاز آبی علف فیل ( <i>Pennisetum purpureum</i> Schumach.) و تعیین ضرایب گیاهی آن در مراحل مختلف رشد در دو سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ با استفاده از روش لایسیمتری در محیط مزرعه پرداخته شد.                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷                                                      | <b>روش پژوهش:</b> برای اندازه گیری تبخیر و تعرق واقعی (ETc) گیاه از ۹ واحد لایسیمتر زهکش دار استفاده شد. تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) با استفاده از معادله پنمن-مانتیت و داده های هواشناسی محاسبه شد. ضرایب گیاهی (Kc) در چهار مرحله رشد گیاه شامل مراحل ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی تعیین گردید.                                                                                                                                                                                               |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴                                                     | <b>یافته ها:</b> نتایج نشان داد که میانگین دوساله تبخیر و تعرق گیاه مرجع و تبخیر و تعرق گیاه علف فیل در فصل رشد به ترتیب ۱۰۹۲/۰۸ و ۱۴۳۵/۵۷ میلی متر است. ضریب گیاهی از نسبت تبخیر - تعرق گیاه به تبخیر - تعرق گیاه مرجع در طول دوره رشد محاسبه گردید. متوسط ضریب گیاهی منفرد برای مراحل مختلف رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۹۱، ۱/۲۳، ۱/۵۴ و ۱/۰۵ به دست آمد. برآورد ضرایب گیاهی نشان داد که بیشترین مقدار Kc در مرحله میانی رشد و کمترین مقدار در مرحله ابتدایی و پایانی رخ می دهد. |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵                                                       | <b>نتیجه گیری:</b> این اطلاعات می تواند در برنامه ریزی آبیاری و مدیریت بهینه مصرف آب برای کشت علف فیل مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش به کشاورزان و مدیران منابع آب کمک می کند تا با تنظیم الگوی آبیاری، مصرف آب را کاهش داده و بهره وری را افزایش دهند.                                                                                                                                                                                                                                   |
| تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>کلیدواژه ها:</b><br>تبخیر و تعرق،<br>ضرایب گیاهی،<br>علف فیل،<br>لایسیمتر. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

**استناد:** فرزی، سهیلا؛ قمرنیا، هوشنگ؛ و کفیلزاده، فرخ. (۱۴۰۴). برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی علف فیل (*Pennisetum purpureum* Schumach.) به روش لایسیمتری. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۲)، ۷۱-۵۳.

http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11737.1154



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.



### مقدمه

حدود ۷۰ درصد از سطح زمین از آب به عنوان منبعی اساسی برای زندگی انسان تشکیل شده است. با این وجود تنها ۰/۰۱۵ درصد از منابع آب موجود در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها وجود دارد، در حالی که ۹۶/۵ درصد آن در دریاها و اقیانوس‌ها قرار دارد. مطالعات نشان داده است که در حال حاضر تقاضای جهانی برای آب سالانه ۴۶۰۰ کیلومتر مکعب است و پیش بینی شده است به دلیل افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ به ۵۵۰۰ تا ۶۰۰۰ کیلومتر مکعب در سال برسد (العدوس و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۴؛ تشتوش و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۳ و بورتی و روژا<sup>۳</sup>، ۲۰۱۹). در دو دهه‌ی پیش رو علاوه بر مسئله‌ی افزایش جمعیت، عواملی نظیر توسعه‌ی اقتصادی و تغییر الگوهای مصرف نیز از دلایل افزایش قابل توجه تقاضای آب در بخش‌های صنعت، خانگی و کشاورزی خواهد بود که تقاضای کشاورزی همچنان بزرگترین خواهد بود (گزارش توسعه منابع آب جهانی<sup>۴</sup>، ۲۰۱۸؛ رفیعی سردویی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۴).

بخش کشاورزی با برداشت ۷۰ درصدی از منابع آب شیرین در جهان به عنوان یکی از بزرگترین مصرف‌کنندگان آب شناخته شده است (سیلوا و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۲۴). با این وجود می‌توان گفت مشکل کمبود آب در مناطق خشک و نیمه خشک جهان که به دلایلی نظیر بارش کم، تبخیر بالا و دماهای بالا که با رشد جمعیت، افزایش فعالیت‌های انسانی مانند برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی و روش‌های ناکارآمد آبیاری تشدید می‌گردد؛ یک مشکل جدی محسوب می‌شود (رفیعی سردویی و همکاران، ۲۰۲۴). باتوجه‌به تمام مباحث گفته شده درمی‌یابیم که کشور خشک و نیمه خشک ایران با متوسط بارندگی ۲۲۰ میلی‌متر در سال به دلایلی نظیر برنامه‌های ناپایدار توسعه اقتصادی، کشاورزی ناکارآمد (راندمان پایین)، تغییر اقلیم و خشکسالی‌های مکرر و به تبع آن تغییر ویژگی‌های مکانی و زمانی بارش و محدود کردن منابع آب‌های تجدیدپذیر از طریق حفر چاه‌های غیرمجاز، با بحران شدید آب روبروست (مغربی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۲، کریمی و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۸؛ قمرنیا و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۲۱؛ مقیمی و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۱). از طرفی بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر در کشور در بخش کشاورزی مصرف شده، اما به دلیل راندمان پایین آبیاری، حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر در بخش کشاورزی از بین رفته و باعث کاهش بهره‌وری آب کشاورزی شده است (مغربی و همکاران، ۲۰۲۲؛ میرزایی و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۹؛ فرامرزی و همکاران<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۰).

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

باتوجه‌به نکات گفته شده و از آنجایی که بخش عمده‌ای از منابع آب ایران برای کشاورزی مصرف می‌شود، اطلاعات دقیق در مورد برآورد و مدیریت نیاز آبی گیاهان که به طور مستقیم با نیاز آبی محصولات (تبخیر و تعرق) مرتبط است، یک چالش مهم برای برنامه‌ریزان کشاورزی و منابع آب محسوب می‌شود. در واقع اطلاعات در مورد میزان تبخیر و تعرق و روند آن در شرایط آب‌وهوایی مختلف کشور می‌تواند به بهبود کارایی آبیاری کمک کرده و قدمی جدی در راستای کاهش بحران آب کشاورزی به واسطه

1. Al-Addous et al
2. Tashtoush et al
3. Boretti and Rosa
4. World Water Assessment Programme
5. Rafiei Sardooi et al
6. Silva et al
7. Maghrebi et al
8. Karimi et al
9. Ghamarnia et al
10. Moghimi et al
11. Mirzaei et al
12. Faramarzi et al

پایین بودن راندمان آبیاری و استفاده بیش از حد از منابع آبی موجود باشد (قمرنیا و سلطانی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸؛ شیری و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۴). با قطعیت می توان گفت برای اطمینان از استفاده بهینه از آب، درک جامع از نیازهای واقعی آبی گیاهان از جمله تبخیر و تعرق گیاهان در طول فصل رشد، بسیار حیاتی است (آلن و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۹۸۸؛ فاطمی و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۳؛ سیلوا و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۴). تبخیر و تعرق گیاه که نشان دهنده نیاز آبی گیاه است، تحت تاثیر شرایط آب و هوایی، ویژگی های گیاه و روش های آبیاری قرار دارد. نشریه FAO-56 تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاه (ETc) را با استفاده از ضرب عامل تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo) در ضریب گیاهی (Kc) در دوره های مختلف رشد انجام می دهد (سانچس و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۹؛ شارما و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۴؛ لوپز اورتا و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۲۴). فاکتور ضریب گیاهی (Kc) تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند نوع گیاه، مرحله رشد گیاه و الگوی کشت قرار می گیرد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). همچنین توصیه شده است برای هر محصول مقادیر ضرایب گیاهی از طریق آزمایش های هابی که بر پایه داده های لایسیمتری و شرایط اقلیمی محلی استوار است به دست آید (جنسن و آلن<sup>۹</sup>، ۲۰۱۶). در سال های اخیر بسیاری از محققان در مطالعات خود از لایسیمترهای زهکش دار برای تخمین Kc استفاده نموده اند و مقادیر مختلفی از Kc را نیز گزارش داده اند (قمرنیا و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۱۴؛ رزاقی و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۲۴؛ قمرنیا و همکاران، ۲۰۲۱؛ گنسالوس و همکاران<sup>۱۲</sup>، ۲۰۲۴). در رابطه با پژوهش حاضر، مطالعاتی صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات که در خارج از کشور مورد بررسی قرار گرفته است، ارائه شده است.

قمرنیا و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی اقدام به برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی منفرد و پایه نعنا فلفلی در شرایط لایسیمتری در دو گروه A و B نمودند.

بایسا و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۲۴) با استفاده از لایسیمتر زهکش دار مستقر در مرکز تحقیقات کشاورزی ملکاسا در اتیوپی به بررسی نیاز آبی و ضرایب گیاهی گندم رقم Kingbird پرداختند. نتایج نشان داد میانگین تبخیر و تعرق سالانه گندم ۴۲۷/۲۸ میلی متر و تبخیر و تعرق مرجع ۴۷۱/۳۰ میلی متر برآورد شد. همچنین یافته ها نشان داد ضرایب گیاهی برای مراحل اولیه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۴۳، ۰/۹۳ و ۱/۱۵ به دست آمد.

رحیمی خوب و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۲۰) در پژوهشی به بررسی نیاز آبی و تعیین ضرایب گیاهی ریحان در شرایط کشت کنترل شده گلخانه پرداختند. آزمایش در طی یک دوره رشد و با استفاده از میکرو لایسیمتر انجام شد. نتایج نشان داد متوسط تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ریحان طی دوره رشد به ترتیب برابر با ۸/۲۳ و ۵/۱۳ میلی متر بر روز شد. همچنین متوسط ضریب گیاهی برای مراحل اولیه، میانی و پایانی به ترتیب برابر با ۰/۳۰، ۰/۸۶ و ۰/۷۶ به دست آمد.

گنسالوس و همکاران (۲۰۲۴) در یک پژوهش جامع اقدام به برآورد نیازهای آبی محصولات علوفه ای گرمسیری در جنوب برزیل بر اساس یک پایگاه داده تجربی قوی نمودند. این تحقیق در ایالت سائو پائولو - برزیل، با استفاده از گونه های مختلف علوفه و ترکیب آن ها علف گینه (GG)؛ علف گینه + جو سیاه + چاودار (GOR)؛ علف برمودا (BG) و برمودا + جو سیاه + چاودار (BOR) صورت گرفت. مزارع آزمایشی به طور کامل آبیاری شدند و مقادیر Kc از اندازه گیری ETc روی لایسیمترها به دست آمد؛ ETo با استفاده از داده های روزانه ایستگاه هواشناسی نزدیک و پارامترهای استاندارد FAO56 تخمین زده شد. میانگین مقادیر روزانه ETc برای GG، GOR، BG و BOR به ترتیب ۴/۱، ۲/۹، ۳/۶ و ۳/۴ میلی متر و مقادیر متوسط Kc به ترتیب

1. Ghamarnia and Soltani
2. Shiri et al
3. Allen et al
4. Fatichi et al
5. Silva et al
6. Sanches et al
7. Sharma et al
8. López-Urrea et al
9. Jensen and Allen
10. Ghamarnia et al
11. Razzaghi et al
12. Goncalves et al
13. Bayisa et al
14. Rahimikhoob et al

۰/۹۹، ۰/۹، ۱ و ۰/۹۴ به دست آمد. آن ها هدف از انجام این پژوهش را کمبود اطلاعات در مورد نیازهای آبیاری محصولات علوفه‌ای گرمسیری و در مقابل افزایش آبیاری در مراتع بیان نمودند.

گیاه مورد استفاده در این پژوهش، گیاه علف فیل<sup>۱</sup> با نام علمی (*Pennisetum purpureum* Schumach) است. علف فیل را با نام نیپرگراس<sup>۲</sup>، مرکرگراس<sup>۳</sup>، علف اوگاندا<sup>۴</sup> و چندین نام دیگر در نقاط مختلف جهان می‌شناسند (سینگ و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۳). علف فیل یک گیاه تک‌لپه‌ای چندساله متعلق به خانواده Poaceae و جنس *Pennisetum* است (رازدی<sup>۶</sup>، ۲۰۱۶). منشأ این گیاه مناطق استوایی جنوب صحرای آفریقا است و در اکثر مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان به عنوان علوفه کشت شده است. ارتفاع این گیاه بین ۲ تا ۵ متر و به ندرت تا ۷/۵ متر نیز رشد می‌کند. طول و عرض برگ‌های این گیاه به ترتیب بین ۱۲۰-۳۰ و ۵-۱ سانتی‌متر هستند. برگ‌های آن صاف، خطی، کرک‌دار و به رنگ سبز مایل به آبی هستند. گل آذین یک سنبله انتهایی سفت به طول ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر، به رنگ زرد مایل به قهوه‌ای تا ارغوانی است. رشد ساقه‌ها به طور مداوم عمودی است اما افزایش وزن ساقه در قسمت میانی و پایینی، موجب خم شدن و تغییر شکل آن‌ها می‌شود (رامباو و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۱۶؛ رازدی، ۲۰۱۶؛ مدزینسو<sup>۸</sup>، ۲۰۱۲؛ فرانسیس<sup>۹</sup>، ۲۰۰۴). علف فیل را می‌توان از طریق بذر و یا به صورت رویشی از طریق قلمه‌های ساقه یا استولون تکثیر کرد. این گیاه پس از کاشت به شدت رشد می‌کند و می‌تواند در طول ۳ ماه به ۴ متر برسد. همچنین در برابر خشکسالی مقاوم است و یک گیاه مطمئن برای تأمین علوفه سبز محسوب می‌شود (باجاج<sup>۱۰</sup>، ۱۹۸۸؛ و رازدی، ۲۰۱۶). عملکرد سالانه این گیاه تحت شرایط اقلیمی مناسب به دلیل پتانسیل بالای رشد دوباره آن، بسیار قابل توجه است. در کشورهای مختلف تحت شرایط محیطی و مدیریتی مختلف، عملکرد تولید علف فیل بین ۲۷/۱ تا ۹۰/۲ تن در هکتار گزارش شده است (طاهرآبادی و کفیل‌زاده<sup>۱۱</sup>، ۲۰۲۳). علف فیل برای رشد خود به مقدار زیادی آب نیاز دارد. نتایج یک مطالعه بزرگ در اتیوپی روی ۸۴ گونه مختلف از علف فیل نشان داد که عملکرد این گیاه در بین گونه‌های مختلف متفاوت بوده و از ۲/۷ تا ۶۸/۱ تن در هکتار متغیر است، اما تفاوت کمی در عملکرد گونه‌ها به دلیلی تنش آبی مشاهده شد (اسلام و همکاران<sup>۱۲</sup>، ۲۰۲۳). به تازگی گزارش شده است که با تغییرات ساده در ارتفاع برداشت علف فیل می‌توان محتوای پروتئین خام را از ۹۶ به ۲۵۷ گرم در هر کیلوگرم ماده خشک افزایش داد و محتوای انرژی قابل متابولیسم را از ۸/۷ به ۱۰/۸ مگاژول در هر کیلوگرم ماده خشک ارتقا داد. همچنین بیان شده است که علف فیل این پتانسیل را دارد که به امنیت غذایی کمک کند و زندگی میلیون‌ها نفر در بیشتر کشورهای گرمسیری و نیمه‌گرمسیری جهان را تغییر دهد. از این رو، برنامه‌های تحقیقاتی و پذیرش مدیریت بهبود یافته برای علف فیل به منظور حمایت از چشم‌انداز برنامه بانک جهانی برای پایان دادن به سوءتغذیه و کاهش کوتاه‌مدتی و لاغری مرتبط تا سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۳۰ در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری ضروری است (اسلام و همکاران، ۲۰۲۴).

هدف و مسئله تحقیق در این پژوهش این است که باتوجه به مشکلات ذکر شده پیرامون کمبود آب در کشور و از طرفی به دلیل عدم توجه به افزایش کمی و کیفی گیاهان علوفه‌ای، متأسفانه تولید و مدیریت این منابع به عنوان خوراک دام‌ها به منظور رفع نیاز کشور به فراورده‌های دامی و لبنی و تأمین امنیت غذایی جمعیت در حال رشد، در مقایسه با سایر گیاهان زراعی مورد توجه واقع نشده است و همواره با کمبود مواد پروتئینی مواجه بوده‌ایم. همچنین با وجود اهمیت گیاه علف فیل به عنوان یک گیاه علوفه‌ای با عملکرد بالا، تاکنون هیچ مطالعه‌ای درباره تعیین نیاز آبی و ضرایب گیاهی این گیاه در سطح جهانی و به‌ویژه در ایران انجام

1 . Elephant grass

2 . Napier grass

3 . merker grass

4 . Uganda grass

5. Singh et al

6 . Rusdy

7. Rambau et al

8 . Mdziniso

9 . Francis

10 . Bajaj

11 .Taherabadi and Kafilzadeh

12 . Islam et al

نشده است. این فقدان اطلاعات منجر به عدم بهره‌برداری بهینه از این گیاه در سیستم‌های کشاورزی و دامپروری شده است. پژوهش حاضر برای نخستین بار به بررسی و محاسبه نیاز آبی و ضرایب گیاهی علف فیل می‌پردازد. نتایج این تحقیق می‌تواند به پر کردن این خلأ علمی کمک کند و اطلاعات ارزشمندی را به منظور برنامه‌ریزی آبیاری، بهینه‌سازی مصرف آب و توسعه پایدار کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ارائه دهد.

### روش پژوهش

#### ۱. مشخصات منطقه مورد مطالعه شامل سایت آزمایشی، ایستگاه هواشناسی، جزئیات خاک و آب آبیاری

این تحقیق در ایستگاه تحقیقاتی لایسیمتری گروه مهندسی آب واقع در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۹ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ درجه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۹ متری از سطح دریا اجرا گردید که در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی آن نشان داده شده است. آزمایش‌ها طی دو سال متوالی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در ماه‌های اردیبهشت تا مهر هر سال اجرا گردید. آمار و اطلاعات هواشناسی مورد نیاز از ایستگاه هواشناسی کرمانشاه واقع در فرودگاه اشرفی اصفهانی اخذ گردید. منطقه‌ی مورد مطالعه دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است. میانگین داده‌های هواشناسی ماهانه طی دوره تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. در طی مدت کشت گیاه علف فیل میزان بارندگی در شهر کرمانشاه بسیار محدود بود به گونه‌ای که براساس داده‌های هواشناسی مجموع میزان بارندگی فقط در ماه اردیبهشت برای سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۴/۱ و ۸ میلی‌متر بوده است و این مسئله سبب شد باران موثر نقش چندانی در تامین نیاز آبی نداشته باشد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه

خاک سایت آزمایشی مورد نمونه‌برداری و آنالیز قرار گرفت. بافت خاک لایسیمترها سیلتی رسی بود. خواص فیزیکی و شیمیایی خاک در جداول (۲) و (۳) و آنالیز ویژگی‌های آب آبیاری مورداستفاده در جدول (۴) ارائه شده است. از روش صفحه فشاری و نمونه‌برداری به ترتیب برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه ( $\theta (fc)$ )، نقطه پژمردگی دائمی ( $\theta (pwp)$ )، و چگالی ظاهری در عمق‌های مختلف خاک لایسیمترها (صفر تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متری) استفاده و متوسط این مقادیر ارائه شد.

جدول ۱. اطلاعات هواشناسی منطقه در مدت زمان اجرای آزمایش

| سال  | ماه      | حداقل دما<br>(سانتی گراد) | حداکثر دما<br>(سانتی گراد) | سرعت باد<br>(متر بر ثانیه) | رطوبت نسبی<br>(درصد) | ساعات آفتابی<br>(ساعت) | بارندگی ماهانه<br>(میلیمتر) |
|------|----------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| ۱۴۰۰ | اردیبهشت | ۱۰/۷                      | ۳۰/۲                       | ۸/۲                        | ۲۹/۱                 | ۹/۹                    | ۴/۱                         |
|      | خرداد    | ۱۳/۲                      | ۳۵/۶                       | ۸/۳                        | ۱۵/۷                 | ۱۱/۷                   | ۰                           |
|      | تیر      | ۱۸/۱                      | ۳۹/۴                       | ۷/۵                        | ۱۲                   | ۱۱/۸                   | ۰                           |
|      | مرداد    | ۱۸/۹                      | ۳۸/۸                       | ۸/۴                        | ۱۵/۹                 | ۱۰/۱                   | ۰                           |
|      | شهریور   | ۱۴/۹                      | ۳۶/۶                       | ۸/۴                        | ۱۳/۴                 | ۱۰/۹                   | ۰                           |
|      | مهر      | ۹/۲                       | ۲۹/۶                       | ۷/۵                        | ۲۰/۹                 | ۹/۹                    | ۰                           |
| ۱۴۰۱ | اردیبهشت | ۹/۸                       | ۲۵/۵                       | ۸/۸                        | ۴۰/۹                 | ۸/۴                    | ۸                           |
|      | خرداد    | ۱۴/۳                      | ۳۵                         | ۸/۱                        | ۱۸                   | ۱۰/۷                   | ۰                           |
|      | تیر      | ۱۸/۸                      | ۳۸/۸                       | ۸/۹                        | ۱۳/۵                 | ۱۱/۶                   | ۰                           |
|      | مرداد    | ۱۹/۷                      | ۴۰/۱                       | ۸/۵                        | ۱۱/۷                 | ۱۱/۵                   | ۰                           |
|      | شهریور   | ۱۶/۱                      | ۳۶/۲                       | ۷/۳                        | ۱۰/۴                 | ۱۰/۵                   | ۰                           |
|      | مهر      | ۱۰/۲                      | ۳۱/۳                       | ۷/۲                        | ۱۵                   | ۹/۱                    | ۰                           |

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مورد مطالعه

| عمق نمونه گیری<br>(cm) | بافت خاک | رس (درصد) | سیلت (درصد) | شن (درصد) | $\theta (fc)(\%)$ | $\theta (pwp)(\%)$ | وزن مخصوص ظاهری<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------------------|----------|-----------|-------------|-----------|-------------------|--------------------|-----------------------------------------|
| ۰-۹۰                   | سیلتی رس | ۵۴        | ۴۲/۳        | ۳/۷       | ۲۷/۶              | ۱۷/۲               | ۱/۳                                     |

جدول ۳. خصوصیات شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

| PH  | EC  | فسفر قابل جذب<br>(p.p.m) | پتاسیم قابل جذب<br>(p.p.m) | کربن آلی<br>(%) | Mn<br>(Meq/L) | Fe<br>(Meq/L) | Zn   | CU<br>(Meq/L) |
|-----|-----|--------------------------|----------------------------|-----------------|---------------|---------------|------|---------------|
| ۷/۳ | ۱/۲ | ۲۶                       | ۴۴۰                        | ۱/۳۸            | ۷/۸           | ۱۱/۹          | ۱/۲۶ | ۱/۶۴          |

جدول ۴. خصوصیات شیمیایی آب منطقه مورد مطالعه

| EC<br>(dS/m) | TDS<br>(mg/lit) | PH  | CO <sub>3</sub> --<br>(Meq/L) | HCO <sub>3</sub> -<br>(Meq/L) | CL-<br>(Meq/L) | SO <sub>4</sub> --<br>(Meq/L) | Anions<br>(Meq/L) | Mg <sup>++</sup> +<br>Ca <sup>++</sup><br>(Meq/L) | Na+<br>(Meq/L) | Cations<br>(Meq/L) | Soluble<br>Sodium<br>(%) | SAR  |
|--------------|-----------------|-----|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|----------------|--------------------|--------------------------|------|
| ۱            | ۶۳۱             | ۶/۹ | ۰/۰۱                          | ۶/۲                           | ۱/۸            | ۱/۱۵                          | ۹/۲۸              | ۸/۱۸                                              | ۱/۰۹           | ۹/۲۳               | ۱۱/۷                     | ۰/۵۴ |

## ۲. مشخصات و شرایط آماده سازی لایسیمترهای زهکش دار

در این پژوهش برای محاسبه تبخیر و تعرق و ضرایب گیاهی منفرد علف فیل مجموعاً از ۹ واحد لایسیمتر زهکش دار با قطر داخلی ۱/۲۰ متر و عمق ۱/۴۰ متر استفاده شد. ۳ لایسیمتر در ۲ تکرار (مجموعه لایسیمترهای A، B و C) به کشت گیاه علف فیل و ۳ لایسیمتر به کشت گیاه چمن اختصاص یافتند. جنس لایسیمترهای گیاه مرجع (چمن) و علف فیل به ترتیب از سیمان و پلی اتیلن بودند. به منظور زهکشی آب اضافی لایسیمترها، کف لایسیمترها به صورت شیب دار طراحی شد و یک لوله به قطر ۲/۵۰ سانتی متر و یک شیر کنترل در پایین هر لایسیمتر نصب گردید تا آب اضافی را به سمت ظرف مدرج نصب شده در زیر خروجی

لایسیمترها هدایت کند. در کف لایسیمترها یک لایه ۱۰ سانتی متری از شن و یک لایه ۱۰ سانتی متری از ماسه قرار داده شد. به منظور آماده سازی بستر کشت، لایسیمترها در لایه های ۱۰ سانتی متری با خاک منطقه گذرانده شده از الک ۲ میلی متری (خاک + کود پوسیده دامی + ماسه) پر شدند و هر لایه خاک به صورت دستی فشرده شد تا به چگالی ۱/۳ گرم بر سانتی متر مکعب برسد که مطابق روش الیورا و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۶) اجرا شد. بذر گیاه علف فیل در تاریخ ۹ اردیبهشت سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در هر لایسیمتر با تراکم مناسب در عمق ۱/۵ سانتی متری از سطح خاک کاشته شد و آبیاری اولیه به منظور استقرار بذر انجام شد. شکل (۲) نمایی از مراحل آماده سازی، کاشت و رشد گیاه و نحوه استقرار لایسیمترها و زهکش ها را نشان می دهد.



شکل ۲. نمایی از مراحل اجرای طرح در سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

### ۳. تبخیر و تعرق محصول و تبخیر و تعرق مرجع

به منظور محاسبه تبخیر و تعرق گیاه علف فیل ( $ET_c$ ) و تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن ( $ET_o$ ) از رابطه بیلان آبی خاک (معادله (۱)) و معادله پنمن ماتیتث (معادله (۴)) جهت صحت سنجی تبخیر تعرق گیاه مرجع استفاده شد.

$$ET_c = P + I - D \pm \Delta S \quad (1)$$

که در آن  $ET_c$ : تبخیر و تعرق گیاه (میلی متر)،  $P$ : بارندگی (میلی متر)،  $I$ : آب آبیاری (میلی متر)،  $D$ : عمق آب زهکشی شده (میلی متر)،  $\Delta S$ : تغییرات رطوبت خاک (میلی متر) طی بازه زمانی که  $ET_c$  و  $K_c$  (میلی متر) محاسبه شده است. به منظور تعیین میزان آب آبیاری مورد نیاز گیاهان کشت شده در لایسیمترها، از تست تبخیر کلاس A دایره ای شکل از جنس آهن گالوانیزه مستقر شده در ایستگاه لایسیمتری استفاده شد. این روش توسط آلن و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۸) به منظور محاسبه میزان آب آبیاری انتخاب شد و این فرایند به وسیله معادلات (۲) و (۳) توضیح داده شد. در این روش پس از پر کردن تشت با آب، سطح آب آن به طور منظم در فواصل زمانی مشخص اندازه گیری شده و از این طریق ارتفاع آب تبخیر شده از تشت در دوره آبیاری مورد نظر قرائت می شود و با در نظر گرفتن ضریب تشت ( $K_p$ ) میزان تبخیر از تشت را به تبخیر از لایسیمتر تعمیم داده و می توان مقدار آب آبیاری را محاسبه نمود. در واقع در این روش داده های تبخیر به دست آمده از تشت با یک ضریب تصحیح به نام ضریب تشت تبخیر تعدیل می شوند تا تبخیر و تعرق محصول (رابطه (۳)) محاسبه شود. در این پژوهش میزان حجم آب زهکشی شده از لایسیمترها قبل از هر آبیاری توسط ظروف مدرج اندازه گیری شده و با تقسیم آن بر سطح مقطع ظرف، ارتفاع آب زهکشی شده

1. Oliveira et al

2. Allen et al

محاسبه گردید. همچنین برای محاسبه محتوای رطوبتی خاک، در عمق های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی متری عمق خاک لایسیمترها، سنسورهای TDR نصب شدند.

#### تبخیر و تعرق پتانسیل (ET<sub>p</sub>):

$$ET_p = K_p * E_{pan} \quad (2)$$

که در آن ET<sub>p</sub>: تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی متر)، K<sub>p</sub>: ضریب تشبیه که در محدوده ۰/۷۷-۰/۷۴ قرار دارد (دورنبوت و پریوت ۱۹۹۷) و ET<sub>pan</sub>: تبخیر از تشبیه (میلی متر) است (ارتک، ۲۰۱۱).

#### تبخیر و تعرق محصول (ET<sub>c</sub>):

$$ET_c = ET_p * K_c \quad (3)$$

که در آن ET<sub>c</sub>: تبخیر و تعرق گیاه (میلی متر)، K<sub>c</sub>: ضریب گیاهی (بدون بعد) است.

در این مطالعه به منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع، علاوه بر اینکه سه دستگاه لایسیمتر به کشت گیاه مرجع چمن اختصاص داده شد، با استفاده از داده های هواشناسی روزانه شامل حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، ساعات آفتابی و درصد رطوبت نسبی و معادله پنمن مانیتیت مقدار تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از معادله (۴) محاسبه گردید:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (4)$$

که در آن: ET<sub>o</sub>: تبخیر و تعرق مرجع (میلی متر بر روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع بر روز)، T دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سلسیوس)، U<sub>2</sub> سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، e<sub>s</sub> فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e<sub>a</sub> فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، (e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>) کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار - دما (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)، γ ضریب ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)، R<sub>n</sub> تابش خالص در سطح گیاه (مگاژول بر مترمربع بر روز) می باشد.

#### ۴. ضریب گیاهی منفرد

در این تحقیق ابتدا پارامترهای معادله بیلان در دور آبیاری (۲ روزه) اندازه گیری شدند و مقدار تبخیر و تعرق نیز در دور آبیاری محاسبه شد و سپس با تقسیم آن بر تعداد روزهای دور آبیاری، تبخیر و تعرق گیاه به صورت روزانه محاسبه شد. بعد از تخمین مقادیر تبخیر و تعرق گیاه علف فیل (ET<sub>c</sub>) و تبخیر و تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) به محاسبه مقدار ضرایب گیاهی (K<sub>c</sub>) در مراحل مختلف رشد پرداخته شد. با تقسیم (ET<sub>c</sub>) بر (ET<sub>o</sub>) مقادیر ضرایب گیاهی محاسبه گردید. مقادیر ضرایب گیاهی منفرد در مراحل مختلف رشد از رابطه (۵) محاسبه گردید:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (5)$$

که در آن K<sub>c</sub> ضریب گیاهی (بدون بعد)، ET<sub>c</sub>: تبخیر و تعرق روزانه گیاه علف فیل (میلی متر بر روز) و ET<sub>o</sub>: تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع (میلی متر بر روز) است. در این پژوهش چهار مرحله رشد برای گیاه علف فیل در نظر گرفته شد که به این شرح است: مرحله ابتدایی رشد<sup>۲</sup> که از زمان کاشت گیاه تا زمان برقراری پوشش گیاهی ۱۰ درصدی ادامه دارد. مرحله توسعه<sup>۳</sup> که از

1. Doorenbos and Pruitt

2. Initial Stage

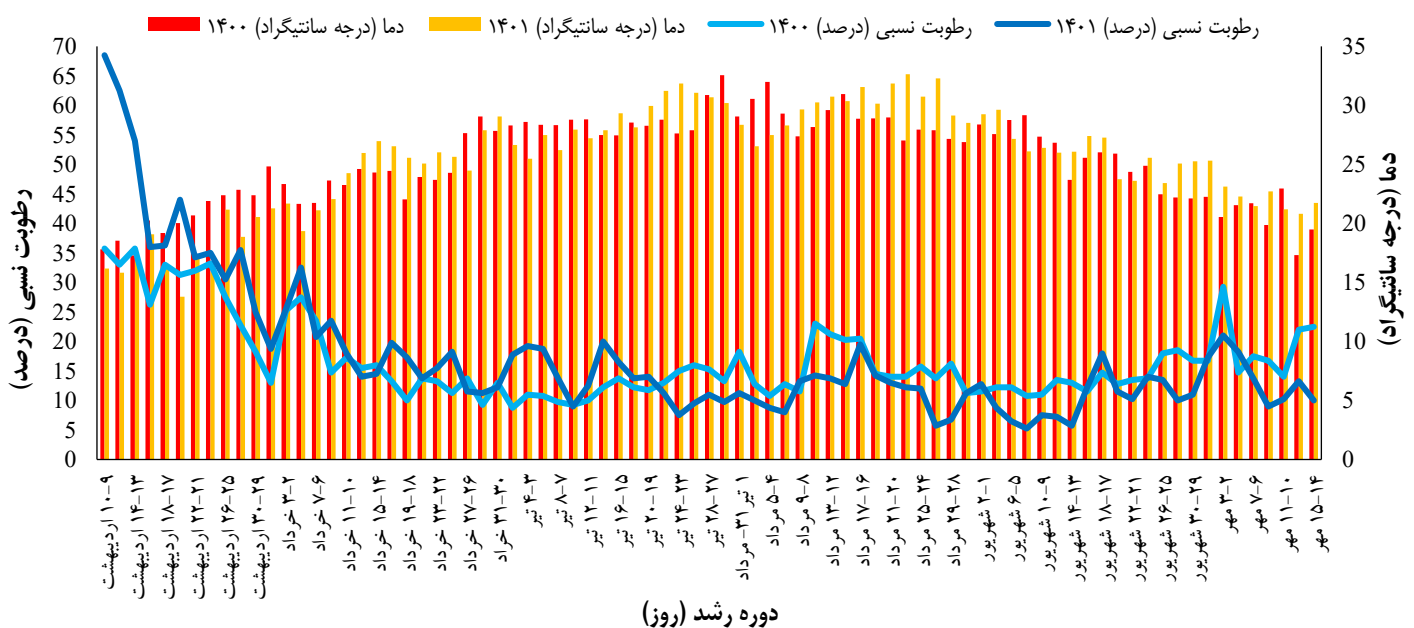
3. Crop Development Stage



زمان پوشش گیاهی ۱۰ درصد تا پوشش موثر کامل طول می‌کشد. مرحله میانی<sup>۱</sup> که از زمان پوشش کامل موثر تا زمان رسیدن محصول ادامه دارد، رشد گیاه به حداکثر میزان ممکن رسیده است. مرحله نهایی<sup>۲</sup> که از زمان رسیدن محصول تا پلاسیده شدن کامل گیاه طول می‌کشد.

### یافته‌های پژوهش

در شکل (۳) روند تغییرات رطوبت نسبی و دما برای دوره رشد در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ ارائه شده است که نشان می‌دهد در طی دوره رشد گیاه همزمان با تغییرات دمای هوا، رطوبت نسبی نیز در حال تغییر و نوسان بوده است.



شکل ۳. روند تغییرات رطوبت نسبی و دما طی دوره رشد ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

محاسبات مربوط به میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن در طول دوره رشد گیاه علف فیل انجام شد. نتایج کلی ارائه شده در جدول (۵) نشان داد میزان تبخیر و تعرق مرجع در مدت اجرای طرح در دو سال متوالی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۱۰۸۱/۲۲ و ۱۱۰۲/۹۴ میلی‌متر به دست آمد. از طرف دیگر بررسی نتایج ارائه شده نشان می‌دهد تبخیر و تعرق گیاه علف فیل در دو سال متوالی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۱۳۷۳/۵۳ و ۱۴۹۷/۶۰ میلی‌متر بوده است. حداقل و حداکثر شدت تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع چمن برای دوره رشد گیاه در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ به ترتیب ۳/۱۰ و ۲/۶۲ میلی‌متر در روز و ۸/۲۶ و ۸/۳۳ میلی‌متر در روز به دست آمد. به طور کلی میانگین حداقل و حداکثر شدت تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع برای دوره رشد گیاه علف فیل به ترتیب ۲/۸۶ و ۸/۲۹ میلی‌متر در روز بود. بررسی نتایج به دست آمده نشان داد در شروع دوره کشت مقدار  $ET_0$  کم بوده و با گذشت زمان، افزایش دما و بلند بودن طول روز و به تبع آن افزایش تابش خالص خورشیدی مقدار  $ET_0$  افزایش یافت. در اواخر دوره کشت یعنی از اوایل شهریور تا اواسط مهرماه میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن روند کاهشی داشته است که در شکل (۴) نشان داده شده است.

در شکل (۵) تغییرات تبخیر و تعرق گیاه علف فیل ( $ET_c$ ) برای دوره رشد آن در طی دو سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد در ابتدای دوره رشد گیاه علف فیل (از اوایل اردیبهشت تا اوایل خردادماه) به دلیل کوچک بودن گیاه، نیاز آبی

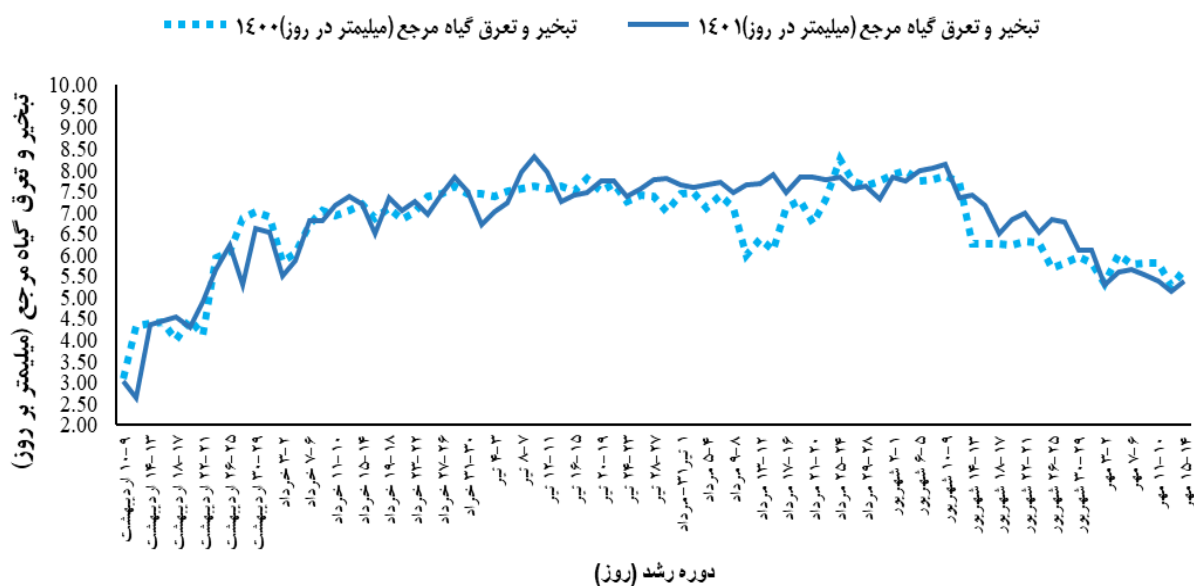
1. Mid Seasons Stage

2. Late Season Stage

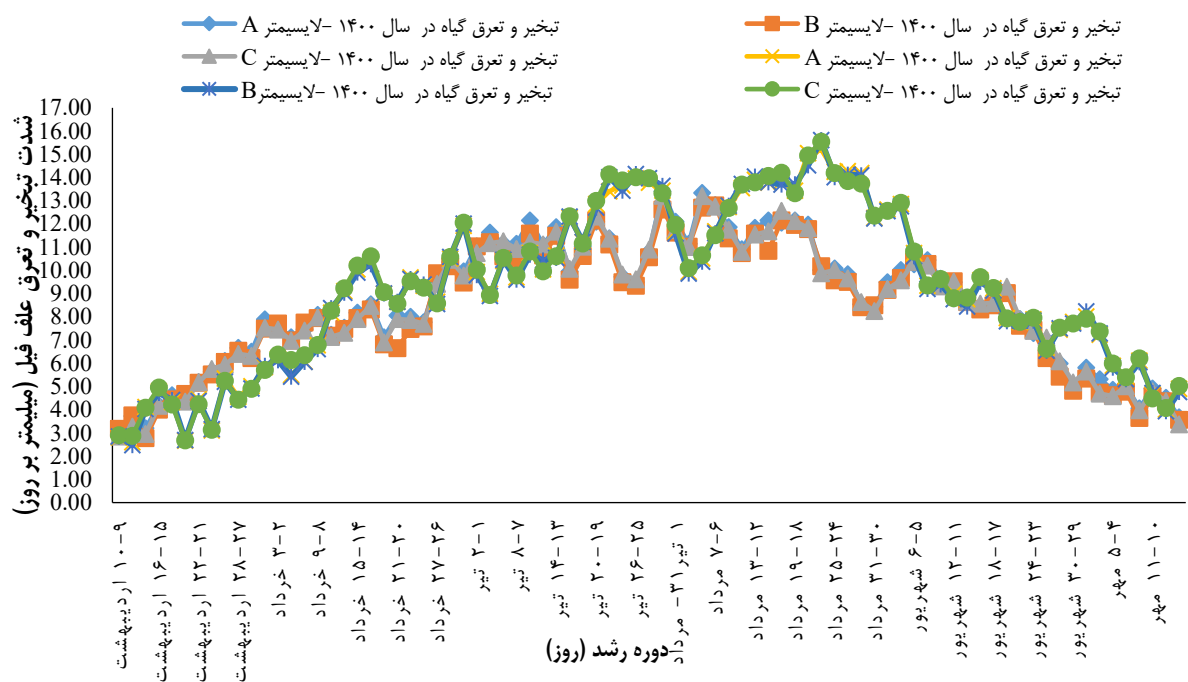
آن کمتر بوده و پس از وارد شدن گیاه به مراحل بعدی رشد توسعه اندام های هوایی گیاه، این پارامتر افزایش می یابد و در اواخر دوره کشت (اواسط شهریور تا اواسط مهر ماه) با کاهش نسبی دما و به تبع آن کاهش فعالیت سیستم های برگ و ریشه، نیاز آبی روندی کاهشی را نشان می دهد. به بیانی دیگر با گذشت زمان و رشد بیشتر گیاه، تبخیر و تعرق نیز افزایش یافته و گیاه برای ادامه فعالیت های خود آب بیشتری مصرف می کند. در جدول (۵) حداقل و حداکثر نیاز آبی گیاه علف فیل ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می دهد حداقل و حداکثر نیاز آبی علف فیل به ترتیب برابر (۲/۹۸ و ۱۳/۰۸) و (۲/۶۵ و ۱۵/۴۵) میلی متر در روز به دست آمد. میانگین حداکثر و حداقل میزان تبخیر و تعرق گیاه علف فیل در طی دوره رشد به ترتیب ۱۴/۲۷ و ۲/۸۲ میلی متر در روز شد. بالاترین شدت روزانه تبخیر و تعرق گیاه در سال ۱۴۰۱، ۱۵/۴۵ میلی متر در روز در تاریخ ۲۲ تا ۲۳ مرداد ماه مشاهده شد.

جدول (۵). حداقل و حداکثر شدت تبخیر و تعرق روزانه و مجموع تبخیر و تعرق فصلی برای گیاه مرجع (ET<sub>o</sub>) و گیاه علف فیل (ET<sub>c</sub>) در طول دوره رشد (میلی متر بر روز)

| سال     | ET <sub>o</sub> (mm/day) |       | ET <sub>c</sub> (mm/day) |       | ET <sub>c</sub> (mm) |          |
|---------|--------------------------|-------|--------------------------|-------|----------------------|----------|
|         | حداکثر                   | حداقل | حداکثر                   | حداقل | مقدار کل             | مقدار کل |
| ۱۴۰۰    | ۸/۲۶                     | ۳/۱۰  | ۲/۹۸                     | ۱۳/۰۸ | ۱۳۷۳/۵۳              | ۱۳۷۳/۵۳  |
| ۱۴۰۱    | ۸/۳۳                     | ۲/۶۲  | ۲/۶۵                     | ۱۵/۴۵ | ۱۴۹۷/۶۰              | ۱۴۹۷/۶۰  |
| میانگین | ۸/۲۹                     | ۲/۸۶  | ۲/۸۲                     | ۱۴/۲۷ | ۱۴۳۵/۵۷              | ۱۴۳۵/۵۷  |

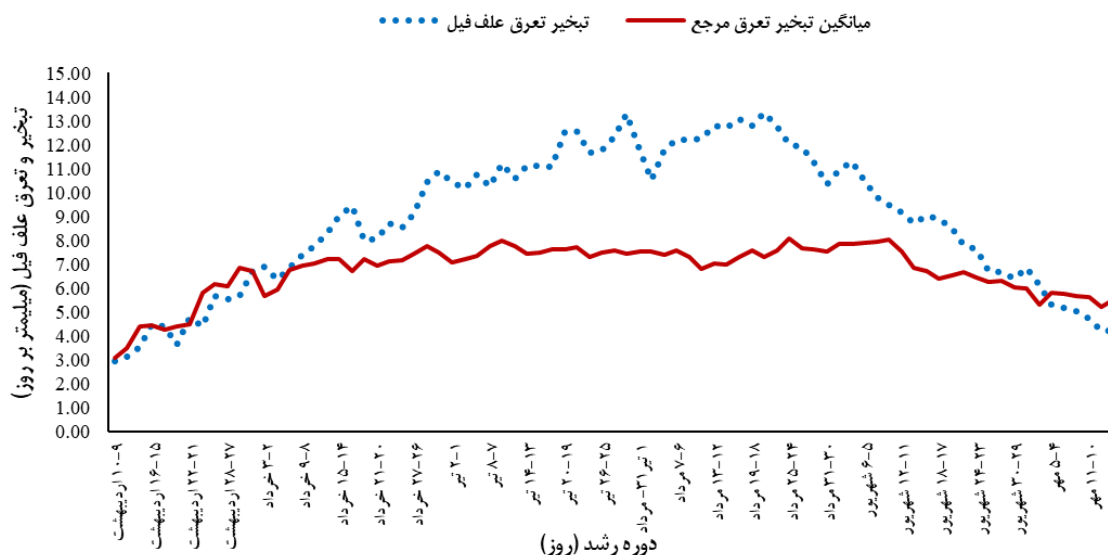


شکل ۴. روند تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن طی دوره رشد ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱



شکل ۵. تغییرات شدت روزانه تبخیر و تعرق گیاه علف فیل (ETc) برای دوره رشد در لایسیمترهای (A، B و C) تحت کشت

در شکل (۶) میانگین نیاز آبی گیاه علف فیل (ETc) و تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET<sub>o</sub>) در طی دوره رشد گیاه نشان داده شده است همانطور که مشخص است در اواسط دوره رشد با افزایش رشد گیاه علف فیل، میزان تبخیر و تعرق گیاه (ETc) بیشتر از تبخیر و تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) شده است که این اختلاف بیانگر افزایش نیاز آبی گیاه در این دوره می‌باشد.

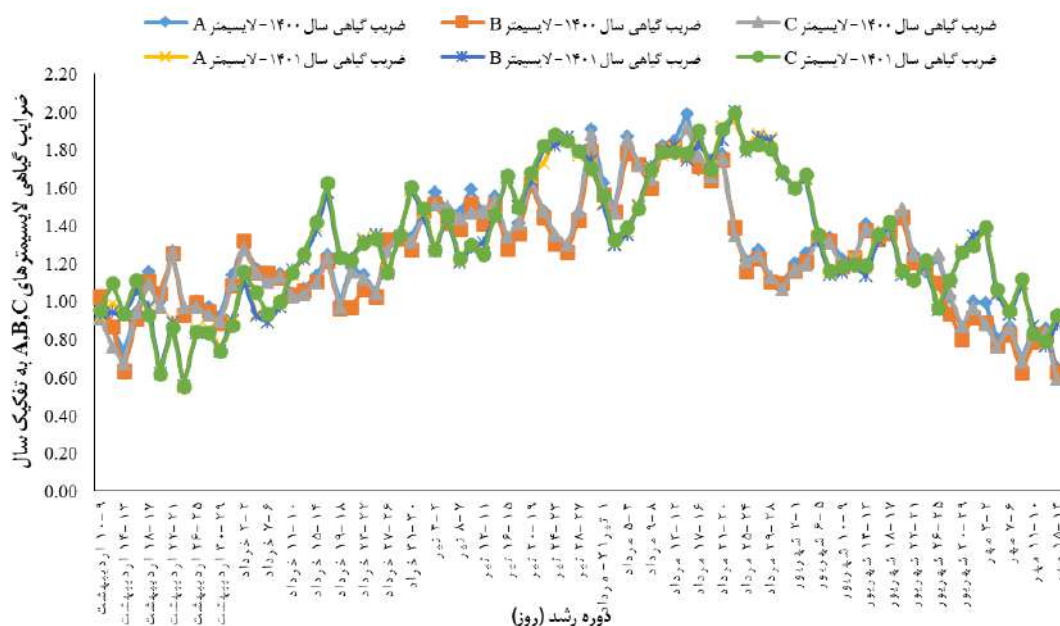


شکل ۶. میانگین نیاز آبی گیاه علف فیل (ETc) و تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET<sub>o</sub>) در طی دوره رشد

در جدول (۷) تاریخ و طول مراحل رشد علف فیل در سال های اجرای طرح ارائه شده است. طول دوره رشد گیاه در هر دو سال اجرای طرح از تاریخ ۹ اردیبهشت الی ۱۵ مهرماه معادل ۱۶۲ روز بود. در شکل (۷) نمودار ضرایب گیاهی (Kc) لایسیمترهای حاوی کشت علف فیل به تفکیک برای سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ ارائه شده است. یافته ها نشان داد ضریب گیاهی منفرد یک مقدار ثابت نبوده و در مراحل مختلف رشد گیاه، روندهای مختلفی را طی می کند. در دوران ابتدایی رشد که شامل جوانه زنی، سبز شدن و توسعه اولیه سیستم ریشه است نیاز آبی گیاه و رشد برگ ها محدودتر و به تبع آن سهم تبخیر بیشتر از تعرق است. بنابراین در این مرحله ضریب گیاهی منفرد هنگام آبیاری و خیس شدگی خاک زیاد و هنگام خشک شدن خاک کم است. لذا مقدار تبخیر و تعرق گیاه (ETc) و در نتیجه Kc پایین است. در مرحله توسعه گیاه وارد فاز رویشی سریع شده و رشد برگ ها آغاز گردیده است. در این مرحله با افزایش مصرف آب، افزایش سطح برگ و فتوسنتز بالا روبه رو هستیم. افزایش سطح برگ و به تبع آن افزایش سطح سایه انداز گیاه، میزان تبخیر از سطح خاک کاهش یافته و به تدریج تعرق اصلی ترین عامل مصرف کننده آب محسوب می شود و ضریب گیاهی منفرد نیز متناسب با سرعت رشد گیاه روند صعودی و افزایشی را طی می کند. در مرحله میانی رشد گیاه به حداکثر رشد ممکن رسیده که این عامل سبب افزایش تعرق و نیاز آبی گیاه می شود. بیشترین مقدار ضریب گیاهی پایه در دوره میانی رشد ثبت گردید. در مرحله نهایی، رشد گیاه کاهش یافته و بلوغ اتفاق می افتد. در این مرحله از رشد با کاهش میزان تعرق و آب مصرفی، فتوسنتز و رشد برگ ها کاهش و به تبع آن ضریب گیاهی روند نزولی را در پیش می گیرد. در جدول (۸) مقادیر سالانه و میانگین ۱۰ روزه تبخیر تعرق گیاهی، تبخیر تعرق مرجع و ضریب گیاهی منفرد علف فیل ارائه شده است. در نهایت با ارائه میانگین مقادیر Kc حاصل از لایسیمترها در هر سال و منحنی میانگین گیری شده از آن، مقادیر Kc در دوره های چهارگانه رشد تخمین زده شد و نتایج حاصل در شکل (۸) و جدول (۸) ارائه شد. نتایج نشان داد مقادیر Kc در سال ۱۴۰۰ برای مراحل رشد ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۹۷، ۱/۱۹، ۱/۴۷ و ۰/۹۸ و در سال ۱۴۰۱ به ترتیب ۰/۸۶، ۱/۲۷، ۱/۶۱ و ۱/۱۲ به دست آمد. میانگین دوساله ضرایب گیاهی منفرد در مراحل چهارگانه رشد (ابتدایی، توسعه، میانی و پایانی) به ترتیب ۰/۹۱، ۱/۵۴، ۱/۲۳ و ۰/۹۱ تخمین زده شد. از آنجایی که تاکنون مطالعه ای در رابطه با برآورد نیاز آبی و ضرایب گیاهی گیاه علف فیل در مناطق خشک و نیمه خشک به خصوص کشور ایران صورت نپذیرفته است، نتایج حاصل از این پژوهش می تواند در برنامه ریزی ها و محاسبات نیاز آبی گیاه علف فیل در اختیار طراحان، مهندسان و پژوهشگران قرار گیرد.

جدول ۶. جدول طول هر یک از مراحل رشد گیاه علف فیل

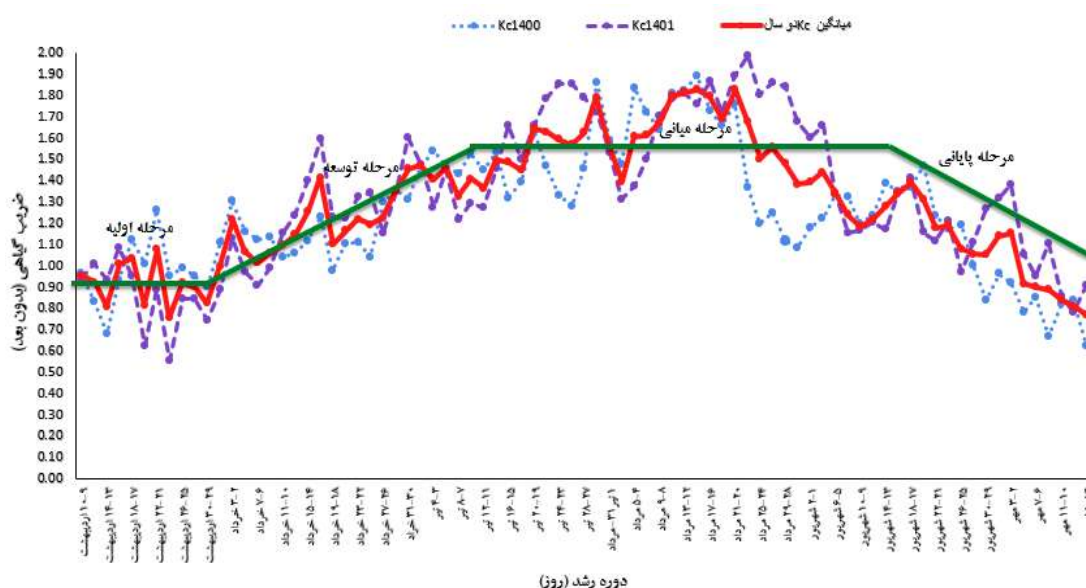
| مرحله  | سال - ۱۴۰۰               | مدت (روز) | سال - ۱۴۰۱           | مدت (روز) |
|--------|--------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| اولیه  | ۹ اردیبهشت - ۲۸ اردیبهشت | ۲۰        | ۹ اردیبهشت - ۱ خرداد | ۲۵        |
| توسعه  | ۲۹ اردیبهشت - ۶ تیر      | ۴۰        | ۲ خرداد - ۱۰ تیر     | ۴۰        |
| میانی  | ۷ تیر - ۱۶ شهریور        | ۷۰        | ۱۱ تیر - ۱۴ شهریور   | ۶۵        |
| پایانی | ۱۵ شهریور - ۱۵ مهر       | ۳۰        | ۱۵ شهریور - ۱۵ مهر   | ۳۰        |



شکل ۷. ضرایب گیاهی لایسیمترهای حاوی کشت علف فیل به تفکیک برای دوره رشد سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱

جدول ۷. مقادیر سالانه و میانگین ۱۰ روزه تبخیر تعرق گیاهی (Etc)، تبخیر تعرق مرجع (ETo) و ضریب گیاهی منفرد (Kc) علف فیل

| میانگین دو سال |      |       | سال ۱۴۰۱ |      |       | سال ۱۴۰۰ |      |       | دوره ۱۰ روزه |
|----------------|------|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|--------------|
| Kc             | ETo  | Etc   | Kc       | ETo  | Etc   | Kc       | ETo  | Etc   |              |
| ۰/۹۵           | ۳/۹۲ | ۳/۶۹  | ۰/۹۹     | ۳/۸۰ | ۳/۷۵  | ۰/۹۱     | ۴/۰۴ | ۳/۶۳  | ۱            |
| ۰/۸۹           | ۵/۳۸ | ۴/۷۸  | ۰/۷۵     | ۵/۲۸ | ۳/۹۸  | ۱/۰۳     | ۵/۴۹ | ۵/۵۸  | ۲            |
| ۱/۰۲           | ۶/۳۹ | ۶/۵۰  | ۰/۹۳     | ۶/۲۷ | ۵/۷۷  | ۱/۱۲     | ۶/۵۰ | ۷/۲۳  | ۳            |
| ۱/۱۹           | ۷/۰۱ | ۸/۳۶  | ۱/۲۷     | ۷/۰۱ | ۸/۹۱  | ۱/۱۱     | ۷/۰۱ | ۷/۸۲  | ۴            |
| ۱/۱۸           | ۷/۱۸ | ۸/۴۸  | ۱/۲۶     | ۷/۲۱ | ۹/۰۴  | ۱/۱۱     | ۷/۱۵ | ۷/۹۲  | ۵            |
| ۱/۴۳           | ۷/۳۷ | ۱۰/۵۲ | ۱/۴۳     | ۷/۲۶ | ۱۰/۳۷ | ۱/۴۳     | ۷/۴۸ | ۱۰/۶۷ | ۶            |
| ۱/۴۲           | ۷/۶۸ | ۱۰/۸۵ | ۱/۳۸     | ۷/۷۹ | ۱۰/۷۰ | ۱/۴۵     | ۷/۵۷ | ۱۱    | ۷            |
| ۱/۵۸           | ۷/۵۵ | ۱۱/۹۱ | ۱/۷۳     | ۷/۵۸ | ۱۳/۱۲ | ۱/۴۲     | ۷/۵۳ | ۱۰/۷۱ | ۸            |
| ۱/۶۰           | ۷/۴۹ | ۱۱/۹۴ | ۱/۵۵     | ۷/۷۰ | ۱۱/۹۲ | ۱/۶۵     | ۷/۲۸ | ۱۱/۹۶ | ۹            |
| ۱/۷۵           | ۷/۱۴ | ۱۲/۴۳ | ۱/۷۱     | ۷/۶۸ | ۱۳/۱۶ | ۱/۷۸     | ۶/۶۰ | ۱۱/۷۰ | ۱۰           |
| ۱/۷۰           | ۷/۵۴ | ۱۲/۸۰ | ۱/۸۵     | ۷/۷۵ | ۱۴/۳۷ | ۱/۵۴     | ۷/۳۴ | ۱۱/۲۲ | ۱۱           |
| ۱/۴۵           | ۷/۷۱ | ۱۱/۱۴ | ۱/۷۳     | ۷/۶۲ | ۱۳/۱۶ | ۱/۱۷     | ۷/۷۹ | ۹/۱۳  | ۱۲           |
| ۱/۲۵           | ۷/۶۳ | ۹/۵۳  | ۱/۳۱     | ۷/۷۹ | ۹/۴۱  | ۱/۳۰     | ۷/۴۷ | ۹/۶۶  | ۱۳           |
| ۱/۲۸           | ۶/۵۴ | ۸/۳۷  | ۱/۲۵     | ۶/۸۱ | ۸/۴۸  | ۱/۳۲     | ۶/۲۷ | ۸/۲۷  | ۱۴           |
| ۱/۱۰           | ۵/۹۷ | ۶/۵۳  | ۱/۳۱     | ۶/۲۲ | ۷/۴۴  | ۰/۹۸     | ۵/۷۲ | ۵/۶۳  | ۱۵           |
| ۰/۸۷           | ۵/۶۰ | ۴/۸۷  | ۰/۹۵     | ۵/۴۷ | ۵/۲۱  | ۰/۷۹     | ۵/۷۴ | ۴/۵۴  | ۱۶           |



شکل ۸. ضرایب گیاهی منفرد علف فیل در مراحل رشد و منحنی میانگین گیری شده

جدول ۸. ضرایب گیاهی منفرد علف فیل در مراحل رشد برای سال های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ و متوسط آن در طی دو سال

| سال   | مرحله ابتدایی | مرحله توسعه | مرحله میانی | مرحله پایانی |
|-------|---------------|-------------|-------------|--------------|
| ۱۴۰۰  | ۰/۹۷          | ۱/۱۹        | ۱/۴۷        | ۰/۹۸         |
| ۱۴۰۱  | ۰/۸۶          | ۱/۲۷        | ۱/۶۱        | ۱/۱۲         |
| متوسط | ۰/۹۱          | ۱/۲۳        | ۱/۵۴        | ۱/۰۵         |

### بحث

درک جامع از نیاز آبی واقعی گیاهان از جمله تبخیر و تعرق در طول فصل رشد به منظور استفاده بهینه از منابع آب در دسترس، امری بسیار حیاتی است که این مسئله مستلزم محاسبه میزان آب مصرفی و تعیین ضرایب گیاهی متناسب با هر منطقه است. روش FAO-56 تخمین تبخیر و تعرق واقعی گیاه (ETc) را با استفاده از ضرب عامل تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET<sub>o</sub>) در ضریب گیاهی (Kc) در دوره های مختلف رشد انجام می دهد. فاکتور ضریب گیاهی (Kc) تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند نوع گیاه، مرحله رشد گیاه و الگوی کشت قرار می گیرد. در این پژوهش با توجه به اهمیت گیاه علف فیل به عنوان یک منبع عالی علوفه ای جدید در ایران به منظور رفع نیاز کشور به فراورده های دامی و لبنی و تامین امنیت غذایی جمعیت در حال رشد و عدم وجود ضرایب گیاهی آن در مراجع مختلف، گروه تحقیقاتی ما در دانشگاه رازی کرمانشاه در دو سال ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ اقدام به اجرای پژوهشی لایسیمیتری به منظور محاسبه نیاز آبی با روش بیلان آبی و ضرایب گیاهی این گیاه جدید نمود. طول دوره رشد گیاه ۱۶۲ روز بود.

### نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد میانگین دوساله تبخیر و تعرق گیاه مرجع و تبخیر و تعرق گیاه علف فیل به ترتیب ۱۰۹۲/۰۸ و ۱۴۳۵/۵۷ میلی‌متر در روز و در نهایت متوسط ضریب گیاهی منفرد برای مراحل مختلف رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۹۱، ۱/۲۳، ۱/۵۴ و ۱/۰۵ به دست آمد. این اطلاعات می‌تواند در برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت بهینه مصرف آب برای کشت علف فیل مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش به کشاورزان و مدیران منابع آب کمک می‌کند تا با تنظیم الگوی آبیاری، مصرف آب را کاهش داده و بهره‌وری را افزایش دهند.

### 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.



## منابع

- رحیمی خوب، حدیثه، سهرابی، تیمور، و دلشاد، مجتبی. (۱۳۹۸). تعیین نیاز آبی و ضریب گیاهی ریحان در شرایط کشت کنترل شده گلخانه. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰ (۱۰)، ۲۴۶۵-۲۴۷۲.  
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280405.668191>
- رزاقی، فاطمه، اسماعیلی، محمد، و سپاسخواه، علیرضا. (۱۴۰۳). تعیین ضرایب گیاهی یگانه، دوگانه و تبخیر-تعرق استاندارد گیاه پیاز با استفاده از لایسیومتر بیلان آبی. *نشریه علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۸ (۱)، ۵۹-۷۵.  
<https://doi.org/10.22055/JISE.2024.45245.2099>
- طاهرآبادی، لیلا، و کفیل زاده، فرخ. (۱۴۰۲). ارزش غذایی علف نیپر در مراحل مختلف رشد. *مجله تولیدات دامی*، ۲۵ (۱)، ۸۳-۹۱.  
<https://doi.org/10.22059/jap.2023.350164.623711>
- قمرنیا، هوشنگ، و سلطانی، نرگس. (۱۳۹۷). بررسی کارائی روش های تجربی برآورد تبخیر - تعرق مرجع (بر پایه تشتک تبخیر) در اقلیم های مختلف (مطالعه موردی ایران). *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴ (۴)، ۱۷۰-۱۸۳.  
[https://www.iwrr.ir/article\\_63469.html?lang=en](https://www.iwrr.ir/article_63469.html?lang=en)
- مقیم، زهرا، کرباسی، علیرضا، محتشمی، تکت، و علیزاده، امین. (۱۳۹۹). بررسی عوامل موثر بر اضافه برداشت کشاورزان از منابع آب زیرزمینی در دشت زاوه- تربت حیدریه. *نشریه پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)*، ۳۴ (۴)، ۶۰۳-۶۱۴.  
<https://doi.org/10.22092/jwra.2021.123502>

## References

- Al-Addous, M., Bdour, M., Rabaiah, S., Boubakri, A., Schweimanns, N., Barbana, N., & Wellmann, J. (2024). Innovations in Solar-Powered Desalination: A Comprehensive Review of Sustainable Solutions for Water Scarcity in the Middle East and North Africa (MENA) Region. *Water*, 16(13), 1877. <https://doi.org/10.3390/w16131877>
- Allen, R. G. (1996). Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 122(2), 97-106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:2\(97\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:2(97))
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao*, Rome, Italy. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>
- Bajaj, Y.P.S. (1988). Elephant Grass, Napier Grass (*Pennisetum purpureum* Schum.). In: Bajaj, Y.P.S. (eds) *Crops II. Biotechnology in Agriculture and Forestry*, 6. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-73520-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-642-73520-2_25)
- Bayisa, G. D., Ayana, M., Mekonnen, B., Hordofa, T., & Dinka, M. O. (2024). Drainage lysimeter based measurement of water requirement and crop coefficient of bread wheat under semi-arid climate of Melkassa, Ethiopia. *Heliyon*, 10(17), e36969. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36969>
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the Projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*, 2, 15. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0039-9>
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 24, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, Rome, Italy. <https://fao.org/4/s8376e/s8376e.pdf>
- Edirisooriya, E. M. N. T., Wang, H., Banerjee, S., Longley, K., Wright, W., Mizuno, W., & Xu, P. (2024). Economic feasibility of developing alternative water supplies for agricultural irrigation. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 43, 100987. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2023.100987>
- Erteck, A. (2011). Importance of Pan Evaporation for Irrigation Scheduling and Proper Use of Crop Pan Coefficient (Kcp), *Crop. Afri. J. of Agri. Res.*, 32, 6706-6718. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.1522>
- Faramarzi, M., Yang, H., Schulin, R., & Mikayilov, F. (2010). Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran: Implications of agricultural water management for wheat production. *Agricultural Water Management*, 97(11), 1861-1875. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.07.002>
- Fatichi, S., Paschalis, A., Bonetti, S., Manoli, G., & Pappas, C. (2023). Water use efficiency: a review of spatial and temporal variability. *Encyclopedia of Soils in the Environment, Elsevier Academic Press publications*, New York, United States. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00166-X>
- Francis, J. K. ed. (2004). Wildland shrubs of the United States and its Territories: thamnisc descriptions. *Forest Service publications*, Washington, DC, United States. <https://doi.org/10.2737/IITF-GTR-26>
- Ghamarnia, H., & Soultani, N. (2018). Evaluating efficiency of empirical estimation reference evapotranspiration (Pan based method) in different climate conditionss (Case Study of Iran). *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 170-183. [https://www.iwrr.ir/article\\_63469.html?lang=en](https://www.iwrr.ir/article_63469.html?lang=en) (in Persian)
- Ghamarnia, H., Miri, E., & Ghobadei, M. (2014). Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (*Nigella sativa* L.) in a semi-arid climate. *Irrigation science*, 32, 67-76. <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0412-2>

- Ghamarnia, H., Mousabeygi, F., & Rezvani, S. V. (2021). Water Requirement, Crop Coefficients of Peppermint (*Mentha piperita* L.) and Realizing of SIMDualKc Model. *Agrotechniques in Industrial Crops*, 1(3), 110-121. <https://doi.org/10.22126/atic.2021.6791.1019>
- Gonçalves, I. Z., Mendonça, F. C., Sanches, A. C., & Marin, F. R. (2024). Optimizing evapotranspiration and crop irrigation requirements of tropical forages cropping systems in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 68(1), 57-67. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02570-9>
- Islam, M. R., Garcia, S. C., Islam, M. A., Bashar, M. K., Roy, A., Roy, B. K., Sarker, N. R., & Clark, C. E. F. (2024). Ruminant Production from Napier Grass (*Pennisetum purpureum* Schum): A Review. *Animals*, 14, 467. <https://doi.org/10.3390/ani14030467>
- Islam, M. R., Garcia, S. C., Sarker, N. R., Islam, M. A., & Clark, C. E. (2023). Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum) management strategies for dairy and meat production in the tropics and subtropics: Yield and nutritive value. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1269976. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1269976>
- Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements, in: *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. American Society of Civil Engineers*, 1-744. <https://doi.org/10.1061/9780784414057>
- Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- López-Urrea, R., Oliveira, C. M., Montoya, F., Paredes, P., & Pereira, L. S. (2024). Single and basal crop coefficients for temperate climate fruit trees, vines and shrubs with consideration of fraction of ground cover, height, and training system. *Irrigation Science*, 1-37. <https://doi.org/10.1007/s00271-024-00964-0>
- Maghrebi, M., Noori, R., Bhattarai, R., Mundher Yaseen, Z., Tang, Q., Al-Ansari, N., Danandeh Mehr, A., Karbassi, A., Omidvar, J., Farnoush, H., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., & Madani, K. (2020). Iran's Agriculture in the Anthropocene. *Earth's Future*, 8(9), Article e2020EF001547. <https://doi.org/10.1029/2020EF001547>
- Mdziniso, M. P. (2012). Effect of carbohydrate sources on fermentative characteristics and chemical composition of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) silage. *BSc (Animal Science) thesis, University of Swaziland, Swaziland*.
- Mirzaei, A., Saghafian, B., Mirchi, A., & Madani, K. (2019). The Groundwater–Energy–Food Nexus in Iran's Agricultural Sector: Implications for Water Security. *Water*, 11(9), 1835. <https://doi.org/10.3390/w11091835>
- Moghim, Z., Mohtashami, T., Alizadeh, A., & Karbasi, A. (2021). Factors Affecting Groundwater Resources Overdraft by Farmers in Zaveh-Torbath Heydarieh Plain. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(4), 603-614. <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.123502> (In Persian)
- Oliviera, I. B., Demond, A. H., & Salehzadeh, A. (1996). Packing of Sands for production of homogeneous porous media. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1), 49-53. <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000010010x>
- Rafiei Sardooi, E., Bazrafshan, O., & Jamshidi, S. (2024). Modeling the water security in a watershed using the water footprint concept and water scarcity indicators. *Water Supply*, 24(1), 235-253. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.323>

- Rahimikhoob, H., Sohrabi, T., & Delshad, M. (2020). Determination of Water Requirement and Crop Coefficient for Basil (*Ocimum basilicum* L.) under Controlled Greenhouse. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2465-2472. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2019.280405.668191> (In Persian)
- Rambau, M. D., Fushai, F., & Baloyi, J. J. (2016). Productivity, chemical composition and ruminal degradability of irrigated Napier grass leaves harvested at three stages of maturity. *South African Journal of Animal Science*, 46(4), 398-408. <https://doi.org/10.4314/sajas.v46i4.8>
- Razzaghi, F., Esmaily, M., & Sepaskhah, A. R. (2024). Determining single and dual crop coefficients and standard evapotranspiration of onion using water balance lysimeter. *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(1), 59-75. <https://doi.org/10.22055/IJSE.2024.45245.2099> (In Persian)
- Rusdy, M. (2016). Elephant grass as forage for ruminant animals. *Livestock Research for Rural Development*, 28(4), 2791171. <http://www.lrrd.org/lrrd28/4/rusd28049>
- Sanches, A. C., Souza, D. P. D., Jesus, F. L. F. D., Mendonça, F. C., & Gomes, E. P. (2019). Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat and ryegrass. *Scientia Agricola*, 76, 448-458. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0386>
- Sharma, V., Changade, N. M., Madane, D. A., Yadav, K., & Tarate, S. B. (2024). Development of growth-stage specific crop coefficient for drip irrigated wheat crop grown in climatic conditions of Jalandhar, Punjab. *Journal of Agrometeorology*, 26(3), 356-361. <https://doi.org/10.54386/jam.v26i3.2628>
- Shiri, J., Nazemi, A. H., Sadraddini, A. A., Landeras, G., Kisi, O., Fard, A. F., & Marti, P. (2014). Comparison of heuristic and empirical approaches for estimating reference evapotranspiration from limited inputs in Iran. *Computers and Electronics in Agriculture*, 108, 230-241. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.007>
- Silva, S. P., Valín, M. I., Mendes, S., Araujo-Paredes, C., & Cancela, J. J. (2024). Water productivity in *Vitis vinifera* L. cv. Alvarinho using dual crop coefficient approach. *Agricultural Water Management*, 303, 109027. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109027>
- Singh, B. R., Singh, H. P., & Obeng, E. (2013). Elephantgrass. ©CAB International. *Biofuel Crops: Production, Physiology and Genetic Publications*, 271-291. <https://doi.org/10.1079/9781845938857.0271>
- Taherabadi, L., & Kafilzadeh, F. (2023). Nutritive value of Napier grass at different growth stages. *Journal of Animal Production*, 25 (1), 83-91. <https://doi.org/10.22059/jap.2023.350164.623711> (In Persian)
- Tashtoush, B., Alyahya, W., Al Ghadi, M., Al-Omari, J., & Morosuk, T. (2023). Renewable Energy Integration in Water Desalination: State-of-the-Art Review and Comparative Analysis. *Appl. Energy*. 352, 121950. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121950>
- World Water Assessment Programme (Nations Unies), The United Nations World Water Development Report. (2018). *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, New York, United States. [www.unwater.org/publications/world-water-development-report](http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report)



## Comparison of energy productivity in surface and sprinkler irrigation systems for Wheat and Alfalfa cultivation (case study: downstream lands of Soural reservoir dam, Kurdistan Province)

Peyman Tahmasebi<sup>1</sup> , and Hamid Zare Abyaneh<sup>2✉</sup>

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. E-mail: [p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir](mailto:p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)
2. Corresponding author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran. E-mail: [zare@basu.ac.ir](mailto:zare@basu.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 13 February 2025

Received in revised form 06

April 2025

Accepted 23 May 2025

Available online 22 June 2025

#### Keywords:

water productivity,

specific energy,

Alfalfa,

dam downstream,

human resources.

### ABSTRACT

**Objective:** The objective of this study was to examine the energy consumption patterns in the production of irrigated wheat and alfalfa in the downstream lands of the Soural Reservoir Dam in Kurdistan Province. The study also aimed to analyze key energy indicators such as energy ratio, specific energy, and energy productivity based on the type of irrigation systems and input usage.

**Method:** In this study, 37 farms with a total area of 76 hectares were selected. The farms were categorized into systems 1 and 2 for wheat cultivation, and systems 3 and 4 for alfalfa. Systems 1 and 3 were equipped with surface irrigation systems, while systems 2 and 4 utilized fixed classic sprinkler irrigation systems with movable sprinklers, all operating under gravity-fed water sources. Data on total input consumption were collected through questionnaires administered to farmers in the region during the 2020–2021 cropping season.

**Results:** The results indicated that in wheat cultivation systems, the highest energy consumption was associated with chemical fertilizers, especially nitrogen fertilizers. In alfalfa systems, irrigation water in system 3 and chemical fertilizers in system 4 were the dominant energy-consuming inputs. The total energy inputs for systems 1 to 4 were 29733.16, 46347.05, 52054.7, and 39147.48 MJ/ha, respectively, while the corresponding output energies were 66,450, 96,000, 189,600, and 229,100 MJ/ha. The calculated energy ratios were 2.32, 2.07, 3.64, and 5.85, and the specific energy values were 6.32, 6.81, 3.25, and 2.69 MJ/kg, respectively. Energy productivity was measured at 0.12, 0.10, 0.29, and 0.37 kg/MJ for the four systems, respectively.

**Conclusion:** The findings revealed that high nitrogen fertilizer uses in wheat farms and excessive water consumption in alfalfa farms significantly increased energy input levels. Moreover, delays in water release to farmers were identified as a major challenge in irrigation management in the area. To enhance energy productivity and reduce environmental impacts, it is recommended to educate farmers on efficient energy and resource management practices.

**Cite this article:** Tahmasebi, P., & Zare Abyaneh, H. (2025). Comparison of energy productivity in surface and sprinkler irrigation systems for Wheat and Alfalfa cultivation (case study: downstream lands of Soural reservoir dam, Kurdistan Province). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 72-93. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>

Publisher: Razi University.

## **Introduction**

Increasing energy productivity in the agricultural sector is one of the key issues in sustainable natural resource management and reducing production costs. The high consumption of agricultural inputs, particularly chemical fertilizers and irrigation water, has a direct impact on the amount of energy input in production systems. In this context, comparing energy productivity in different irrigation systems can play a significant role in optimizing energy consumption and improving water resource management. This study aims to examine the energy consumption patterns in irrigated wheat and alfalfa production in the downstream lands of the Soural Reservoir Dam in Kurdistan Province and compare the energy productivity of surface and sprinkler irrigation systems.

## **Method**

This field study was conducted on 37 farms covering a total area of 76 hectares in the downstream lands of the Soural Dam. The studied farms were categorized into four groups based on crop type and irrigation system:

- ✓ Systems 1 and 2: Wheat farms equipped with surface and fixed-classic sprinkler irrigation systems with movable sprinklers, utilizing gravitational energy.
- ✓ Systems 3 and 4: Alfalfa farms equipped with surface and fixed-classic sprinkler irrigation systems with similar energy supply characteristics.

The required data, including the amount of input (consumed) and output (produced) energy in each system, were collected through in-person questionnaires from farmers during the 2019–2020 cropping season. To enhance data accuracy, information regarding water consumption and other inputs was verified and refined through consultations with relevant organizations such as the Kurdistan Regional Water Authority and agricultural experts. Energy indices, including total input and output energy, energy ratio, specific energy, and energy productivity, were calculated.

## **Results**

The results of this study indicated that the consumption of chemical fertilizers, particularly nitrogen, in wheat farms and irrigation water in alfalfa farms had the greatest impact on increasing energy input. The total input and output energy for different systems were calculated as follows:

- ✓ Wheat: System 1 (29,733.16 MJ/ha input, 66,450 MJ/ha output) and System 2 (46,347.05 MJ/ha input, 96,000 MJ/ha output).
- ✓ Alfalfa: System 3 (52,054.70 MJ/ha input, 189,600 MJ/ha output) and System 4 (39,147.48 MJ/ha input, 229,100 MJ/ha output).

The energy ratios in the studied systems were calculated as 2.32, 2.07, 3.64, and 5.85, respectively. Additionally, the specific energy and energy productivity indices were estimated as 6.32, 6.81, 3.27, and 2.69 MJ/kg and 0.12, 0.10, 0.29, and 0.37 kg/MJ, respectively.

An analysis of these indices revealed that in wheat farms, energy productivity was higher in System 1 than in System 2, due to farmers' belief that increasing nitrogen fertilizer use would enhance yield. However, the grain yield of wheat in System 2 was approximately 1.40 times



higher than in System 1. on alfalfa farms, System 4 had higher energy productivity than System 3, primarily due to the significantly higher water consumption in System 3, which was 2.4 times that of System 4. One of the major challenges in irrigation management in this region was the delay in water release to farmers, which led to reduced productivity and increased resource wastage. This issue underscores the importance of implementing educational programs and optimizing energy consumption.

### **Conclusions**

Based on the findings of this study, crop type and irrigation system have a significant impact on energy consumption and efficiency. In wheat farms, optimizing fertilizer input can lead to reduced energy input and improved system efficiency. on alfalfa farms, water management plays a crucial role in enhancing energy productivity. Additionally, implementing educational programs for farmers on energy and resource management can have a significant impact on improving efficiency and reducing environmental effects. Therefore, it is recommended that policymakers and agricultural planners emphasize modern water management techniques and agricultural input optimization to improve energy productivity and ensure the sustainability of agricultural production in the region.

### **Author Contributions**

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.





## مقایسه بهره وری انرژی در سامانه های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه

### موردی: پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان)

پیمان طهماسبی<sup>۱</sup>، و حمید زارع ابیانه<sup>۲</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: [p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir](mailto:p.tahmasebi@agr.basu.ac.ir)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: [zare@basu.ac.ir](mailto:zare@basu.ac.ir)

#### چکیده

#### اطلاعات مقاله

**هدف:** هدف از این مطالعه، بررسی الگوی مصرف انرژی در تولید محصولات گندم آبی و یونجه در اراضی پایاب سد مخزنی سورال در استان کردستان و تحلیل شاخص های انرژی نظیر نسبت انرژی، انرژی ویژه و بهره وری انرژی باتوجه به نوع سامانه های آبیاری و نهاده های مصرفی است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

**روش پژوهش:** در پژوهش حاضر، ۳۷ مزرعه به مجموع مساحت ۷۶ هکتار، انتخاب شدند. مزارع مورد مطالعه به سامانه های ۱ و ۲ برای گندم و سامانه های ۳ و ۴ برای یونجه گروه بندی شدند. سامانه های ۱ و ۳ مجهز به سامانه آبیاری سطحی و سامانه های ۲ و ۴ مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک، با منبع انرژی ثقل بودند. اطلاعات مورد نیاز، شامل کل نهاده های مصرفی (ورودی)، در قالب پرسشنامه از کشاورزان دشت مذکور در طول فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ استخراج شدند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

**یافته ها:** نتایج نشان داد که بیشترین مصرف انرژی در نظام زراعی گندم مربوط به کودهای شیمیایی، به ویژه کود نیتروژن، و در نظام زراعی یونجه، مربوط به آب آبیاری در سامانه ۳ و کود شیمیایی در سامانه ۴ بوده است. مجموع انرژی ورودی مزارع به ترتیب ۲۹۷۳۳/۱۶، ۴۶۳۴۷/۰۵، ۵۲۰۵۴/۷ و ۳۹۱۴۷/۴۸ و کل انرژی خروجی ۶۶۴۵۰، ۹۶۰۰۰، ۱۸۹۶۰۰ و ۲۲۹۱۰۰ مگا ژول در هکتار بود. شاخص های نسبت انرژی به ترتیب ۲/۳۲، ۲/۰۷، ۳/۶۴ و ۵/۸۵ و انرژی ویژه به ترتیب ۶/۳۲، ۶/۸۱، ۳/۲۵ و ۲/۶۹ مگا ژول در هکتار محاسبه شد. بهره وری انرژی به ترتیب ۰/۱۲، ۰/۱۰، ۰/۲۹ و ۰/۳۷ کیلوگرم در مگا ژول به دست آمد.

کلیدواژه ها:

بهره وری آب،

انرژی ویژه،

نیروی انسانی،

یونجه،

پایاب سد.

**نتیجه گیری:** نتایج نشان داد که مصرف زیاد کود نیتروژنی در مزارع گندم و آب آبیاری در مزارع یونجه منجر به افزایش قابل توجه انرژی ورودی شده است. همچنین، تأخیر در رهاسازی آب به کشاورزان از جمله چالش های اصلی مدیریت آبیاری در منطقه محسوب می شود. به منظور افزایش بهره وری انرژی و کاهش آثار زیست محیطی، آموزش کشاورزان در زمینه مدیریت بهینه انرژی و مصرف منابع پیشنهاد می شود.

**استناد:** طهماسبی، پیمان؛ و زارع ابیانه، حمید. (۱۴۰۴). مقایسه بهره وری انرژی در سامانه های آبیاری سطحی و بارانی در کشت گندم و یونجه (مطالعه موردی: پایاب

سد مخزنی سورال استان کردستان). *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۲)، ۷۲-۹۳.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11936.1160>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

### مقدمه

باتوجه به خشک‌سالی‌های اخیر، کاهش میزان بارندگی و افزایش دمای جهانی ناشی از گرمایش زمین، اهمیت آب به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. این شرایط باعث می‌شود که امنیت غذایی و تأمین آن، که به طور مستقیم به کشاورزی آبی وابسته است، به یکی از چالش‌های اساسی بشر تبدیل شود (سرن و ییلدیریم<sup>۱</sup>، ۲۰۲۵). همچنین آب، به عنوان اصلی‌ترین نهاده کشاورزی، کمبود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک، محدودیت‌های توسعه کشاورزی را تشدید می‌کند (ریحانی و خاشعی سیکویی، ۱۳۹۴). انرژی در کشاورزی به عنوان عامل کلیدی در افزایش بهره‌وری، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و کاهش هزینه‌ها نقش اساسی دارد. از انرژی برای آبیاری، عملیات مکانیزه و فرآوری محصولات استفاده می‌شود که در نهایت بر کار آبی تولید، پایداری منابع و کاهش اثرات زیست‌محیطی تأثیرگذار است (پنگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۴). بخش کشاورزی به عنوان یک سامانه پیچیده، ارتباط تنگاتنگی با منابع انرژی برقرار می‌کند (کس<sup>۳</sup>، ۲۰۲۴) زیرا تولید محصولات کشاورزی به انرژی ورودی و خروجی مزارع بستگی دارد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). کشاورزی، هم تولیدکننده و هم مصرف‌کننده بزرگ انرژی است (ناصری<sup>۴</sup>، ۲۰۲۴). از این رو بخش کشاورزی و انرژی دو بخش به هم پیوسته و تأثیرگذار بر یکدیگرند و توسعه پایدار هریک از این دو بخش، بر دیگری تأثیر مستقیم دارد (شی و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۲۴). انرژی به عنوان یکی از ارکان اساسی در سامانه‌های تولیدی، نقش اساسی در فرآیندهای تولیدی ایفا می‌کند. برای دستیابی به تولید پایدار، ضروری است که مصرف انرژی به دقت ارزیابی و مدیریت شود (تاکا و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۸). تحلیل دقیق مصرف انرژی در هر مرحله تولید، امکان شناسایی بخش‌های پرمصرف را فراهم کرده و با اعمال راهکارهای بهینه‌سازی، کارایی انرژی را افزایش می‌دهد. این فرآیند نه تنها موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری اقتصادی می‌شود، بلکه با کاهش مصرف انرژی، اثرات زیست‌محیطی نامطلوب را نیز کاهش خواهد داد (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). از این رو، تحلیل انرژی به عنوان ابزاری راهبردی در جهت دستیابی به تولید پایدار و بهره‌ور در کشاورزی و سایر بخش‌های تولیدی شناخته می‌شود. علاوه بر این، ارزیابی انرژی نهاده‌ها، ابزاری کلیدی در طراحی، مدل‌سازی و تحلیل عملکرد سامانه‌های کشاورزی محسوب شده و توسط پژوهشگران در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (کیتانی<sup>۷</sup>، ۱۹۹۹). ابعاد مزارع، میزان مکانیزاسیون و نوع محصول زراعی از عوامل مؤثر بر میزان مصرف انرژی در کشاورزی محسوب می‌شوند. به همین دلیل، سامانه‌های مختلف تولید محصولات کشاورزی الگوهای متنوعی از مصرف انرژی را ارائه می‌دهند (محمدی و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۴؛ و واحدی و ظریف‌نشاط<sup>۹</sup>، ۲۰۲۱). انرژی در بخش کشاورزی از منظر نحوه مصرف (مستقیم و غیرمستقیم) و نوع منبع (تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر) به چهار دسته طبقه‌بندی شده است. انرژی مستقیم که داخل مزرعه مصرف می‌شود (شامل سوخت ماشین‌آلات و الکترومپ‌ها، آب آبیاری و الکتریسیته)، انرژی غیرمستقیم که صرف تولید نهاده‌های کشاورزی (شامل کود، سم، بذر و ماشین‌آلات)؛ انرژی تجدیدپذیر (شامل نیروی انسانی، آب، کود حیوانی و بذر) می‌شود؛ و انرژی تجدیدنپذیر (شامل سوخت‌های فسیلی و انرژی مورد استفاده در تولید سموم، کودهای شیمیایی و ماشین‌آلات) که با مصرف آن‌ها منابع طبیعی محدود می‌گردد (احمدبیک و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۳). در

1. Şeren and Yildirim

2. Peng et al

3. Kiss

4. Nasser

5. Shi et al

6. Taki et al

7. kitani

8. Mohammadi et al

9. Vahedi & Zarifneshat

10. Ahmadbeyki et al

فرآیند تولید محصولات کشاورزی، نهاده‌های انرژی مصرفی همچون سوخت، برق، ماشین‌آلات، بذر، کود و سموم سهم قابل توجهی در مصرف انرژی کل نهاده دارند (همدانی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱). در ایران، انرژی مستقیم مصرفی در بخش کشاورزی حدود ۲۰۴/۳۷ پتاژول برآورد شده، که ۳/۵ درصد از کل انرژی فسیلی و برق کشور را شامل می‌شود. این میزان انرژی صرف مواردی مانند آبیاری، ماشین‌آلات و تجهیزات کشاورزی می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۸۴). با این وجود، به دلیل افزایش استفاده از نهاده‌های کشاورزی (کود، سم، بذر و غیره) و ادوات ماشین‌آلات، مصرف انرژی در این بخش رو به افزایش است. از این رو باتوجه به مطالب ذکر شده انرژی و آب به عنوان دو نهاده مهم و اصلی در تولیدات کشاورزی، نقش اساسی در تضمین امنیت غذایی و بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها دارند (هان و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۰). بنابراین برای دستیابی به پایداری منابع، مدیریت هماهنگ این سه منبع (انرژی، آب و غذا) امری ضروری است (پورواتو و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۱). به این لحاظ درک صحیح و ارزیابی بهره‌وری آب و انرژی در سامانه‌های آبیاری، امکان مدیریت کارآمدتر و بهینه‌سازی این منابع محدود و ارزشمند را فراهم می‌آورد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). در این راستا سامانه‌های پیشرفته آبیاری به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب، پیشرفت قابل توجهی داشته‌اند. علاوه بر این، آگاهی از میزان مصرف آب و انرژی، بهره‌وری آن‌ها و تحلیل این منابع در سامانه‌های آبیاری تحت بارانی، و مقایسه آن‌ها با سایر سامانه‌ها، امری ضروری به شمار می‌آید (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳).

گندم به عنوان یک محصول استراتژیک، نقش مهمی در امنیت غذایی و اقتصاد ملی دارد (حیدری و تاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۵) و با کشت سالانه در بیش از ۲۰۰ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی جهان، به گسترده‌ترین محصول زراعی تبدیل شده است که تغذیه بیش از ۲۱ درصد جمعیت دنیا را تأمین می‌کند (سنبتا و ورکو<sup>۵</sup>، ۲۰۲۳). از سوی دیگر، یونجه که به عنوان (ملکه علوفه‌ها) شناخته می‌شود، به طور گسترده به عنوان یک گیاه علوفه‌ای ارزشمند کشت می‌گردد (رحمان و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۲۵). در ایران، این محصول حدود ۶۴۰ هزار هکتار از اراضی زراعی را به خود اختصاص داده که معادل ۵/۴۱ درصد از کل سطح زیر کشت محصولات زراعی و ۶۲/۸ درصد از کل سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای کشور است. تولید سالانه یونجه نیز حدود ۵/۸ میلیون تن برآورد گردیده که ۷/۸۸ درصد از کل تولید محصولات زراعی و ۳۱/۷ درصد از تولید نباتات علوفه‌ای را تشکیل داده است (قادرپور و همکاران، ۱۳۹۶). باتوجه به نقش اساسی گندم و یونجه در امنیت غذایی و اقتصاد ملی، سیاست‌گذاری در حوضه آب و انرژی باید به این دو محصول توجه ویژه‌ای داشته باشد. از این رو، یونجه و گندم به عنوان دو گیاه مورد بررسی در این تحقیق انتخاب شده‌اند، زیرا هر کدام جایگاه مهمی در نظام کشاورزی ایران دارند.

### ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در مناطق خشک و نیمه‌خشک که بارندگی کم است اکثر آب مورد نیاز گیاه از آب زیرزمینی و از طریق آب چاه تأمین می‌شود که این امر ممکن است موجب فرونشست زمین گردد (گودرزی و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۳).

بایزیدی و کاکلی (۱۴۰۰) نشان دادند که برداشت بی‌رویه از آبخوان، منجر به کسری تجمعی ۱۷/۴ میلیون متر مکعبی آب آبخوان شده است.

1. Hamedani et al
2. Han et al
3. Purwanto et al
4. Heydari and Taran
5. Senbeta & Worku
6. Goodarzi et al
7. Rahman et al

قهرودی تالی و همکاران (۱۴۰۲) نشان دادند که افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت دهگلان طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۰ منجر به فرونشست سالانه ۶ سانتی‌متری زمین شده است که پیامدهای جبران‌ناپذیری از جمله تخریب زیرساخت‌ها و کاهش بهره‌وری کشاورزی را به همراه دارد.

فرونشست زمین که ناشی از برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی است، می‌تواند باعث آسیب‌های گسترده‌ای مانند شکست جاده‌ها، تخریب مناطق مسکونی و آسیب به خطوط راه‌آهن و تأسیسات آب و گاز شود. تحقیقات نشان می‌دهند که استخراج بیش از حد از آبخوان‌ها منجر به کاهش سطح آب زیرزمینی، کاهش کیفیت آب و در نهایت آسیب به این منابع ارزشمند می‌گردد (گودزی و همکاران، ۱۴۰۴). در این راستا احداث سدها یکی از راهکارهای مؤثر در مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شود، زیرا امکان ذخیره‌سازی آب در دوره‌های پربارش و تأمین آن در دوره‌های کم‌آبی را فراهم می‌سازد. این فرآیند نه تنها تعادل چرخه هیدرولوژیکی را حفظ می‌کند، بلکه با بهبود بهره‌وری در بخش کشاورزی، از افت بیش‌تر آبخوان‌ها جلوگیری کرده و در صورت مدیریت اصولی، به پایداری محیط‌زیست کمک می‌نماید. سد مخزنی سورال، واقع در سه کیلومتری جنوب غربی روستای سورال در شهرستان دهگلان استان کردستان، با اهداف تأمین آب کشاورزی احداث شده است. این سد با ارتفاع ۴۵ متر و طول تاج ۲۴۰ متر، ظرفیت ذخیره‌سازی تقریبی ۱۱ میلیون مترمکعب آب را داراست؛ به علاوه، اراضی پایاب آن شامل بیش از ۱۲۰۰ هکتار از زمین‌های زراعی مرغوب با کیفیت بالا که به دلیل آلوده نشدن به عناصر کشاورزی اکثر زمین‌ها بکر می‌باشد که با سامانه‌های آبیاری تحت فشار تجهیز شده‌اند. احداث این سد نقشی کلیدی در توسعه کشاورزی منطقه ایفا کرده و با تأمین منابع آب پایدار، زمینه افزایش تولیدات زراعی و بهبود معیشت کشاورزان را فراهم آورده است. همچنین، سد سورال با ایجاد فرصت‌های شغلی در بخش‌های مرتبط با کشاورزی و آبزی‌پروری، به رونق اقتصادی منطقه نیز سهم بسزایی داشته است.

اراضی پایین‌دست سد مخزنی سورال، به‌طور عمده از سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک بهره‌برداری می‌شد. علاوه بر این، در برخی مزارع، سامانه‌های آبیاری سطحی و آبیاری بارانی کلاسیک نیمه‌ثابت نیز به‌کار گرفته شده بود. سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک به‌منظور راندمان بالای آبیاری، در اراضی پایاب سد سورال به‌کار گرفته شده بود به دلیل ارزیابی نکردن و نبود مدیریت صحیح بهره‌وری بالا محقق نشده است. همچنین حدود ۱۵ هکتار از اراضی پایاب سد مذکور از سامانه‌های آبیاری سطحی که بیش‌از به‌عنوان روش اصلی آبیاری در این دشت استفاده می‌شد، آب موردنیاز این اراضی از حقایبه محیط‌زیست سد تأمین می‌گردید. سامانه‌های کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک معمولاً نیاز به انرژی قابل‌توجهی دارند و در این منطقه، نیروی ثقل (شیب) به‌عنوان منبع اصلی انرژی برای انتقال و توزیع آب در داخل مزارع مذکور مورد استفاده قرار گرفته می‌شد. انرژی نقش بسیار مهمی در حوضه کشاورزی و سامانه‌های آبیاری دارد (غلامی و همکاران، ۱۳۹۴). در واقع، توزیع انرژی در سامانه‌های آبیاری، یکی از اجزای اساسی سامانه‌های آبیاری تحت فشار به‌شمار می‌آید. با توجه به محدودیت‌های موجود در منابع انرژی و افزایش مداوم هزینه‌های تولید، ارتقاء بهره‌وری انرژی در بخش کشاورزی به یک نیاز ضروری و اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. برای دستیابی به مدیریت بهینه منابع انرژی، شناخت دقیق الگوهای مصرف انرژی در سامانه‌های آبیاری، اولین گام برای بهبود کارایی و کاهش هدررفت منابع ارزشمند است (طهماسبی و همکاران، ۱۴۰۳). امنیت غذایی و تولید کشاورزی از جمله چالش‌های عمده‌ای هستند که بشریت با آن‌ها مواجه است و به‌طور مستقیم به انرژی وابسته‌اند. برای مواجهه با این چالش‌ها، لازم است راه‌کارهایی جهت کاهش مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری و بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر در بخش کشاورزی ارائه شود. بهره‌وری انرژی در کشاورزی زمانی به حداکثر می‌رسد که سامانه‌های آبیاری مزارع، علاوه بر عملکرد هیدرولیکی مناسب، از مصرف بهینه انرژی نیز برخوردار باشند (سانچز ساتیل و کانو ارتگا، ۲۰۲۱). مطالعات مختلفی در مورد توازن انرژی در سامانه‌های زراعی به انجام رسیده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است.

## ۱. مطالعات داخلی

طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳) با بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک و لوله چرخ‌دار در کشت گندم آبی به ترتیب کل انرژی ورودی و انرژی خروجی ۶۹۱۸۹/۰۴ و ۸۵۹۴۳/۹۷ مگاژول در هکتار، و ۱۱۰۷۰۰ و ۱۵۰۱۰۰ مگاژول در هکتار محاسبه کرده بودند. بر این اساس مقادیر شاخص کارایی انرژی مصرفی در دو سامانه به ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ درصد محاسبه شده بود.

اوجاقلو و همکاران (۱۴۰۲) در بررسی تأثیر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب گیاه یونجه در استان زنجان، میانگین حجم آب مصرفی در مزارع یونجه را حدود ۱۴۲۵۰ مترمکعب در هکتار گزارش کردند. همچنین، میانگین شاخص بهره‌وری مصرف آب معادل ۰/۷۹ کیلوگرم بر مترمکعب، و شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب به ترتیب ۱۶/۱ و ۸/۹ هزار ریال بر مترمکعب به دست آوردند.

عاشوری و همکاران (۱۴۰۲) با ارزیابی میزان مصرف آب و انرژی در مزارع شبکه قزوین دریافتند که در تمامی محدوده‌های زراعی درجه دو، بالاترین سهم مصرف انرژی مستقیم مربوط به سوخت دیزل بوده که ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده بود. در بخش انرژی غیرمستقیم نیز، کود نیتروژن با سهم ۲۰ درصدی، به‌عنوان اصلی‌ترین نهاده انرژی‌بر شناسایی شد.

قدیمی‌فیروزآبادی و اکبری (۱۴۰۲) تأثیر انواع سامانه‌های آبیاری بر میزان مصرف آب و عملکرد محصول گندم را در استان همدان بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داد که میانگین حجم آب مصرفی در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، بارانی و سطحی به ترتیب ۴۱۵۳، ۴۰۹۰ و ۵۹۱۸ مترمکعب در هکتار بوده است. همچنین، میزان عملکرد محصول در سامانه آبیاری قطره‌ای ۵۵۸۱ کیلوگرم در هکتار گزارش شد، درحالی‌که این مقدار برای سامانه‌های آبیاری بارانی و سطحی به ترتیب ۴۳۸۱ و ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار اندازه‌گیری شد.

بهرامی‌بوانی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که در اهواز، مصرف انرژی در سامانه آبیاری تحت فشار بیش‌تر از سطحی است، اما با مدیریت صحیح، مصرف آب ۶۷ درصد کاهش می‌یابد. بهره‌وری انرژی در سامانه تحت فشار کمی پایین‌تر از آبیاری سطحی است.

## ۲. مطالعات خارجی

قاسمی‌مبتکر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۲) در پژوهشی به ارزیابی شاخص‌های مصرف انرژی و آب در تولید علوفه هیدروپونیک در منطقه مرکزی ایران (اصفهان) پرداختند. این مطالعه که بر اساس پرسش‌نامه‌های شفاهی انجام شد، نشان داد که کل انرژی مصرفی برای تولید یک تن علوفه هیدروپونیک برابر با ۵۰۶۰/۴۰ مگاژول بوده است. همچنین، نسبت بهره‌وری انرژی و نسبت انرژی به ترتیب ۰/۲۰ و ۰/۳۳ کیلوگرم در مگاژول برآورد کردند.

باتوجه به اهمیت مصرف آب و انرژی در کشاورزی و سهم بالای آن‌ها در تولید محصولات زراعی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از سامانه‌های آبیاری تحت فشار، از جمله سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک، در این سال‌ها رایج شده است. بااین‌حال، در ارتباط با روند مصرف انرژی در این سامانه‌ها مطالعات کافی وجود ندارد؛ بنابراین، هدف این مطالعه بررسی روند مصرف انرژی و شاخص‌های انرژی در تولید محصولات گندم و یونجه با استفاده از سامانه آبیاری بارانی کلاسیک و مقایسه آن با سامانه آبیاری سطحی بود.

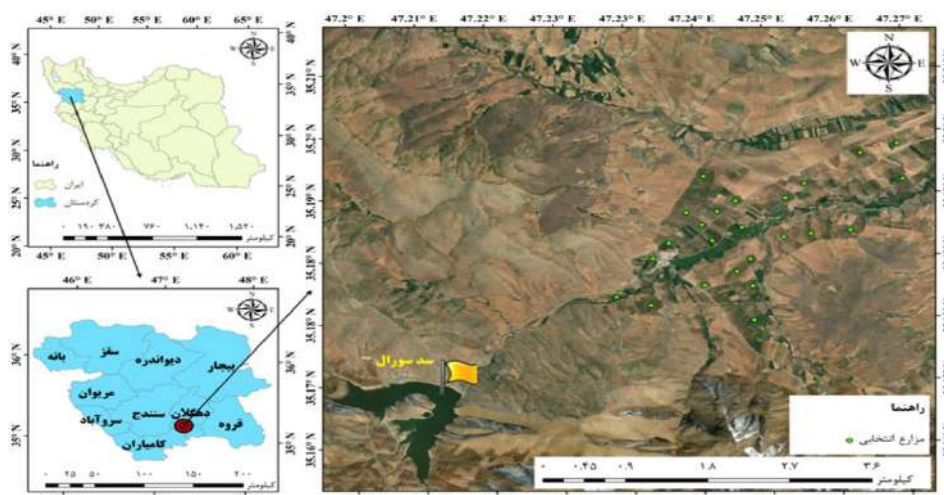
## روش پژوهش

### ۱. ویژگی‌های مکانی و جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی سوزال و زمین‌های پایاب آن به‌عنوان یکی از مناطق استراتژیک کشاورزی مکانیزه در غرب ایران، نقش مهمی در اقتصاد و کشاورزی استان کردستان ایفا می‌کنند. این منطقه در فاصله ۳ کیلومتری جنوب غربی روستای سوزال و ۲۶ کیلومتری شرق شهرستان دهگلان قرار دارد و با مختصات جغرافیایی بین ۳۵/۱۷ تا ۳۵/۲۰ درجه شمالی و ۴۷/۲۲ تا ۴۷/۲۸ درجه شرقی مشخص شده است. ارتفاع این ناحیه از سطح دریا ۱۸۹۰ متر است و میانگین بارندگی سالانه آن در بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۰ بین ۴۵۵ تا ۶۰۰ میلی‌متر متغیر بوده است. مساحت اراضی زیر کشت در این منطقه حدود ۱۲۵۰ هکتار است که شامل محصولات عمده‌ای مانند گندم، سیب‌زمینی، یونجه، پیاز و گوجه‌فرنگی می‌شود. نوع سامانه آبیاری مورد استفاده در این اراضی، سامانه‌های آبیاری سطحی و سامانه آبیاری بارانی از نوع کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک است که با استفاده از انرژی نیروی جاذبه (ثقل) نیاز آبی محصولات را تأمین می‌کند. همچنین در دشت مذکور، ۳۷ مزرعه به‌طور تصادفی و پراکنده با مجموع مساحت ۷۹ هکتار انتخاب شدند. این مزارع در چهار گروه بر اساس جدول (۱) دسته‌بندی گردیده‌اند. شکل (۱) نیز موقعیت جغرافیایی سد مخزنی سوزال و مزارع انتخابی را در سطح کشور، به ویژه در استان کردستان، شهرستان دهگلان و مناطق پایین‌دست آن به تصویر می‌کشد.

جدول ۱. نام‌گذاری مزارع مورد مطالعه

| مزارع      |                                                                                               |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| سامانه (۱) | سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع گندم آبی |
| سامانه (۲) | سامانه آبیاری سطحی با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع گندم آبی                                  |
| سامانه (۳) | سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع یونجه    |
| سامانه (۴) | سامانه آبیاری سطحی با منبع تأمین انرژی ثقل در مزارع یونجه                                     |



شکل ۱. موقعیت مزارع، سد مخزنی سوزال، منطقه مورد مطالعه، شهرستان دهگلان، استان کردستان.

## ۲. روش جمع آوری داده‌ها و ثبت اطلاعات

برای این تحقیق، اطلاعات لازم شامل جزئیات مربوط به عملیات زراعی، نوع و مقدار نهاده‌های مصرفی و عملکرد محصولات گندم آبی (گونه پیشگام) و یونجه، از طریق مراجعه مستقیم به کشاورزان منطقه و تکمیل پرسش‌نامه‌ها به صورت حضوری در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ گردآوری شد. برای تأیید صحت داده‌ها، اطلاعات به دست آمده با آمار و داده‌های موجود در سازمان جهاد کشاورزی استان کردستان و همچنین مشورت با کارشناسان و متخصصان کشت گندم و یونجه در منطقه بررسی و تأیید گردید. تجربیات کشاورزان نیز با داده‌های کارشناسان مقایسه شد تا از دقت اطلاعات اطمینان حاصل شود. پس از جمع‌آوری داده‌ها، میانگین‌گیری برای هر پارامتر انجام شد تا نتایج دقیق‌تری به دست آید. یکی از بخش‌های مهم این تحقیق، استفاده از ضرایب هم‌ارزی انرژی بود که برای مقایسه منابع مختلف انرژی، از جمله سوخت، بذر و سایر نهاده‌ها به کار رفت. این ضرایب به ما کمک کردند تا تمام انرژی‌ها را به یک واحد معادل تبدیل کنیم و در نتیجه، مقایسه‌ای دقیق و جامع بین مصرف انرژی برای تولید محصولات گندم و یونجه و دیگر نهاده‌ها انجام دهیم. در مرحله بعد، داده‌های مربوط به انرژی ورودی و خروجی برای تولید این محصولات تجزیه و تحلیل شدند تا میزان انرژی مصرفی و الگوهای مصرف آن بهتر درک شود. در این مزارع، گندم آبی و یونجه به عنوان محصولات کشت شده مورد استفاده قرار گرفتند. لازم به ذکر است که محصول یونجه به مدت سه سال کشت و بهره‌برداری می‌گردید؛ بنابراین به همین دلیل، از محاسبه بذر مصرفی در نهاده‌های ورودی صرف نظر گردید.

جدول ۲. هم‌ارزی انرژی برای نهاده‌های ورودی و خروجی محصول گندم و یونجه (کیتانی، ۱۹۹۹)

| انرژی نهاده یا ستانده | واحد         | معادل انرژی (مگاژول در واحد) |
|-----------------------|--------------|------------------------------|
| انرژی نهاده ورودی     |              |                              |
| نیروی انسانی          | ساعت         | ۱/۹۶                         |
| تراکتور               | ساعت         | ۱۳۸                          |
| ماشین‌ها              | ساعت         | ۶۲/۷۰                        |
| کمپاین                | ساعت         | ۱۱۶                          |
| سوخت گازوئیل          | لیتر         | ۵۶/۳۱                        |
| نیتروژن               | کیلوگرم      | ۶۶/۱۴                        |
| فسفات                 | کیلوگرم      | ۱۲/۴۴                        |
| کود حیوانی            | کیلوگرم      | ۰/۳۰                         |
| آفت کش                | کیلوگرم      | ۱۲۰                          |
| آب آبیاری             | مترمکعب      | ۱/۰۲                         |
| الکتریسیته مصرفی      | کیلووات ساعت | ۱۱/۹۳                        |
| بذر گندم آبی          | کیلوگرم      | ۱۴/۷۰                        |
| بذر یونجه             | کیلوگرم      | ۲۸/۱۰                        |
| انرژی نهاده خروجی     |              |                              |
| دانه گندم آبی         | کیلوگرم      | ۱۴/۷۰                        |
| کاه و کلش             | کیلوگرم      | ۱۲/۵۰                        |
| یونجه با رطوبت ۱۵٪    | کیلوگرم      | ۳/۶۰                         |

## ۳. نهاده‌های مصرفی (ورودی) و تولیدی (خروجی)

مصرف نیروی انسانی در فرآیندهای مختلف کشاورزی، شامل شخم‌زنی، تسطیح زمین، مرزبندی، دیسک‌زنی، آبیاری، کاشت بذر، کودپاشی، سم‌پاشی، برداشت محصول و حمل و نقل، از طریق ثبت دقیق ساعات کاری کارگران و رانندگان تراکتور و ماشین‌ها تعیین گردید. به منظور محاسبه میزان انرژی مصرفی ناشی از این فعالیت‌ها، ساعات کاری ثبت شده با استفاده از ضریب استاندارد ۱/۹۶ مگاژول به ازای هر ساعت کار، به انرژی معادل تبدیل شد. انواع ادوات و ماشین‌آلات کشاورزی به عنوان یکی از عوامل



کلیدی در ارزیابی مصرف انرژی نقش اساسی داشتند. در این پژوهش، مدت زمان فعالیت انواع ماشین‌آلات و ادوات کشاورزی، از مرحله کاشت تا برداشت و حمل و نقل، به‌دقت ثبت شد تا تأثیر آن‌ها بر کل مصرف انرژی در فرآیندهای زراعی به‌طور جامع تحلیل گردد. مقدار سوخت مصرفی (گازوئیل) در هر یک از ماشین‌آلات کشاورزی، شامل عملیات شخم‌زنی، آبیاری، کوددهی، سم‌پاشی، برداشت و حمل و نقل محصولات گندم تا سیلو و یونجه به خرمن و انبار، به‌دقت اندازه‌گیری شد. سپس، با استفاده از ضرایب معادل انرژی سوخت، مقادیر به واحد مگاژول در هکتار تبدیل گردید. محاسبه دقیق این شاخص‌ها نقش مهمی در تحلیل کارایی انرژی و بررسی الگوی مصرف منابع در سامانه‌های کشاورزی ایفا می‌کند. کودهای شیمیایی، به‌ویژه نیتروژن و فسفر، که از عوامل اصلی در کشاورزی مدرن به‌شمار می‌روند، در این پژوهش مورد ارزیابی قرار گرفتند و میزان مصرف آن‌ها در مزارع محاسبه گردید. این کودها با فراهم آوردن مواد مغذی ضروری برای گیاهان، تأثیر چشمگیری بر رشد و عملکرد محصولات کشاورزی دارند. علاوه بر این، در تمامی مزارع گندم از کود دامی استفاده شده بود که مقدار مصرف آن نیز به‌دقت ثبت و در نهایت، برای محاسبه انرژی مصرفی این نهاده‌ها، از ضرایب معادل‌سازی انرژی به مگاژول در هکتار استفاده شد. سموم شیمیایی برای کنترل آفات و بیماری‌ها در فرآیندهای کشاورزی به‌طور جامع مورد تحلیل قرار گرفت. این ترکیبات شیمیایی که به‌عنوان نهاده‌های ضروری در نظر گرفته می‌شوند، در انجام فعالیت‌های متنوع کشاورزی مانند مقابله با آفات و بیماری‌ها در دوران رشد گیاهان تأثیر قابل‌توجهی دارند و به‌طور مستقیم بر بهره‌وری و کیفیت محصول اثر می‌گذارند. یکی از نهاده‌های اصلی که در این مطالعه به‌طور دقیق محاسبه شد، آب مصرفی برای آبیاری مزارع بود. آب موردنیاز در دشت پایاب سورال از سد سورال تأمین می‌شود و با دبی ۱ لیتر در ثانیه برای هر هکتار اختصاص داده شده است. این آب به‌منظور تأمین نیاز آبی شبکه آبیاری بارانی در این مزارع استفاده می‌شود. برای ایجاد فشار مناسب در شبکه آبیاری، از نیروی ثقل بهره‌برداری شده و به‌این‌ترتیب، هیچ‌گونه نیروی الکتریکی در مزارع مورد مطالعه قرار نگرفته است. علاوه بر آن، میزان بذر مصرفی برای هر محصول نیز به‌دقت در هر هکتار محاسبه گردید و برای تعیین میزان انرژی مصرفی، از ضریب تبدیل خاص استفاده شده و مقدار انرژی بذر به مگاژول در هکتار محاسبه شد. در نهایت، عملکرد دانه‌های گندم آبی، کاه و کلش و یونجه، در واحد هکتار، ثبت و به‌عنوان نهاده‌های خروجی برای آنالیز شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفت.

#### ۴. سنجه‌های ارزیابی انرژی

باتوجه به معادل‌سازی انرژی نهاده‌های مصرفی و تولیدی، شاخص‌های انرژی محاسبه گردید. این شاخص‌ها به‌منظور مقایسه کارایی سامانه‌های مورد مطالعه قرار گرفتند. محاسبات مربوط به این شاخص‌ها با استفاده از روابط ۱ تا ۴ صورت گرفت. (کعب و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۴) تمامی داده‌های ثبت‌شده در طول فرآیند زراعی به‌طور گسترده در نرم‌افزار Excel وارد و محاسبات لازم از طریق آن انجام شد. علاوه بر این، سهم هر یک از انواع انرژی‌ها شامل انرژی‌های مستقیم (مانند نیروی انسانی، سوخت دیزل، برق و آب آبیاری)، انرژی‌های غیرمستقیم (شامل سایر نهاده‌های ورودی به جز انرژی‌های مستقیم)، انرژی‌های تجدیدپذیر (که شامل نیروی انسانی و بذر می‌شود) و انرژی‌های تجدیدناپذیر (که شامل سایر نهاده‌ها به‌جز انرژی‌های تجدیدپذیر است) محاسبه و ارزیابی گردید.

$$\text{نسبت انرژی} = \frac{\text{مگاژول در هکتار (مقدار انرژی خروجی)}}{\text{مگاژول در هکتار (مقدار انرژی ورودی)}} \quad (۱)$$

$$(2) \quad (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی} - (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی خروجی} = (\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی خالص}$$

$$(3) \quad \text{بهره وری انرژی مصرفی} = \frac{(\text{کیلوگرم در هکتار}) \text{ عملکرد محصول}}{(\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی}}$$

$$(4) \quad \text{انرژی ویژه} = \frac{(\text{مگاژول در هکتار}) \text{ انرژی ورودی}}{(\text{هکتار در کیلوگرم}) \text{ عملکرد محصول}}$$

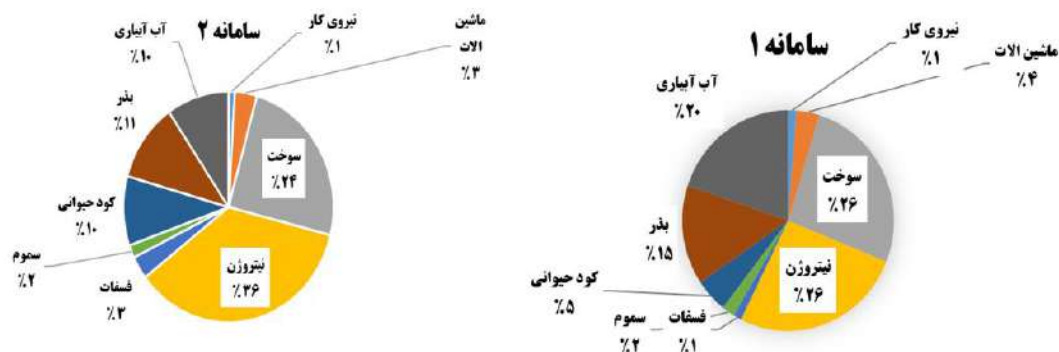
### یافته های پژوهش

#### ۱. ارزیابی و تجزیه و تحلیل انرژی ورودی و خروجی

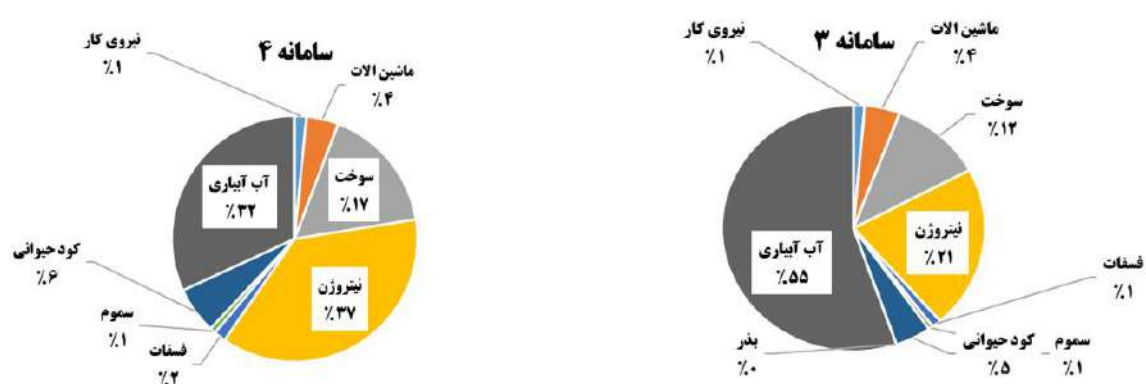
مقدار انرژی نهاده های ورودی (مصرفی) در مزارع انتخابی پایاب سد مخزنی سورال واقع استان کردستان برای تولید محصولات گندم آبی و یونجه در چهار سامانه مذکور در جدول (۳) ارائه شد. همچنین شکل های (۲) و (۳) سهم هر یک از نهاده های مصرفی (ورودی) را برای تولید محصولات موردنظر در هر سامانه را به تفکیک نمایش می دهد.

جدول ۳. میزان مصرف انرژی نهاده های مصرفی برای تولید محصولات گندم آبی و یونجه (مگاژول در هکتار)

| انرژی نهاده ها | گندم آبی |          | یونجه    |          |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
|                | سامانه ۱ | سامانه ۲ | سامانه ۳ | سامانه ۴ |
| ورودی ها       |          |          |          |          |
| نیروی انسانی   | ۳۸۸/۰۸   | ۴۵۳/۷۴   | ۷۵۰/۶۸   | ۶۰۹/۵۶   |
| ماشین آلات     | ۱۰۶۰     | ۱۵۶۸/۱۰  | ۱۵۶۸/۱۰  | ۱۵۶۵۶    |
| سوخت           | ۷۴۶۳/۴۰  | ۱۱۳۷۴/۶۲ | ۶۱۹۴/۱   | ۶۵۳۱/۹۶  |
| کود نیتروژنه   | ۷۹۳۶/۸۰  | ۱۶۵۳۵    | ۱۱۵۷۴/۵۰ | ۱۴۵۵۰/۸۰ |
| کود فسفره      | ۳۷۳/۲۰   | ۱۴۹۲/۸۰  | ۶۲۲      | ۶۲۲      |
| کود حیوانی     | ۱۵۰۰     | ۴۵۰۰     | ۲۴۰۰     | ۲۴۰۰     |
| آفت کش         | ۶۰۰      | ۸۴۰      | ۳۰۰      | ۳۰۰      |
| بذر گندم       | ۴۴۱۰     | ۵۱۴۵     | -        | -        |
| آب آبیاری      | ۶۰۰۱/۶۸  | ۴۴۳۷/۷۹  | ۲۷۸۶۷/۴۲ | ۲۹۹۰۷/۴۲ |
| کل انرژی ورودی | ۲۹۷۳۳/۱۶ | ۴۶۳۴۷/۰۵ | ۵۲۰۵۴/۷۰ | ۳۹۱۴۷/۴۶ |
| خروجی ها       |          |          |          |          |
| دانه گندم آبی  | ۵۱۴۵۰    | ۷۳۵۰۰    | -        | -        |
| کاه و کلش      | ۱۵۰۰۰    | ۲۲۵۰۰    | -        | -        |
| یونجه          | -        | -        | ۱۸۹۶۰۰   | ۲۲۹۱۰۰   |
| کل انرژی خروجی | ۶۶۴۵۰    | ۹۶۰۰۰    | ۱۸۹۶۰۰   | ۲۲۹۱۰۰   |



شکل ۲. سهم هریک از نهاده‌ها مصرفی، در تولید گندم آبی سامانه (۱) و سامانه (۲)



شکل ۳. سهم هریک از نهاده‌ها مصرفی، در تولید یونجه سامانه (۳) و سامانه (۴)

متوسط انرژی مصرفی کل و یا به عبارتی متوسط انرژی کل ورودی به مزارع دو سامانه (۱) و (۲)، به ترتیب  $29733/16$  و  $46347/05$  مگاژول در هکتار محاسبه شد. که تقریباً سامانه (۲)،  $1/5$  برابر بیش‌تر از سامانه (۱) انرژی مصرفی داشت. تفاوت اساسی در میزان مصرف انرژی بین دو سامانه مورد بررسی محصول گندم آبی، عمدتاً به دلیل افزایش تقاضا برای نیروی کارگری، مصرف کودهای شیمیایی و مصرف سوخت بالاتر ماشین‌آلات کشاورزی در سامانه (۲) بازمی‌گردد. در مراحل ابتدایی تجهیز مزارع به سامانه آبیاری بارانی، به دلیل نبود مدیریت بهینه، عدم تجربه کافی کشاورزان و بهره‌برداران، و همچنین خرابی‌های مکرر و شکستگی تجهیزات سامانه‌های موجود در قطعه‌های زراعی پایاب سد سورال، نیاز به نیروی انسانی برای تعمیر، نگهداری و بهره‌برداری از این سامانه‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش یافته بود. علاوه بر این، در سامانه (۲)، به دلیل کاربرد گسترده‌تر تجهیزات کشاورزی و افزایش استفاده از نهاده‌هایی همچون کودهای شیمیایی و دامی، میزان انرژی مصرفی به طرز چشم‌گیری افزایش یافت. زیرا اکثر کشاورزان بر این باور بودند که افزایش مصرف نهاده‌های کودی و انجام عملیات‌های متعدد زراعی، از جمله پخش گسترده کود دامی و استفاده بیش‌تر از آن‌ها، منجر به بهبود عملکرد نهایی محصولات می‌شود. در مقابل، در مزارعی که از سامانه آبیاری سطحی بهره می‌بردند سامانه (۱)، به دلیل راندمان پایین‌تر این روش آبیاری و استفاده محدودتر از نهاده‌های زراعی در مقایسه با سامانه (۲)، میزان مصرف انرژی ورودی کم‌تر گزارش شد. علاوه بر این، نبود انگیزه کافی در میان بهره‌برداران و کشاورزان در مزارع مجهز به سامانه (۱)، ناشی از عدم بازدهی اقتصادی مناسب به دلیل عملکرد پایین محصولات نهایی گندم آبی، سبب کاهش استفاده از نهاده‌های مؤثر بر عملکرد گردید. این عوامل در مجموع موجب تفاوت‌های چشم‌گیر در میزان مصرف انرژی نهاده‌های مصرفی و بهره‌وری زراعی بین دو سامانه مورد بررسی در سال زراعی  $1399-1400$  شدند. طبق اطلاعات ارائه‌شده در شکل ۲، بیش‌ترین میزان مصرف انرژی در سامانه (۱) به‌ترتیب مربوط به سوخت (گازوئیل مصرفی ماشین‌آلات) و کودهای

شیمیایی با ۲۶/۶۹ درصد (معادل ۷۹۳۶/۸۰ مگاژول در هکتار)، و سپس آب آبیاری با ۲۰/۱۸ درصد (معادل ۶۰۰۱/۶۷ مگاژول در هکتار) بوده است. بذر مصرفی نیز با ۱۴/۸۳ درصد (معادل ۴۴۱۰ مگاژول در هکتار) و کود دامی با ۵/۰۴ درصد (معادل ۱۵۰۰ مگاژول در هکتار) در رتبه های بعدی قرار داشتند. علاوه بر این، مصرف انرژی ماشین آلات با ۳/۵۶ درصد (معادل ۱۰۶۰ مگاژول در هکتار) و نیروی کارگری با ۱/۳۰ درصد (معادل ۳۸۸/۰۸ مگاژول در هکتار) کمترین میزان انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده بودند. در مقابل سامانه (۲)، بیشترین سهم مصرف انرژی به نیز هم مانند سامانه (۱) کودهای شیمیایی تعلق داشت که معادل ۳۸/۸۸ درصد (معادل ۱۸۰۲۷/۲۷ مگاژول در هکتار) از کل انرژی مصرفی را به خود اختصاص داد. پس از آن، مصرف سوخت ماشین آلات با ۲۴/۵۵ درصد (معادل ۱۱۳۷۴/۷۴ مگاژول در هکتار) و بذر مصرفی با ۱۱/۱۰ درصد (معادل ۵۱۴۵/۴۵ مگاژول در هکتار) قرار داشت. همچنین، مصرف کود حیوانی ۹/۷۰ درصد (معادل ۴۵۰۰ مگاژول در هکتار) و آب آبیاری ۹/۵۷ درصد (معادل ۴۴۳۷/۳۷ مگاژول در هکتار) سهم بعدی را داشتند. مشابه با سامانه (۱)، انرژی مصرفی ماشین آلات با ۳/۳۸ درصد (معادل ۱۵۶۸/۶۸ مگاژول در هکتار) و نیروی کارگری با ۰/۹۷ درصد (معادل ۴۵۳/۷۴ مگاژول در هکتار) کمترین سهم انرژی مصرفی را در طول فصل زراعی داشتند. همچنین، در میان کودهای شیمیایی مصرفی، کود نیتروژن بیشترین میزان انرژی مصرفی را در هر دو سامانه (۱ و ۲) به خود اختصاص داده بود.

متوسط انرژی مصرفی دو سامانه (۳) و (۴)، در محصول یونجه به ترتیب ۵۲۰۵۴/۷۰ و ۳۹۱۴۷/۴۸ مگاژول در هکتار بود. به طوری که سامانه (۳)، ۱/۳۳ برابر بیش تر از سامانه (۴) انرژی مصرفی داشت. از دلایل اصلی تفاوت در مصرف انرژی ورودی بین دو سامانه مذکور، به میزان مصرف آب آبیاری و کودهای شیمیایی مربوط می شد. علاوه بر این، ممکن است یکی از دلایل دیگر این تفاوت، این باشد که کشاورزان برای جبران کاستی ها ناشی از عدم مدیریت صحیح و عملکرد نامناسب سامانه آبیاری سطحی، اقدام به افزایش مصرف نهاده های کشاورزی در سامانه (۳) کرده باشند. در سامانه های آبیاری سطحی، به دلیل طراحی و عملکرد خاص این سامانه ها، توزیع آب در سطح مزرعه ممکن است یکنواخت نباشد و برخی از نقاط گیاهان آب بیشتری نسبت به سایر نقاط سطح کشت دریافت کنند. این نابرابری در توزیع آب می تواند منجر به هدررفت آب و افزایش مصرف این نهاده شود. علاوه بر این، در آبیاری سطحی، به دلیل پایین بودن راندمان کاربرد آبیاری، مقدار زیادی آب هدر می رود. این اتلاف آب عمدتاً به دلیل نفوذ عمیق آب در خاک، نشت آب از کانال های آب و متناسب نبودن ابعاد و شکل مزارع با مقدار آب و نحوه آبیاری است که مقدار زیادی آب هدر می رود که در مزارع مذکور این عوامل کاملاً مشهود بود (جلیلی و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۳، بیشترین میزان مصرف انرژی در سامانه (۳) به ترتیب به آب مصرفی (آب آبیاری) اختصاص دارد که معادل ۵۵/۲۸ درصد (۲۹۹۰۷/۴۲ مگاژول در هکتار) از کل انرژی مصرفی را شامل می شود. پس از آن، کودهای شیمیایی با ۲۲/۵۴ درصد (۱۲۱۹۶/۵۰ مگاژول در هکتار) و سوخت گازوئیل با ۱۱/۴۵ درصد (۶۱۹۴/۱۰ مگاژول در هکتار) قرار دارند. سایر نهاده ها شامل کود حیوانی با ۴/۴۳ درصد (۲۴۰۰ مگاژول در هکتار)، ماشین آلات با ۴/۳۳ درصد (۲۳۴۶ مگاژول در هکتار)، نیروی انسانی با ۱/۳۸ درصد (۷۵۰/۶۸ مگاژول در هکتار) و در نهایت سموم شیمیایی با ۰/۵۴ درصد (۳۰۰ مگاژول در هکتار) هستند که به ترتیب سهم کمتری از مصرف انرژی ورودی را به خود اختصاص داده اند. در سامانه (۴)، بیشترین سهم از مصرف انرژی ورودی به کودهای شیمیایی اختصاص داشت که معادل ۳۸/۷۵ درصد (۱۵۱۷۲/۸۰ مگاژول در هکتار) از کل انرژی مصرفی را شامل می شود. پس از آن، مصرف آب آبیاری با ۳۱/۸۷ درصد (معادل ۱۲۴۷۷/۱۵ مگاژول در هکتار) و سوخت گازوئیل با ۱۶/۶۸ درصد (معادل ۶۵۳۱/۹۶ مگاژول در هکتار) قرار دارند. سایر نهاده ها شامل کود حیوانی با ۶/۱۳ درصد (معادل ۲۴۰۰ مگاژول در هکتار)، ماشین آلات با ۴/۲۳ درصد (معادل ۱۶۵۶ مگاژول در هکتار)، نیروی انسانی با ۱/۵۵ درصد (معادل ۶۰۹/۵۶ مگاژول در هکتار) و در نهایت سموم شیمیایی با ۰/۷۶ درصد (معادل ۳۰۰ مگاژول در هکتار) بودند که کمترین سهم از مصرف انرژی ورودی در تولید محصول یونجه در مزارع پایاب سد را به خود اختصاص دادند. در مزارع سامانه (۳) که از آبیاری سطحی استفاده می شود، آب آبیاری بیشترین سهم از مصرف انرژی را به خود اختصاص داد. این امر به دلیل دسترسی کشاورزان به منابع آب زیاد از پایاب سد است، زیرا این مزارع از مقدار آبی که به محیط زیست اختصاص داده شده بود استفاده می کرد. همچنین به دلیل تراکم بالای گیاه یونجه، آب به کندی در سطح مزرعه حرکت کرده و مدت زمان رسیدن آب به انتهای مزرعه (زمان آبیاری) افزایش یافته بود. این موضوع موجب

افزایش زمان آبیاری و در نتیجه افزایش حجم آب عبوری به واحد سطح مزرعه می‌شود. همچنین، به دلیل کمبود دانش کشاورزان، کود شیمیایی به‌طور سطحی پخش شده و با حرکت آب، کود به انتهای مزرعه منتقل می‌شود و به این علت که از تجمع آن در مناطق خاص جلوگیری شود کود شیمیایی کم‌تر به نسبت مزارع (۴) در مزرعه مصرف می‌شد. در مقابل، در سامانه (۴) که از آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک استفاده می‌شود، بیش‌ترین سهم مصرف انرژی ورودی مربوط به کودهای شیمیایی است. زیرا در این روش، تلفات ناشی از نفوذ عمقی آب کم‌تر از سامانه‌های آبیاری سطحی است. این امر به دلیل راندمان بالاتر سامانه‌های آبیاری بارانی است که آب را به‌طور یکنواخت در مزرعه توزیع می‌کنند همچنین چون آب در لابه‌لای گیاه حرکت نکرده و تراکم گیاه هیچ تاثیری در حرکت آب در داخل مزرعه نداشت در نتیجه زمان آبیاری کم‌تر و در نتیجه حجم آب آبیاری کم‌تر بود. در این سامانه‌ها، به دلیل توزیع بهینه آب، کشاورزان قادر به استفاده بیش‌تر از کود شیمیایی برای افزایش عملکرد محصول هستند، که منجر به مصرف بالاتر انرژی برای این نهاده در سامانه (۴) می‌شود. میزان مصرف نهاده‌های مربوط به مراحل مختلف کاشت، داشت و برداشت در طول یک فصل آبی تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع محصول، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، طول دوره رشد، شرایط اقلیمی، نوع سامانه آبیاری، موقعیت و نوع منبع آب و همچنین منبع تأمین انرژی قرار دارد. طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳)، مجموع انرژی ورودی برای هر هکتار از مزارع گندم آبی در دشت‌های دهگلان را  $69189/04$  مگاژول برآورد کردند. تقی‌نژاد و واحدی (۱۴۰۰)، مجموع انرژی خروجی گندم آبی در استان اردبیل  $65016/07$  مگاژول در هکتار به دست آوردند. میزان انرژی مصرفی برای تولید گندم آبی و یونجه در مناطق و شرایط مختلف و اقلیم متفاوت است به‌طوری‌که در شرایط منطقه‌ای مشهد در حدود  $45367/63$  مگاژول در هکتار (قربانی و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱)، در سیستان و بلوچستان بدون احتساب الکتریسیته مصرفی  $32492/97$  مگاژول در هکتار (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۲)، در استان اردبیل حدودا  $38755/34$  مگاژول در هکتار (تقی‌نژاد و واحدی، ۱۴۰۰)، در ایالات ماماریای ترکیه  $20635/50$  مگاژول در هکتار (تیپی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹) و در استان همدان (قاسمی-مبتکر، ۱۳۹۸) بدون احتساب آب مصرفی  $47591/52$  مگاژول در هکتار گزارش شده بودند. در این مطالعه، تفاوت‌های مشاهده شده عمدتاً به مدیریت کشاورزی و نحوه استفاده از نهاده‌ها توسط کشاورزان مرتبط است. اگرچه میزان انرژی ورودی کم‌تر از تفاوت در بهره‌وری و کارایی انرژی تأثیرگذار است، اما شناسایی نهاده‌های مصرفی انرژی و تعیین سهم هر کدام در تولید محصول از اهمیت بالایی برخوردار است. به عبارت دیگر، نحوه مدیریت و استفاده از نهاده‌ها توسط کشاورزان، نقش مهم‌تری در تفاوت‌های مشاهده شده نسبت به میزان انرژی ورودی دارد. با این وجود، برای بهینه‌سازی تولید، شناسایی و تحلیل سهم هر یک از نهاده‌های مصرفی انرژی ضروری است. برای مثال، برخلاف نتایج این مطالعه که آب مصرفی و کودهای شیمیایی به‌عنوان پرمصرف‌ترین نهاده‌ها معرفی شدند، در شرایط منطقه‌ای نتایج متفاوتی گزارش شده است. در مشهد، مواد شیمیایی بیش‌ترین سهم از مصرف انرژی را داشتند (قربانی و همکاران، ۲۰۱۱) در استان‌های همدان و گرگان، سوخت‌های فسیلی غالب بودند (قاسمی‌مبتکر، ۱۳۹۸)، و در سیستان و بلوچستان، مصرف کودهای شیمیایی بیش‌ترین میزان انرژی مصرفی را به خود اختصاص داد (ضیائی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، در پژوهش‌هایی مانند تحقیق (تقی‌نژاد و واحدی، ۱۴۰۰)، مشخص شد که در تولید گندم آبی، الکتریسیته بیش‌ترین سهم از انرژی ورودی را داشت همچنین، در استان اصفهان  $55/62$  درصد و در استان خراسان رضوی  $50/37$  درصد از کل انرژی ورودی مربوط به این منبع بود. (بهرامی‌بوانی و همکاران، ۱۳۹۳) نشان داد که بیش‌ترین مصرف انرژی در عملیات آبیاری بوده و در سامانه آبیاری تحت‌فشار مصرف انرژی بیش‌تر از آبیاری سطحی است. مجموع انرژی خروجی، که بیان‌گر انرژی معادل در دو نظام زراعی مختلف است، در کشت گندم آبی با در نظر گرفتن عملکرد دانه گندم و بقایای گیاهی (کاه و کلش) و یونجه در مزارعی که از سامانه آبیاری سطحی استفاده کرده بودند، برای سامانه‌های (۱) و (۳) به‌ترتیب برابر با  $66450$  و  $189600$  مگاژول در هکتار برآورد شد. در مقابل، در مزارع مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک، مقدار انرژی خروجی برای سامانه‌های (۲) و (۴) به‌ترتیب  $96000$  و  $229100$  مگاژول در هکتار گزارش شده بود که در جدول (۳) نتایج ارائه

شده است. عملکرد کل (انرژی خروجی) در محصول یونجه بیش تر از گندم بود. افزایش انرژی خروجی در این محصول به ویژگی های بوم شناسی و فرآیند تولید گیاه زراعی یونجه بستگی دارد.

## ۲. مقایسه روابط بین انرژی های ورودی و خروجی سامانه های آبیاری مزارع یونجه و گندم آبی

بررسی داده های جدول (۴) نشان دهنده تفاوت های معناداری در شاخص های بهره وری انرژی، انرژی ویژه، نسبت انرژی، و انرژی خالص بین مزارع گندم و یونجه است. نسبت انرژی (کارایی انرژی) که نشان دهنده بازده انرژی خروجی به ورودی است، در مزارع گندم به ترتیب در سامانه های (۱) و (۲)، ۲/۲۳ و ۲/۰۷ محاسبه گردید که به طور قابل توجهی پایین تر از مزارع یونجه سامانه (۳) ۶/۶۷ و سامانه (۴)، ۵/۸۵، بود. همچنین این امر نشان دهنده کارایی کمتر گندم آبی در تبدیل انرژی ورودی به محصول می باشد. این مشاهدات نشان می دهد که محصول های گندم آبی و یونجه کارایی متفاوتی بسته به عملکرد سامانه های آبیاری داشتند. نسبت انرژی یا کارایی انرژی یعنی چه مقدار انرژی ورودی به یک سامانه به انرژی خروجی مفید (عملکرد نهایی)، تبدیل می شود و به عواملی همچون نوع محصول (گندم و یونجه دارای نیازهای رشدی و فیزیولوژیکی متفاوتی هستند؛ یونجه به عنوان یک گیاه چندساله و علوفه ای، ممکن است سازگاری بیشتری با شرایط محیطی داشته باشد و از نظر فیزیولوژیکی کارآمدتر باشد)، مدیریت بهره برداران مزرعه (روش های مختلف مدیریت مزرعه، مانند زمان بندی آبیاری، نوع کود مصرفی و مبارزه با آفات و بیماری ها، می تواند بر کارایی انرژی تأثیرگذار باشد)، شرایط آب و هوایی (شرایط آب و هوایی مختلف می تواند بر رشد گیاهان و مصرف انرژی تأثیر بگذارد) و نوع سامانه آبیاری (تفاوت در سامانه های آبیاری (۱، ۲، ۳ و ۴) می تواند بر میزان مصرف آب، کود و سایر نهاده ها و در نتیجه بر بهره وری انرژی تأثیر بگذارد) بستگی دارد. در مزارع گندم آبی، نسبت انرژی در سامانه (۲) کمتر از سامانه (۱) و در مزارع یونجه، کارایی سامانه (۴) کمتر از سامانه (۳) گزارش شد. به طور کلی، در مزارع گندم آبی که از سامانه آبیاری سطحی استفاده می کردند، کارایی انرژی بالاتری داشت. این تفاوت ممکن است به دلیل استفاده از آب تخصیص یافته به مزارع پایاب سد در سامانه های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک باشد. در این سامانه ها، به علت دیرکرد در رهاسازی آب در شبکه آبیاری، منجر به بروز تنش های آبی در مزارع می گردید. همچنین در بسیاری از موارد، به دلیل نقص در تجهیزات آبیاری در شبکه پایاب سد سورال، فرآیند آبیاری دچار اختلال شده و به موقع آب به مزارع نمی رسد. از این رو، یکی از مشکلات عمده در بهره برداری از منابع آبی سد، مدیریت ناکافی زمان بندی توزیع آب به کشاورزان است. در حالی که در مزارع آبیاری سطحی، از آب تخصیص یافته به محیط زیست استفاده می کردند در نتیجه به طور مستمر آب به اندازه و به موقع در دسترس کشاورزان قرار داشت و هیچ گونه کمبود آبی در آن مزارع احساس نشد. از طرف دیگر در مزارع یونجه به موجب حجم آب مصرفی بالاتر سامانه (۳) (مزارع مجهز به سامانه آبیاری سطحی) کارایی انرژی پائین تری نسبت به سامانه (۴)، (مزارع مجهز به سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک) محاسبه شد. طهماسبی و همکاران (۱۴۰۳)، کارایی مصرف انرژی برای محصول گندم آبی در دشت دهگلان، در سامانه های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش های متحرک و لوله چرخ دار را به ترتیب ۱/۶۰ و ۱/۷۵ گزارش کردند. حبیبی و همکاران (۱۴۰۲)، کارایی مصرف انرژی در دشت های استان ساری و شرف آباد برای محصول یونجه را به ترتیب ۱/۹۹ و ۲/۹۹ گزارش کردند.

میزان بهره وری انرژی در گندم آبی در سامانه (۱) و (۲)، به ترتیب برابر ۰/۱۲ و ۰/۱۰ کیلوگرم در مگاژول و برای یونجه در سامانه های (۳) و (۴)، به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۳۷ کیلوگرم در مگاژول به دست آمد که نتایج در جدول (۴) ارائه شده است. این بدان معنی است که به ازای هر واحد مصرف انرژی در مزارع چند کیلوگرم محصول تولید می شود. در زمینه تولید گیاه، بهره وری انرژی شاخص مناسب تری برای مقایسه است. در حالی که کارایی انرژی به میزان انرژی مصرفی برای انجام یک کار خاص اشاره دارد، بهره وری انرژی به میزان تولید یا خروجی در ازای هر واحد انرژی مصرفی می پردازد. از آنجا که کارایی انرژی می تواند تحت تأثیر عوامل گوناگونی از جمله میزان انرژی ورودی و عملکرد سامانه قرار گیرد، مقایسه صرفاً بر اساس آن ممکن است اندکی گمراه کننده باشد. بهره وری انرژی با محاسبه نسبت عملکرد تولیدی (بر حسب کیلوگرم) به انرژی مصرفی، تصویر دقیق تری از تفاوت ها را ارائه می دهد و نشان می دهد که هر سامانه تا چه اندازه در تبدیل انرژی به محصول نهایی کارآمد است. در بررسی مزارع گندم،

علی‌رغم عملکرد بالاتر سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک (سامانه (۲)) نسبت به سامانه آبیاری سطحی (سامانه (۱))، بهره‌وری انرژی در سامانه (۱) به‌طور قابل توجهی بیش‌تر بود. این تناقض ناشی از اختلاف در مصرف نهاده‌های کشاورزی، به‌ویژه کودهای شیمیایی است. سامانه (۱) با وجود مصرف آب بیش‌تر (۵۸۸۴ مترمکعب در هکتار در مقابل ۴۳۵۰/۷۸ مترمکعب در هکتار در سامانه (۲))، به دلیل مصرف کم‌تر سایر نهاده‌های انرژی‌بر، در مجموع انرژی ورودی کم‌تری داشت. این امر منجر به افزایش بهره‌وری انرژی در سامانه (۱) شد. به عبارت دیگر، تجهیز کردن مزارع به سامانه آبیاری بارانی (سامانه (۲))، که منجر به افزایش راندمان آبیاری می‌شود، تنها در صورتی توجیه‌پذیر است که با افزایش قابل توجه عملکرد محصول همراه باشد. در غیر این صورت، عدم مدیریت صحیح مزرعه و مصرف بی‌رویه نهاده‌ها در سامانه آبیاری بارانی، منجر به کاهش بهره‌وری انرژی خواهد شد. در مزارع یونجه، سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش‌های متحرک (سامانه (۴)) در مقایسه با سامانه آبیاری سطحی (سامانه (۳))، بهره‌وری انرژی بالاتری را نشان داد. با وجود تفاوت در مصرف سایر نهاده‌های ورودی، مصرف آب در سامانه (۳) بیش‌از دو برابر (تقریباً ۲/۴ برابر) سامانه (۴) شد. این حجم بالای مصرف آب، عامل اصلی کاهش بهره‌وری انرژی در سامانه (۳) نسبت به سامانه (۴) بود. قاسمی‌میتکر و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه ارزیابی شاخص‌های مصرف انرژی برای تولید علوفه هیدروپونیک در منطقه مرکزی ایران (اصفهان) با استفاده از پرسشنامه‌های شفاهی پرداختند. نتایج نشان داد نسبت بهره‌وری انرژی و نسبت انرژی به‌ترتیب ۰/۲۰ و ۰/۳۳ کیلوگرم در مگاژول بود. خرمیان و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی تاثیر روش آبیاری بارانی (قرقره‌ای) بر بهره‌وری آب گیاه یونجه در استان خوزستان به این نتیجه رسیدند که بهره‌وری آب در این روش بین ۲/۱۱ تا ۰/۴۹ کیلوگرم علوفه خشک در هر مترمکعب آب متغیر بود.

مقدار انرژی ویژه در تولید گندم آبی به ترتیب در سامانه‌های ۱ و ۲، ۶/۳۲ و ۶/۸۱ مگاژول در در کیلوگرم و برای یونجه به‌ترتیب در سامانه‌های (۳) و (۴)، به‌ترتیب ۳/۲۷ و ۲/۶۹ مگاژول در کیلوگرم به دست آمد. در مقایسه عملکرد انرژی بین گندم آبی و یونجه در منطقه پایاب سد مخزنی سورال، باتوجه‌به شاخص انرژی ویژه (که عکس بهره‌وری انرژی است و مقادیر کم‌تر آن نشان‌دهنده مصرف انرژی کم‌تر به ازای واحد عملکرد تولیدی است)، یونجه برتری نسبی را نشان می‌دهد. با صرف نظر از بذر مصرفی یونجه و تمرکز بر سیر انرژی مصرفی، و بدون در نظر گرفتن عوامل اقتصادی و اجتماعی با در نظر گرفتن سیاست‌های کلان تولید، می‌توان نتیجه گرفت که از منظر انرژی مصرفی، تولید یونجه کارآمدتر از گندم بود. به عبارت دیگر، یونجه در مقایسه با گندم آبی، با مصرف انرژی کم‌تری به تولید واحد عملکرد می‌رسد.

انرژی خالص تولیدی در مزارع گندم آبی در سامانه‌های (۱) و (۲) به ترتیب ۳۶۷۱۶/۸۴ و ۴۹۶۵۲/۹۴ مگاژول در هکتار و در مزارع یونجه در سامانه‌های (۳) و (۴)، ۱۳۷۵۴۵/۳۰ و ۱۸۹۹۵۲/۵۲ مگاژول در هکتار بود. باتوجه‌به این که این شاخص نشان‌دهنده اتلاف انرژی کم‌تر است، نشان می‌دهد که انرژی در تولید یونجه به‌ویژه در سامانه (۴) به‌طور بهینه‌تری مصرف شده است. افزایش عملکرد یا انرژی خروجی در محصول یونجه به‌دلیل ویژگی‌های اکولوژیکی خاص این گیاه، باعث برتری این شاخص در کشت یونجه نسبت به گندم آبی می‌شود. به‌طور کلی، افزایش انرژی خروجی نسبت به انرژی ورودی منجر به افزایش این شاخص می‌شود. همچنین، در مزارع سامانه (۳) باوجود این که مزارع تحت تنش آبی نبودند، اما عملکرد پائین‌تری نسبت به سامانه (۴)، مشاهده شد. در مزارع گندم نیز، سامانه (۲) عملکرد بهتری نسبت به سامانه ۱ داشت و در نتیجه انرژی خروجی بیش‌تری به‌واسطه استفاده بیش‌تر از نهاده‌های موثر بر رشد محصول داشت. به‌طور کلی، بهبود مدیریت زراعی، شامل استفاده بهینه از کودهای شیمیایی طبق توصیه‌های کودی، حفظ حاصل‌خیزی خاک، توجه به بازدهی مصرف آب با استفاده صحیح و طراحی مناسب سامانه‌های آبیاری و انتخاب محصولات زراعی با نیاز آبی کم، می‌تواند منجر به صرفه‌جویی در مصرف انرژی، پایداری بیش‌تر و در نهایت افزایش کارایی مصرف انرژی و بهبود انرژی خالص شود.



جدول ۴. روابط بین انرژی های ورودی و خروجی در تولید گندم آبی و یونجه در سامانه های آبیاری

| شاخص ها        |  | واحد              |  | مزارع گندم آبی |            |            |            | مزارع یونجه |  |
|----------------|--|-------------------|--|----------------|------------|------------|------------|-------------|--|
|                |  |                   |  | سامانه (۱)     | سامانه (۲) | سامانه (۳) | سامانه (۴) |             |  |
| نسبت انرژی     |  | -                 |  | ۲/۲۳           | ۲/۰۷       | ۳/۶۴       | ۵/۸۵       |             |  |
| انرژی ویژه     |  | مگاژول در کیلوگرم |  | ۶/۳۲           | ۶/۸۱       | ۳/۳۷       | ۲/۶۹       |             |  |
| بهره وری انرژی |  | کیلوگرم در مگاژول |  | ۰/۱۲           | ۰/۱۰       | ۰/۲۹       | ۰/۳۷       |             |  |
| انرژی خالص     |  | مگاژول در هکتار   |  | ۳۶۷۱۶/۸۴       | ۴۹۶۵۲/۹۴   | ۱۳۷۵۴۵/۳۰  | ۱۸۹۹۵۲/۵۲  |             |  |

توزیع انرژی به صورت مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که در جدول مشاهده می شود در مزارع گندم آبی سامانه های (۱) و (۲)، میزان انرژی غیرمستقیم نسبت به مستقیم بیش تر بود. اما در مزارع یونجه سامانه های (۳) و (۴)، میزان انرژی مستقیم بیش تر از غیرمستقیم است دلیل این امر حجم زیاد مصرف آب مصرفی در این مزارع است. در تمامی مزارع کشت گندم آبی و یونجه، میزان انرژی مصرفی از منابع تجدیدنپذیر بیش تر از انرژی حاصل از منابع تجدیدپذیر است. دلیل اصلی این امر، مصرف بالای آب آبیاری در هر دو محصول است. به عبارت دیگر، وابستگی زیاد به نهاده های آب آبیاری منجر به افزایش قابل توجه انرژی تجدیدنپذیر در سامانه های زراعی گندم آبی و یونجه می شود. در مزارع گندم و یونجه، استفاده از کودهای شیمیایی به عنوان منابع انرژی غیرمستقیم، نقش مهمی در تعیین میزان انرژی مصرفی ایفا کردند. زیرا در سامانه های زراعی (سامانه های (۲) و (۴)) که میزان مصرف کودهای شیمیایی، به ویژه کود نیتروژن، بیش تر از سایر سامانه ها (سامانه های (۱) و (۳)) بود، انرژی غیرمستقیم به طور قابل توجهی افزایش یافت. به عبارت دیگر، افزایش مصرف کودهای شیمیایی، به ویژه نیتروژن، منجر به افزایش انرژی غیرمستقیم در سامانه های (۲) و (۴) نسبت به سامانه های (۱) و (۳) گردید. مطابق با گزارش مور<sup>۱</sup> (۲۰۱۰)، برای دستیابی به یک سامانه پایدار تولید مواد غذایی، ضروری است که کارایی انرژی و سهم انرژی های تجدیدپذیر در اکوسیستم کشاورزی افزایش یابد. در حال حاضر، تأمین غذای جمعیت رو به رشد جهان بدون استفاده از انرژی های تجدیدنپذیر تقریباً دشوار و شاید غیرممکن به نظر رسد. با این حال، با توجه به پیامدهای زیست محیطی استفاده از مواد شیمیایی و سوخت های فسیلی، متخصصان حوزه کشاورزی ناگزیر از تلاش برای دستیابی به افزایش های پایدار در کشاورزی و افزایش سهم انرژی های تجدیدپذیر در تولید خواهند بود.

جدول ۵. مقادیر انرژی های مستقیم، غیرمستقیم، تجدیدپذیر و تجدیدنپذیر در تولید گندم آبی و یونجه

| نوع انرژی                     | واحد            | سامانه ۱ | سامانه ۲ | سامانه ۳ | سامانه ۴ |
|-------------------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| انرژی مستقیم <sup>الف</sup>   | مگاژول در هکتار | ۱۳۸۵۳/۱۶ | ۱۶۲۶۶/۱۶ | ۳۴۸۱۲/۲۰ | ۱۹۶۱۸/۶۶ |
| انرژی غیرمستقیم <sup>ب</sup>  | مگاژول در هکتار | ۱۵۸۸۰    | ۳۰۰۸۰/۹۰ | ۱۷۲۴۲/۵۰ | ۱۹۵۲۸/۸۰ |
| انرژی تجدیدپذیر <sup>پ</sup>  | مگاژول در هکتار | ۴۷۹۸/۰۸  | ۵۵۹۸/۷۴  | ۷۵۰/۶۸   | ۶۰۸/۶۵   |
| انرژی تجدیدنپذیر <sup>ت</sup> | مگاژول در هکتار | ۲۴۹۳۵/۰۸ | ۴۰۷۴۸/۳۱ | ۵۱۳۰۴/۰۲ | ۳۸۵۳۷/۹۱ |

الف) شامل نیروی انسانی، سوخت گازوئیل و آب آبیاری

ب) شامل سایر نهاده های ورودی به استثنای انرژی های مستقیم

پ) شامل نیروی انسانی و بذر

ت) شامل سایر نهاده های ورودی به استثنای انرژی های تجدیدپذیر

## بحث

این مطالعه به بررسی الگوی مصرف انرژی در دو سامانه آبیاری سطحی و بارانی در مزارع تحت کشت محصولات گندم آبی و یونجه در مزارع پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان پرداخت. هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی شاخص های انرژی مرتبط با تولید گندم آبی و یونجه در مزارع خرده مالکی منطقه بوده است. مزارع مورد بررسی به چهار گروه دسته بندی شدند: سامانه های (۱)

و (۲) که مربوط به مزارع گندم به ترتیب مجهز به سامانه آبیاری سطحی و بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک بودند، با منبع تأمین انرژی گرانشی. همچنین سامانه‌های (۳) و (۴) به ترتیب برای مزارع یونجه تجهیز به سامانه آبیاری سطحی و بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک با ویژگی‌های مشابه در تأمین انرژی جهت انتقال و توزیع آب در مزرعه (گرانشی) تعریف شدند. در پایان فصل زراعی، داده‌های مربوط به کل نهاده‌های ورودی (مصرفی) و خروجی (تولیدی) از طریق تکمیل پرسش‌نامه‌های حضوری جمع‌آوری شد. به‌منظور صحت‌سنجی اطلاعات، مقادیر، آب و سایر نهاده‌ها از اداره آب منطقه‌ای استان کردستان و کارشناسان جهاد کشاورزی استعلام و اصلاح گردید.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش شاخص‌های انرژی دو محصول یونجه و گندم آبی در مزارع کشاورزان دشت‌های پایاب سد مخزنی سورال استان کردستان مورد ارزیابی قرار گرفت. متوسط انرژی مصرفی مزارع در تولید گندم آبی در سامانه (۱) (آبیاری سطحی)  $29733/16$  و در سامانه (۲) (آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک)  $46347/06$  مگاژول در هکتار، در مزارع یونجه به ترتیب در سامانه (۳) (آبیاری سطحی) و سامانه (۴) (آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبیاش‌های متحرک)،  $52054/70$  و  $39147/47$  مگاژول در هکتار بود. مقادیر شاخص نسبت انرژی در مزارع سامانه (۱) و (۲)، به ترتیب  $2/23$  و  $2/07$  برای محصول گندم آبی و در سامانه‌های (۳) و (۴) به ترتیب  $3/64$  و  $5/85$  بود. همچنین بهره‌وری مصرف انرژی مزارع گندم در سامانه (۱) بیش‌تر از سامانه (۲) به دست آمد دلیل این امر در مزارع گندم این بود که با وجود مصرف زیاد آب مصرفی در سامانه (۱)، اما بنا به دلایل باورهای که عموم کشاورزان آن منطقه داشتن با مصرف بیش‌تر نهاده‌های ورودی دیگر به‌خصوص کود نیتروژن به عملکرد نهایی بیش‌تر خواهند رسید؛ اما در کل در سامانه (۲) عملکرد دانه‌ای گندم آبی سامانه (۲)،  $1/40$  برابر بیش‌تر از سامانه (۱) بود؛ اما برای بررسی و برتری سامانه‌های مذکور بهتر است که شرایط اقتصادی و اقلیمی منطقه را هم بررسی کرد؛ زیرا شرایط اقلیمی بر عملکرد محصول تحت کشت تأثیر زیادی دارد. از طرفی بهره‌وری انرژی در مزارع یونجه سامانه (۳) و (۴)، بهره‌وری انرژی در سامانه (۴) بیش‌تر از سامانه (۳) گزارش شد اصلی‌ترین دلیل آن می‌توان به مصرف بالای آب آبیاری به‌عنوان یک نهاده اصلی ورودی در سامانه (۳) نسبت داد؛ زیرا به‌طور متوسط مزارع سامانه (۳) مجهز به سامانه آبیاری سطحی حدوداً بیش‌از دوبرابر ( $2/40$  برابر)، آب مصرفی داشت بود. باتوجه‌به شاخص‌های انرژی بررسی‌شده، نوع محصول کشت‌شده تأثیر قابل‌توجهی بر میزان انرژی ورودی در سامانه‌های آبیاری دارد. به‌طوری‌که، در مزارع گندم، علی‌رغم مصرف بهینه آب در سامانه (۲)، میزان انرژی ورودی بالاتر از سامانه (۱) بود. این امر به این دلیل است که بسیاری از کشاورزان بر این باور بودند که افزایش مصرف نهاده‌های کودی منجر به عملکرد بالاتر محصول می‌شود. از سوی دیگر، در مزارع یونجه، میزان انرژی ورودی در سامانه (۳) بیش‌تر از سامانه (۴) بود، که این تفاوت عمدتاً ناشی از تأثیر میزان آب مصرفی در سامانه (۳) بر افزایش انرژی ورودی بود. یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت آبیاری اراضی تحت پوشش شبکه پایاب سد، تأخیر در رهاسازی به‌موقع آب برای کشاورزان است. در این راستا، آموزش و توانمندسازی کشاورزان از طریق برگزاری دوره‌های فنی در زمینه مدیریت انرژی، انتخاب نهاده‌های کم‌مصرف و بهره‌برداری بهینه از منابع، با ایجاد تعاونی‌های آموزش یافته می‌تواند نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری انرژی و بهبود سودآوری اقتصادی ایفا کند. اجرای این اقدامات نه تنها به بهبود کارایی انرژی در بخش کشاورزی منجر می‌شود، بلکه در بلندمدت به حفظ منابع طبیعی و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی نیز کمک خواهد کرد.

## ملاحظات اخلاقی

### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

### سپاس‌گزاری

بدین‌وسیله، نویسندگان مراتب سپاس و قدردانی خود را از کشاورزان محترم منطقه که با همکاری ارزشمند خود در تکمیل پرسش‌نامه‌ها زمینه اجرای این پژوهش را فراهم ساختند، ابراز می‌دارند. همچنین، از حمایت‌ها و همکاری‌های بی‌دریغ کارشناسان محترم اداره آب منطقه‌ای استان کردستان، به‌ویژه جناب آقای مهندس هیرش قدرشناس که در مراحل مختلف پژوهش یاری‌رسان بودند، و جناب آقای دکتر فرزاد حسین‌پناهی، عضو هیئت علمی گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه کردستان، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## منابع

- اوجاقلو، حسن، اوجاقلو، فرهاد، جعفری، محمد مهدی، میثاقی، فرهاد، نظری، بیژن، و کرمی دهکردی، اسماعیل. (۱۴۰۲). اثر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه. *مجله آب و خاک*، ۳۷ (۲)، ۱۶۵-۱۸۵.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79145.1211>
- بایزیدی، مطلب، و کاکي، مهري. (۱۴۰۰). تغییرات حجم ذخیره و بهره برداری از آبخوان‌های دشت های شرق استان کردستان. *نشریه اکوهیدرولوژی*، ۸ (۱)، ۵۷-۷۲.  
<https://sid.ir/paper/1058902/fa>
- بهرامی‌بوانی، ندا، بهرامی، هوشنگ، نصیریان، نیما، و سلطانی محمدی، امیر. (۱۳۹۳). تحلیل مقایسه‌ای بهره وری انرژی و راندمان کاربرد آب در سامانه های آبیاری تحت فشار و سطحی منطقه مطالعه موردی: تولید گندم در شهرستان اهواز. *ویژه نامه نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار*، ۲۴ (۴)، ۱۴۱-۱۵۲.  
[https://journals.tabrizu.ac.ir/article\\_3315.html](https://journals.tabrizu.ac.ir/article_3315.html)
- تقی‌نژاد، جبرائیل، و واحدی، عادل. (۱۴۰۰). مدل سازی الگوی مصرف انرژی و تحلیل حساسیت نهاده ها در تولید گندم آبی، مطالعه موردی: استان اردبیل. *مجله مکانیزاسیون کشاورزی*، ۶ (۴)، ۱۱-۱۹.  
<https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202>
- حبیبی، سعید، خوش روش، مجتبی، و نوری خواجه بلاغ، رسول. (۱۴۰۲). تحلیل شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی آب و انرژی محصولات یونجه و جو در دو اقلیم متفاوت. *مجله آب و خاک*، ۳۸ (۱)، ۲۳-۳۶.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85576.1360>
- خرمیان، محمد، شوشی دزفولی، احمد علی، و عصاره، علی. (۱۳۹۱). بررسی تاثیر آبیاری بارانی قرقره ای بر عملکرد علوفه و کارایی مصرف آب یونجه در خوزستان. *مجله علمی فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۴ (۱۵)، ۸۷-۹۷.  
<https://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-90-fa.html>
- ریحانی، نرجس، و خاشعی سیوکی، عباس. (۱۳۹۴). برآورد ضریب گیاهی زیره سبز در مراحل مختلف رشد به روش لایسیمتری در منطقه بیرجند. *مجله آب و خاک*، ۲۹ (۵)، ۱۰۴۷-۱۰۵۶.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.v29i5.24171>
- ضیایی، سید مسعود، حسین پناهی، فرزاد، ولی زاده، جعفر، و برآبادی، سید ابوالقاسم. (۱۳۹۲). مقایسه کارآمدی تولید گندم و جو به لحاظ مصرف انرژی و بهره وری آن در استان سیستان و بلوچستان. *نشریه پژوهشهای زراعی ایران*، ۱۱ (۲)، ۳۲۷-۳۳۶.  
<https://doi.org/10.22067/gsc.v11i2.26148>
- طهماسبی، پیمان، دالوند، فاطمه، حسینی، سید ابوالفضل، کریمی، بختیار، و قدرشناس، هیرش. (۱۴۰۳). بررسی مقایسه‌ای کارایی انرژی دو سامانه آبیاری بارانی در کشت گندم (مطالعه موردی: دشت‌های دهگلان، استان کردستان). *مجله آب و خاک*، ۳۸ (۶)، ۶۸۳-۶۹۷.  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439>
- عاشوری، وحید، هاشمی شاهدانی، سید مهدی، و روزبهانی، عباس. (۱۴۰۲). بررسی میزان مصرف آب و انرژی در سطح مزارع شبکه آبیاری قزوین. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۲)، ۲۹۵-۳۱۰.  
<https://doi.org/10.22059/jwim.2022.323089.869>
- غلامی، زینب، ابراهیمیان، حامد، و نوری، حمیده. (۱۳۹۴). بررسی بهره وری انرژی آب و بهره وری اقتصادی انرژی در سامانه های آبیاری بارانی و سطحی در شرایط بهره برداری از آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین). *مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی*، ۱۶ (۳)، ۳۱-۴۴.  
<https://sid.ir/paper/28231/fa>
- قادرپور، امید، رفیعی، شاهین، و شریفی، محمد. (۱۳۹۶). تجزیه و تحلیل و مدل سازی انرژی و هزینه تولید یونجه با بهره‌گیری از سامانه استنتاج فازی - عصبی تطبیقی در شهرستان بوکان. *نشریه مهندسی بیوسیستم ایران*، ۴۸ (۱)، ۱۷۹-۱۹۰.  
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61573>
- قاسمی‌مبتکر، حسن. (۱۳۹۸). بررسی روند مصرف انرژی در دو سامانه آبیاری غرقابی و تحت فشار: مطالعه موردی یک مزرعه صد هکتاری در همدان. *نشریه مهندسی بیوسیستم ایران*، ۵۰ (۴)، ۸۰۹-۸۰۱.  
<https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189>

قدمی فیروزآبادی، علی، و اکبری، مهدی. (۱۴۰۲). تاثیر آبیاری قطره‌ای نواری (تیپ) بر میزان عملکرد و بهره‌وری آب محصول گندم و شوری خاک در شرایط زارعین (مطالعه موردی: استان همدان). *نشریه آبیاری و زهکشی/ایران*، ۱۷(۵)، ۸۳۱-۸۴۲.

[https://idj.iaid.ir/article\\_182244.html](https://idj.iaid.ir/article_182244.html)

قهرودیتالی، منیژه، خدامرادی، فرهاد، و علی نوری، خدیجه. (۱۴۰۲). تاثیر افت آب‌های زیرزمینی بر مخاطرات فرونشست زمین در دشت دهگلان، استان کردستان. *نشریه مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۰(۱)، ۷۰-۵۷.

<https://dx.doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777>

گودرزی، محمدرضا، صباغ زاده، مریم، رجب پور نیکنام، امیررضا. (۱۴۰۴). رابطه بین فرونشست زمین و مصرف آب در دشت یزد-اردکان با استفاده از تصاویر سنتینل ۱. *مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۵ (۷۶)، ۱۴۴-۱۶۱.

<http://igs.khu.ac.ir/article-1-4083-fa.html>

وزارت نیرو. (۱۳۸۴). گزارشی درباره برقی کردن چاه های کشاورزی. دفتر مطالعات زیربنایی.

<https://rc.ajlis.ir/fa/report/show/731149>

## References

- Ahmadbeyki, A., Ghahderijani, M., Borghaee, A., & Bakhoda, H. (2023). Energy use and environmental impacts analysis of greenhouse crops production using life cycle assessment approach: A case study of cucumber and tomato from Tehran province, Iran. *Energy Reports*, 9, 988-999. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.205>
- Ashouri, V., Hashemi Shahdani, S. M., & Rouzbahani, A. (2023). Investigation of water and energy consumption in the farms of Qazvin irrigation network. *Water and Irrigation Management*, 13(2), 295-310. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.323089.869> (In Persian)
- Bahrani-Bovani, N., Bahrani, H., Nasiriyani, N., & Soltani Mohammadi, A. (2014). Comparative analysis of energy productivity and water application efficiency in pressurized and surface irrigation systems: A case study of wheat production in Ahvaz County. *Special Issue of the Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 24(4), 141-152. [https://journals.tabrizu.ac.ir/article\\_3315.html](https://journals.tabrizu.ac.ir/article_3315.html) (In Persian)
- Bayazidi, M., & Kaki, M. (2021). Changes in storage volume and exploitation of aquifers in the eastern plains of Kurdistan province. *Ecohydrology*, 8(1), 57-72. <https://sid.ir/paper/1058902/fa> (In Persian)
- Ghadami Firoz Abadi, A., & Akbari, M. (2023). The effect of tape drip irrigation on yield and water productivity of wheat and soil salinity under farmers' conditions (Case study: Hamadan province). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 17(5), 831-842. [https://idj.iaid.ir/article\\_182244.html](https://idj.iaid.ir/article_182244.html) (In Persian)
- Ghaderpour, O., Rafiee, S., & Sharifi, M. (2017). Analysis and modeling of energy and production cost of alfalfa using adaptive neuro-fuzzy inference system in Bukan Township. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(1), 179-190. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61573> (In Persian)
- Ghahrodi Tali, M., Khodamoradi, F., & Ali Nouri, Kh. (2023). The effect of groundwater depletion on land subsidence hazards in Dehgolan plain, Kurdistan province. *Environmental Hazards Management*, 10(1), 57-70. <https://dx.doi.org/10.22059/jhsci.2023.359130.777> (In Persian)
- Ghasemi Mobtaker, H. (2019). Investigating the trend of energy consumption in two surface and pressurized irrigation systems: A case study of a 100-hectare farm in Hamadan. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 50(4), 801-809. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2019.281690.665189> (In Persian)
- Ghasemi-Mobtaker, H., Sharifi, M., Taherzadeh-Shalmai, N., & Afrasiabi, S. (2022). A new method for green forage production: Energy use efficiency and environmental sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 363, 132562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132562>
- Gholami, Z., Ebrahimi, H., & Nouri, H. (2015). Investigating water energy productivity and economic energy productivity in sprinkler and surface irrigation systems under groundwater exploitation conditions (Case study: Qazvin plain). *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(3), 31-44. <https://sid.ir/paper/28231/fa> (In Persian)
- Ghorbani, R., Mondani, F., Amirmoradi, Sh., Feizi, H., Khorramdel, S., Sanjani, S., Anvarkhah, S., Aghel, H., & Sabet Teimouri, M. (2011). A case study of energy use and economical analysis of irrigated and dryland wheat production systems. *Applied Energy*, 88(1), 283-288. <https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.028>
- Goodarzi, M., Sabaghzadeh, M., & Rajabpour Niknam, Amirreza. (2025). The relationship between land subsidence and water consumption in Yazd-Ardakan plain using Sentinel-1 images. *Applied Geographic Sciences Research*, 25(76), 144-161. <http://dx.doi.org/10.61186/jgs.25.76.13> (In Persian)

- Goodarzi, M. R., Sabaghzadeh, M., & Niazkar, M. (2023). Evaluation of snowmelt impacts on flood flows based on remote sensing using SRM model. *Water*, 15(9), 1650. <https://doi.org/10.3390/w15091650>
- Habibi, S., Khoshravash, M., & Nouri Khajeh Bolagh, R. (2023). Analysis of physical water and energy productivity indices of alfalfa and barley in two different climates. *Water and Soil*, 38(1), 23-36. <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85576.1360> (In Persian)
- Hamedani, S. R., Shabani, Z., & Rafiee, S. (2011). Energy inputs and crop yield relationship in potato production in Hamadan province of Iran. *Energy*, 36(5), 2367-2371. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.013>
- Han, D., Yu, D., & Cao, Q. (2020). Assessment on the features of coupling interaction of the food-energy-water nexus in China. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119379>
- Heydari, N., & Taran, F. (2025). Effect of Climate Change on Wheat Yield and Water Productivity in Iran and the World. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 16(2), 253-269. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.08>
- Kaab, A., Khanali, M., Shadamanfar, S., & Jalalvand, M. (2024). Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. *Environmental and Sustainability Indicators*, 22, 100357. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100357>
- Khorramian, M., Shooshi Dezfouli, A. A., & Osareh, A. (2012). Investigating the effect of center pivot irrigation on forage yield and water use efficiency of alfalfa in Khuzestan. *Journal of Crop Physiology*, 4(15), 87-97. <http://cpj.ahvaz.iau.ir/article-1-90-fa.html> (In Persian)
- Kiss, L. B. (2024). Development of Energy Consumption in Agriculture in the European Union between 2010 and 2021: Forecast Until 2025. *POLGÁRI SZEMLE: GAZDASÁGI ÉS TÁRSADALMI FOLYÓIRAT*, 20(4-6), 128-138. <https://doi.org/10.24307/psz.2024.1111>
- Kitani, O., Jungbluth, T., Peart, R. M., & Ramdani, A. (1999). CIGR handbook of agricultural engineering. *Energy and biomass engineering*, 5, 330. [https://www.researchgate.net/publication/291708655\\_CIGR\\_Handbook\\_of\\_Agricultural\\_Engineering\\_vol\\_V\\_I](https://www.researchgate.net/publication/291708655_CIGR_Handbook_of_Agricultural_Engineering_vol_V_I)
- Ministry of Energy. (2005). A report on electrification of agricultural wells. Office of Infrastructure Studies. <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/731149> (In Persian)
- Mohammadi, A., Rafiee, S., Jafari, A., Keyhani, A., Mousavi-Avval, S. H., & Nonhebel, S. (2014). Energy use efficiency and greenhouse gas emissions of farming systems in north Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 724-733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.012>
- Moore, S. R. (2010). Energy efficiency in small-scale biointensive organic onion production in Pennsylvania, USA. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25(3), 181-188. <http://dx.doi.org/10.1017/S1742170510000098>
- Nasseri, A. (2024). Effects of irrigated and dryland conditions on energy indices in wheat production: A meta-analysis based on the principal components analysis. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04495-8>
- Ojaghlou, H., Ojaghlou, F., Jafari, M. M., Misaghi, F., Nazari, B., & Karami Dehkordi, I. (2023). The effect of irrigation management on water use efficiency indices of alfalfa. *Water and Soil*, 37(2), 165-185. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79145.1211> (In Persian)
- Peng, L., Chen, L., & Dai, H. (2024). The impact of energy structure on agricultural green productivity in China. *Scientific Reports*, 14(1), 27938. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-024-78876-4>



- Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2021). Quantitative simulation of the water-energy-food (WEF) security nexus in a local planning context in indonesia. *Sustainable Production and Consumption*, 25, 198-216. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.08.009>
- Rahman, M. A., Lee, S. H., Park, H. S., Min, C. W., Woo, J. H., Choi, B. R., Rahman, M. M., & Lee, K. W. (2025). Light Quality Plays a Crucial Role in Regulating Germination, Photosynthetic Efficiency, Plant Development, Reactive Oxygen Species Production, Antioxidant Enzyme Activity, and Nutrient Acquisition in Alfalfa. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(1), 360. <https://doi.org/10.3390/ijms26010360>
- Reihani, N., & Khashei Siouki, A. (2015). Estimation of the crop coefficient of cumin at different growth stages using lysimetry in Birjand region. *Water and Soil*, 29(5), 1047-1056. <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i5.24171> (In Persian)
- Sánchez-Sutil, F., & Cano-Ortega, A. (2021). Smart control and energy efficiency in irrigation systems using LoRaWAN. *Sensors*, 21(21), 7041. <http://dx.doi.org/10.3390/s21217041>
- Senbeta, A. F., & Worku, W. (2023). Ethiopia's wheat production pathways to self-sufficiency through land area expansion, irrigation advance, and yield gap closure. *Heliyon*, 9(10), e20720. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20720>
- Şeren, A., & Yildirim, M. U. (2025). Activities on the Efficient Use of Water in Agriculture in Türkiye Under Climate Change. *Agriculture and Water Management Under Climate Change*, Springer Nature Switzerland publications, London, England. <https://www.springerprofessional.de/en/agriculture-and-water-management-under-climate-change/50410488>
- Shi, H., Zhang, Y., Bian, M., & Zhang, J. (2024). Influence of energy poverty on agricultural water efficiency using a panel data study in China. *Scientific Reports*, 14(1), 2064. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-023-50971-y>
- Taghinezhad, J., & Vahidi, A. (2021). Modeling energy consumption pattern and sensitivity analysis of inputs in irrigated wheat production: A case study of Ardabil province. *Agricultural Mechanization*, 6(4), 11-19. <https://doi.org/10.22034/jam.2022.14202> (In Persian)
- Tahmasbi, P., Dalvand, F., Hosseini, S. A., Karimi, B., & Ghadrshnas, H. (2024). A comparative study of energy efficiency of two sprinkler irrigation systems in wheat cultivation (Case study: Dehgolan plains, Kurdistan province). *Water and Soil*, 38(6), 683 - 697. <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.90134.1439> (In Persian)
- Taki, M., Rohani, A., Soheili-Fard, F., & Abdeslahi, A. (2018). Assessment of energy consumption and modeling of output energy for wheat production by neural network (MLP and RBF) and Gaussian process regression (GPR) models. *Journal of cleaner production*, 172, 3028-3041. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.107>
- Tipi, T., Cetin, B., & Vardar, A. (2009). An analysis of energy use and input costs for wheat production in Turkey. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 7(2), 2399-23862. [https://www.researchgate.net/publication/239923862\\_An\\_analysis\\_of\\_energy\\_use\\_and\\_input\\_costs\\_for\\_wheat\\_production\\_in\\_Turkey](https://www.researchgate.net/publication/239923862_An_analysis_of_energy_use_and_input_costs_for_wheat_production_in_Turkey)
- Vahedi, A., & Zarifneshat, S. (2021). Evaluation Energy Flow and Analysis of Energy Economy for Irrigated Wheat Production in Different Geographical Regions of Iran. *Journal of Agricultural Machinery*, 11(2), 505–523. <https://doi.org/10.22067/jam.v11i2.81747>
- Ziaci, S. M., Hosseinpanahi, F., Valizadeh, J., & Barabadi, S. A. (2013). Comparison of wheat and barley production efficiency in terms of energy consumption and productivity in Sistan and Baluchestan province. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 11(2), 327-336. <https://doi.org/10.22067/gsc.v11i2.26148> (In Persian)



## Development of a two-dimensional flow model using a time-splitting scheme and regular rectangular mesh

Ashkan Monifi<sup>1</sup> , Mohammad Mehdi Heidari<sup>2</sup> , and Mohammad Hossein Adibrad<sup>3</sup>

1. Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: [ashkan.monifi@gmail.com](mailto:ashkan.monifi@gmail.com)
2. Corresponding author, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: [mm.heidari@razi.ac.ir](mailto:mm.heidari@razi.ac.ir)
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: [m.adibrad@razi.ac.ir](mailto:m.adibrad@razi.ac.ir)

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 17 January 2025

Received in revised form 01 March 2025

Accepted 13 April 2025

Available online 22 June 2025

#### Keywords:

finite volumes,  
Navier-Stokes,  
turbulence model,  
Fromm scheme.

### ABSTRACT

**Objective:** In this study, a two-dimensional numerical model is presented to simulate the flow in open channels. The governing equations of the flow are depth-averaged Navier-Stokes equations, which are separated and solved using the finite volume method and the time-splitting scheme. One of the advantages of the time-splitting method is the ability to solve the different terms of the equations separately using the best numerical scheme. Another advantage of this method is its simplicity and ease of understanding, because in all stages the equations are solved in one dimension.

**Method:** Generating the mesh is one of the most important initial operations for solving the governing equations. In this research, a regular rectangular grid was used. The water level variable was defined at the center of the cell and the velocity and discharge were defined at the boundaries of each cell. In order to solve the governing equations of the flow in this model, each time step is divided into several stages. Initially, the advection terms of the equation of motion were solved based on the Fromm scheme and its output was considered for the diffusion term. The diffusion term in the momentum equation was solved implicitly using the TDMA algorithm. Then, the friction term in the flow equation was separated and solved explicitly, and then the water level was calculated by simultaneously solving the continuity equation and the remaining terms of the momentum equations.

**Results:** In order to verify the validity of the two-dimensional model, The longitudinal profile of gradually varying flow in a rectangular channel, hydraulic jump, sudden channel opening, and asymmetric dam failure were considered for evaluating the model. The output results of the numerical model show that the developed model is capable of simulating the flow for different conditions with appropriate accuracy.

**Conclusions:** The time splitting algorithms with staggered grid approach are used to handle the coupling of water depth and velocity parameter. In this case, water level variable was defined at the center of the cell and the velocity and discharge were defined at the boundaries of each cell. The proposed model has been tested in several experimental cases of flow. The simulated water depth and velocity in time and space are in good agreement with the measured data.

**Cite this article:** Monifi, A., Heidari, M.M., & Adibrad, M.H. (2025). Development of a two-dimensional flow model using a time-splitting scheme and regular rectangular mesh. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 94-115. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11651.1149>



## Introduction

Simulation of water flow in canals and rivers has been the subject of many researches in the field of hydraulics and river engineering. The use of two-dimensional numerical modeling can be considered as an option for predicting the performance of hydraulic designs of the structure. Because of the complexity of the turbulent flows with free water surface, the numerical simulation of flow in open channels is very challenging. Its advancement can be attributed to many successful numerical techniques developed in the field of computational fluid dynamics. Among these techniques, the staggered grid approach has been widely adopted to solve the Navier–Stokes equations. In this study, a two-dimensional numerical model using the finite volume method and the time-splitting scheme is presented to simulate flow in open channels. One of the advantages of the time-splitting method is the ability to discrete and solve the different terms of the equations separately using the best numerical scheme. Another advantage of this method is its simplicity and ease of understanding, because in all stages the equations are solved in one dimension.

## Method

Generating the mesh is one of the most important initial operations for solving the governing equations. Therefore, in this research, a regular rectangular grid with dimensions  $dx$  and  $dy$  was used according to Fig (1). The water level variable was defined at the center of the cell and the velocity and discharge were defined at the boundaries of each cell.

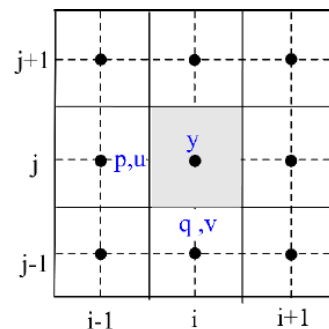


Figure 1. Grid used to separate the governing equations of the flow

In this research, the time-splitting method is used to separate the different components of the equations. In this method, each time step is divided into several stages. In the first step, the advection terms of the momentum equation in the  $x$  and  $y$  directions are solved to calculate the fluxes ( $p$ ,  $q$ ), and then the diffusion terms in both directions are separated and solved. It should be noted that in solving the diffusion terms, the output results of the first stage are used. Then the friction term is separated from the momentum equation in an explicit manner. In the next step, the continuity equation and the remainder of the momentum equation, i.e., the gravitational term, are simultaneously separated and solved. One of the advantages of the time-splitting method is the possibility of solving the different terms of the equations separately using the best numerical scheme. Another advantage of this method is its simplicity and ease of understanding, because in all stages the equations are solved in one dimension.

## Results

In order to verify the validity of the two-dimensional model, various tests, whose solutions are available in the form of theory or laboratory measurements, were used. The longitudinal profile of gradually varying flow in a rectangular channel, hydraulic jump, sudden channel opening, and asymmetric dam failure are the tests considered for evaluating the model. As an

example, the water surface profile 7.5 seconds after the dam failure is simulated by the model and is shown in Fig (2).

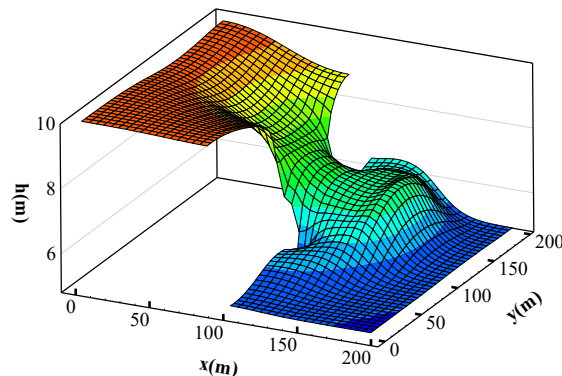


Figure 2. Simulated water surface profile 7.5 seconds after dam failure

Comparison of the numerical model output results with experimental data and analytical solution shows that the developed model is capable of simulating flow for different conditions.

### Conclusions

The proposed model adopts the finite volume method on a rectangular grid to solve the depth-averaged 2D equations of unsteady open-channel flow. The time splitting algorithms with staggered grid approach are used to handle the coupling of water depth and velocity parameter. In this case, water level variable was defined at the center of the cell and the velocity and discharge were defined at the boundaries of each cell. The proposed model has been tested in several experimental cases of flow. The simulated water depth and velocity in time and space are in good agreement with the measured data.

### Author Contributions

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

### Ethical Considerations

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

### Funding

Not applicable.

### Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



## توسعه مدل دوبعدی جریان در پلان با استفاده از شمای تنصیف زمان و

### شبکه بندی منظم مستطیلی

اشکان منیفی<sup>۱</sup>، محمد مهدی حیدری<sup>۲</sup>، و محمد حسین ادیب راد<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [ashkan.monifi@gmail.com](mailto:ashkan.monifi@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [mm.heidari@razi.ac.ir](mailto:mm.heidari@razi.ac.ir)

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه، کرمانشاه، ایران. رایانامه: [madibrad@yahoo.ca](mailto:madibrad@yahoo.ca)

| اطلاعات مقاله                                                                                                                                                                                                                                                                         | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>نوع مقاله:</b> مقاله پژوهشی</p> <p><b>تاریخ دریافت:</b> ۱۴۰۳/۱۰/۲۸</p> <p><b>تاریخ بازنگری:</b> ۱۴۰۳/۱۲/۱۱</p> <p><b>تاریخ پذیرش:</b> ۱۴۰۴/۰۱/۲۴</p> <p><b>تاریخ انتشار:</b> ۱۴۰۴/۰۴/۰۱</p> <p><b>کلیدواژه ها:</b> احجام محدود، معادلات ناویراستوکس، مدل آشفتگی، شمای فروم.</p> | <p><b>هدف:</b> توسعه و کدنویسی بسیاری از مدل های عددی ارائه شده توسط محققین برای شبیه سازی دوبعدی جریان پیچیده و مشکل است و نیاز به مهارت های برنامه نویسی و محاسبات عددی خاصی دارند هدف اصلی این تحقیق ارائه یک روش ساده تر نسبت به سایر مدل های عددی است که دارای دقت مناسب نیز باشد.</p> <p><b>روش پژوهش:</b> در این پژوهش یک مدل عددی دوبعدی برای شبیه سازی جریان در مجاری روباز ارائه شده است. معادلات حاکم بر جریان، معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده در عمق است که با استفاده از روش احجام محدود و شمای تنصیف زمان جداسازی و حل شده اند. برای گسسته سازی معادلات حاکم از شبکه منظم مستطیلی استفاده شد. به منظور حل معادلات حاکم بر جریان در این مدل، هر گام زمانی به چند مرحله تقسیم می شود. در ابتدا ترم های جابجایی معادله اندازه حرکت بر اساس شمای فروم حل شد و خروجی آن برای ترم پخشیدگی در نظر گرفته شد. ترم های پخشیدگی مربوط به معادله اندازه حرکت به صورت ضمنی و با استفاده از الگوریتم TDMA حل شد. سپس ترم اصطکاک در معادله جریان جداسازی و به صورت صریح حل شد و در ادامه تراز سطح آب با حل هم زمان معادله پیوستگی و ترم های باقی مانده معادلات اندازه حرکت محاسبه شد. به منظور صحت سنجی مدل دوبعدی، آزمون های مختلفی که حل آن ها به صورت تئوری یا اندازه گیری های آزمایشگاهی موجود است، برای مدل انجام شد.</p> <p><b>یافته ها:</b> مقایسه نتایج خروجی مدل عددی با داده های آزمایشگاهی و حل تحلیلی نشان می دهد که مدل توسعه یافته، قادر به شبیه سازی جریان برای شرایط مختلف است. مدل سازی آشفتگی در مدل حاضر با استفاده از مدل سهموی متوسط گیری شده در عمق انجام شده است. در مواردی که آشفتگی جریان زیاد باشد، دقت این مدل آشفتگی کاهش می یابد.</p> <p><b>نتیجه گیری:</b> نتایج خروجی مدل عددی نشان می دهد که مدل توسعه یافته، قادر به شبیه سازی جریان برای شرایط مختلف با دقت مناسب است.</p> |

**استناد:** منیفی، اشکان؛ حیدری، محمد مهدی؛ و ادیب راد، محمد حسین. (۱۴۰۴). توسعه مدل دوبعدی جریان در پلان با استفاده از شمای تنصیف زمان و شبکه بندی

منظم مستطیلی. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۲)، ۹۴-۱۱۵.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11651.1149>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

### مقدمه

پیشرفت و توسعه چشمگیر سرعت رایانه‌ها در دهه‌های اخیر سبب شده است تا توجه خاصی به روش‌های حل عددی معادلات حاکم بر مسائل مهندسی آب شود. امروزه حل معادلات پیچیده و غیرخطی حاکم بر جریان در شرایط گوناگون و با استفاده از تکنولوژی رایانه‌ای تا مراحل بسیار پیشرفته‌ای عملی شده است. با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی می‌توان مطالعات ارزشمندی پیرامون پدیده‌های فیزیکی مختلفی انجام داد و نتایج مطلوبی به دست آورد، اما زمان بر بودن ساخت مدل‌های فیزیکی و همچنین پرهزینه بودن آن‌ها سبب شده است تا مدل‌سازی عددی جایگزین مناسبی برای آن‌ها باشد (پاپانیکولاس و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱). از این رو، بسیاری از مدل‌های عددی با استفاده از الگوهای صریح و ضمنی برای شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز توسعه یافته است (ناژیک<sup>۲</sup>، ۱۹۹۵؛ فنما و چدری<sup>۳</sup>، ۱۹۹۰؛ و زانگ و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۰۳).

### ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

در رابطه با پژوهش حاضر، صورت گرفته است که در ادامه تعدادی از این مطالعات که در خارج از کشور مورد بررسی قرار گرفته است، ارائه شده است.

#### ۱. مطالعات داخلی

سرورام و شمسایی (۱۳۹۲) مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان ناشی از شکست سد را با استفاده از تقریب معادلات آب‌های کم‌عمق به روش احجام محدود و به شکل ضمنی شبه لاگرانژی ارائه دادند. آن‌ها از روش شبه تحلیلی برای تعیین نقطه شروع حرکت ذره استفاده کردند. نتایج نشان داد که خروجی مدل عددی با داده‌های اندازه‌گیری مطابقت خوبی دارد. قبادیان (۱۳۹۸) از روش تفاضل محدود صریح با استفاده توأم از شمای پرش قورباغه و لکس برای حل معادلات آب‌های کم‌عمق در شکست سد استفاده کرد. معادلات حاکم بر روی یک مش زیگزاگی منفصل شدند. صحت سنجی مدل با مقایسه نتایج آن با جواب حل تحلیلی شکست تک بعدی ناگهانی سد بر روی بستر بدون اصطکاک و شکست جزبی متقارن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان داد مدل حاضر با دقت مناسب جریان ناشی از شکست سد را شبیه‌سازی می‌کند. مهرموسوی (۱۳۹۷) و مهرموسوی و همکاران (۱۳۹۸) مدل کامپیوتری در سیستم مختصات منحنی الخط بر روی شبکه جابه‌جاشده ارائه دادند که با استفاده از روش تفاضل محدود صریح و استفاده هم‌زمان از الگوریتم‌های پرش قورباغه و لکس معادلات حاکم بر آب‌های کم‌عمق در مسئله شکست سد را حل می‌نماید. این عمل با افزایش تعداد نقاط درگیر در محاسبات و ایجاد ارتباط بیشتر بین آنها باعث می‌شود گرادیان‌های تیز هندسی و هیدرولیکی هموار شده و احتمال رخ دادن نوسان و عدم همگرایی کمتر شود.

تیموری یگانه و همکاران (۱۴۰۲) یک مدل عددی با استفاده از روش حجم کنترل و شبکه‌بندی مثلثی برای شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز ارائه دادند. آنها ابتدا ترم‌های جابجایی و پخشیدگی را جداسازی کردند و باقی‌مانده معادله اندازه حرکت و پیوستگی را به صورت هم‌زمان حل کردند. مقایسه خروجی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی و حل تحلیلی نشان می‌دهد که دقت مدل آنها برای شبیه‌سازی جریان مناسب است.

#### ۲. مطالعات خارجی

آناستازو و چان<sup>۵</sup> (۱۹۹۷) از روش حجم محدود مرتبه دوم پیشرو و شبکه‌بندی نامنظم مثلثی برای حل عددی معادلات آب‌های کم‌عمق استفاده کردند. در این تحقیق برای اولین بار از ترکیب روش احجام محدود و روش Roe's برای به دست آمدن

1. Papanicolaou et al  
2. Nujic  
3. Fennema & Chaudhry  
4. Zhang et al  
5. Anastasio & Chan

یک روش مرتبه دوم استفاده شده است. در این روش تابع Roe's برای محاسبه شار ورودی و خروجی از هر ضلع المان‌های شبکه استفاده شده است که باعث سادگی و سرعت در حل معادلات می‌شود.

وو<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) امکان استفاده از معادلات آب‌های کم‌عمق در شبیه‌سازی جریان غیرماندگار و انتقال رسوب در کانال‌های روباز را بررسی کرد. آن‌ها با استفاده از روش احجام محدود و به‌کارگیری روش سیمپل در مختصات انحنا دار و شبکه جابه‌جا نشده، معادلات جریان را حل کردند.

نمین و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) یک مدل عددی با استفاده از روش حجم محدود برای پیش‌بینی جریان‌های روباز در مصب رودخانه ارائه داد. آن‌ها از یک شبکه مثلثی بدون ساختار برای جداسازی معادلات استفاده کردند.

زرانی و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵) با به‌کارگیری روش احجام محدود در منقطع‌سازی معادلات جریان، معادلات آب‌های کم‌عمق را در سیستم مختصات انحنا دار حل کردند. سپس مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان در کانالی با سه مؤاندر مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه بین خروجی مدل عددی و داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی الگوی جریان است.

هو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۵) روش جدید MUSCL را با استفاده از شبکه بدون ساختار مثلثی برای شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز ارائه دادند. این مدل بر اساس روش حجم محدود ارائه و برای توپوگرافی‌های ناهموار پیشنهاد شده است.

گروسی و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۲) یک مدل عددی با استفاده از ذرات متحرک نیمه ضمنی و روش حجم سیال مدل عددی شکست سد ارائه داد و نتایج مدل را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد. دقت مدل ایشان برای شبیه‌سازی شکست سد در بستر خشک و مرطوب رضایت بخش بود.

بوستو و دامبسر<sup>۶</sup> (۲۰۲۲) مدل دوبعدی جریان را با ترکیبی از روش احجام محدود و اجزای محدود نیمه ضمنی روی شبکه بدون ساختار ارائه دادند. آنها برای ترم‌های انتقال از شمای گودونوف در روش احجام محدود و روش نیمه ضمنی مبتنی بر فشار استفاده کردند. این مدل بادقت خوبی قادر به شبیه‌سازی هم‌زمان جریان زیربحرانی و فوق‌بحرانی برای اعداد فرود متنوعی است.

نوروزی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۲۲) مدل دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق برای جریان و رسوب را با استفاده از روش تفاضل محدود ارائه دادند. برای محاسبه ظرفیت بار بستر و معلق از روش‌های تجربی استفاده کردند و بهترین روش برآورد آن‌ها را مشخص کردند. آنها با استفاده از مدل عددی ارائه شده، آبستتگی پایه پل را شبیه‌سازی کردند و نتایج شبیه‌سازی را با خروجی مدل‌های تجاری موجود و داده‌های مشاهداتی مقایسه کردند. نتایج نشان داد مدل آنها دقت مناسبی در شبیه‌سازی فرسایش و رسوبگذاری دارد.

وو و یانگ<sup>۸</sup> (۲۰۲۴) شبیه‌سازی زمین‌لغزش و جریان‌های واریزی را با کوپل کردن روش هیدرودینامیک ذرات صاف شده و روش احجام محدود انجام دادند. آنها برای شبیه‌سازی فاز مایع و جامد به ترتیب از روش احجام محدود و روش هیدرودینامیک ذرات استفاده کردند. دقت شبیه‌سازی فاز جامد مدل آنها به تعداد ذرات و شعاع کرنل بستگی دارد.

توسعه و کدنویسی بسیاری از مدل‌های عددی ارائه شده توسط محققین برای شبیه‌سازی دوبعدی جریان پیچیده و مشکل است و نیاز به مهارت‌های برنامه‌نویسی و محاسبات عددی خاصی دارند. هدف اصلی این تحقیق ارائه یک روش ساده‌تر نسبت به سایر مدل‌های عددی است که دارای دقت مناسب نیز باشد. در این پژوهش، معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده در عمق با استفاده از روش احجام محدود و با ترکیبی از روش‌های صریح و ضمنی جداسازی و یک مدل دوبعدی برای شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز ارائه شده است. در مدل عددی ارائه شده، معادلات از حالت پیچیده خود به چند زیر معادله تبدیل شده که قابل حل باشند و خروجی هر زیر معادله به‌عنوان ورودی برای بخش دیگر در نظر گرفته شد.

1. Wu
2. Namin et al
3. Zarrati et al
4. Hou et al
5. Groosi et al
6. Busto & Dumbser
7. Norouzi et al
8. Wu & Yang



## روش پژوهش

### ۱. معادلات حاکم بر جریان

معادلات حاکم بر حرکت سیال، معادلات ناویراستوکس است که شامل معادله بقای جرم (معادله پیوستگی) و معادلات اندازه حرکت است. معادلات دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق با انتگرال‌گیری از معادلات ناویراستوکس از کف کانال تا سطح آزاد آب و با فرض توزیع فشار هیدرواستاتیک مطابق روابط (۱) تا (۳) به دست می‌آیند (ابوت و باسکو<sup>۱</sup>، ۱۹۸۹):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial (up)}{\partial x} + \frac{\partial (vp)}{\partial y} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial p}{\partial y} \right) - \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial (uq)}{\partial x} + \frac{\partial (vq)}{\partial y} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) - \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 h^2} \quad (3)$$

در روابط فوق،  $u$  و  $v$  به ترتیب مؤلفه سرعت متوسط جریان در راستای  $x$  و  $y$ ،  $g$  شتاب ثقل،  $\eta$  تراز سطح آب،  $h$  عمق آب،  $v_t$  لزجت گردابه‌ای،  $C$  ضریب شزی ( $C=h^{1/6}/n_m$ )،  $n_m$  ضریب مانینگ،  $p$  و  $q$  به ترتیب شار سرعت در راستای  $x$  و  $y$  ( $p=uh$ ,  $q=vh$ ) می‌باشند. با استفاده از یک مدل آشفتگی مانند مدل صفر معادله‌ای طول اختلاط، مدل سهموی عمقی، مدل اسماکورینسکی و مدل  $k-\epsilon$  می‌توان لزجت گردابه‌ای را محاسبه کرد. در پژوهش حاضر از مدل سهموی متوسط‌گیری شده در عمق مطابق رابطه (۴) استفاده شده است (رودی<sup>۲</sup>، ۱۹۸۴).

$$v_t = C_t U_* h \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $U_*$  سرعت برشی بستر،  $U_* = [C(u^2 + v^2)]^{1/2}$  و  $C_t$  یک ضریب تجربی است که مطابق تحقیقات الدر<sup>۳</sup> (۱۹۵۹) بین  $0.3$  تا  $1$  است. در این تحقیق این ضریب  $0.7$  در نظر گرفته شده است.

معادلات اندازه حرکت در جهات  $x$  و  $y$  دارای چهار بخش مختلف است این بخش‌ها شامل ترم جابه‌جایی، ثقلی، پخشیدگی و ترم اصطکاک بستر است.

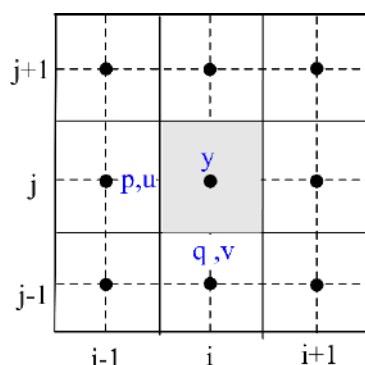
### ۲. شبکه‌بندی فضای حل

تولید شبکه یا مش، از مهم‌ترین عملیات اولیه برای حل معادلات حاکم است. در روش‌های عددی، معادلات حاکم بر روی یک شبکه محاسباتی جداسازی و حل می‌شوند. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان شبکه محاسباتی را به دودسته شبکه‌های منظم و نامنظم تقسیم‌بندی کرد. شبکه‌بندی منظم مستطیلی شامل خطوط هم‌نوعی هستند که به طور موازی در مجاورت هم قرار گرفته‌اند و در هیچ نقطه‌ای در طول محدوده موردنظر یکدیگر را قطع نمی‌کنند. این خاصیت امکان شماره‌گذاری متوالی خطوط را فراهم می‌سازد، لذا در این نوع شبکه‌بندی می‌توان موقعیت یک گره را در میدان دوبعدی با دو مشخصه  $(i, j)$  تعیین کرد. باتوجه‌به اینکه شبکه‌بندی منظم از ساده‌ترین نوع مش‌بندی است و می‌توان برای اکثر روش‌های عددی از آن استفاده کرد، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما استفاده از شبکه‌بندی نامنظم این امکان را در اختیار استفاده‌کننده قرار می‌دهد که برای محیط‌هایی با هندسه پیچیده و نامنظم از این نوع مش‌بندی استفاده کرد. در این نوع شبکه‌بندی المان‌ها می‌توانند به اشکال مختلف انتخاب شوند لیکن به طور معمول در مسائل دوبعدی از اشکال چهارضلعی نامنظم و یا مثلثی استفاده می‌شود. جداسازی معادلات حاکم و حل عددی بر روی شبکه‌های نامنظم مشکل و پیچیده است. باتوجه‌به اینکه هدف این پژوهش ارائه مدل عددی ساده و کارآمد است، بنابراین در این تحقیق از شبکه‌بندی منظم مستطیلی به ابعاد  $dx$  و  $dy$  مطابق شکل (۱) استفاده شد. متغیر تراز سطح آب،  $y$ ، در مرکز سلول و سرعت ( $u$  و  $v$ ) و شار سرعت ( $p$  و  $q$ ) در مرزهای هر سلول تعریف شده است.

1. Abbott &amp; Basco

2. Rodi

3. Elder



شکل ۱. شبکه بندی منظم مورد استفاده برای جداسازی معادلات حاکم بر جریان

### ۳. روش تنصیف زمان

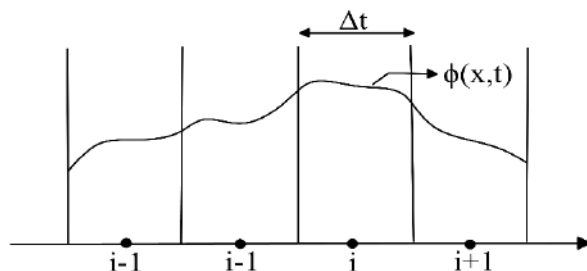
باتوجه به اینکه بخش عمده معادلات حاکم بر جریان را معادله انتقال (جابجایی و پخش) تشکیل می دهد، بنابراین حل آن اهمیت زیادی در حل کل معادلات دارد و دقت مدل عددی به طور فوق العاده ای تحت تأثیر روش حل ترم های جابجایی و پخش است. در این تحقیق برای جداسازی اجزاء مختلف معادلات از روش تنصیف زمان استفاده می شود. در این روش هر گام زمانی به چند مرحله تقسیم می شود. در اولین مرحله، ترم های جابجایی مربوط به معادله اندازه حرکت در راستای  $x$  و  $y$  برای محاسبه ی شارهای سرعت  $(p, q)$  حل می شوند و سپس ترم های پخشیدگی در هر دو راستا جداسازی و حل می شوند. لازم به ذکر است در حل ترم های پخشیدگی، از نتایج خروجی مربوط به مرحله اول استفاده می شود. سپس ترم اصطکاک از معادله اندازه حرکت به صورت روش صریح جداسازی می شود. در مرحله بعد، به صورت هم زمان معادله پیوستگی و باقی مانده معادله اندازه حرکت یعنی ترم ثقلی جداسازی و حل می شوند. یکی از مزایای روش تنصیف زمان امکان تفکیک و حل مجزای ترم های مختلف معادلات با استفاده از بهترین شمای عددی است. همچنین از دیگر مزیت های این روش سادگی و فهم راحت آن است، زیرا در همه مراحل معادلات به صورت یک بعدی حل می شوند (نمین، ۲۰۰۳).

### ۴. حل ترم جابجایی معادله اندازه حرکت جریان

اولین گام جهت حل معادلات دوبعدی جریان، حل ترم جابجایی است. همان طور که قبلاً بیان شد، یکی از مزیت های روش تنصیف زمان آن است که معادلات حاکم بر جریان دوبعدی را در هر مرحله به صورت یک بعدی حل می کند. معادله جابجایی در فضای یک بعدی در راستای  $x$  به صورت کلی مطابق رابطه (۵) است (ورستیگ و مالاسکرا<sup>۱</sup>، ۱۹۹۵):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u\phi)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $\phi$  کمیتی است که توسط ترم جابجایی منتقل می شود و می تواند شار سرعت یعنی  $p$  یا  $q$  باشد. به منظور حل عددی ابتدا محدوده حل به چندین سلول مطابق شکل (۲) تقسیم می شود و انتگرال گیری معادلات حاکم بر روی هر سلول انجام می شود. با انتگرال گیری از معادله یک بعدی جابجایی برای بازه زمانی  $t$  تا  $t + \Delta t$  و روی سلول  $i$ ، رابطه (۶) که به روش فروم معروف است، استخراج می شود (پاتنکار<sup>۲</sup>، ۱۹۸۰؛ و نمین، ۲۰۰۳):



شکل ۲. توزیع کمیت انتقالی در ترم جابجایی و شبکه بندی یک بعدی

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n - (\varepsilon_e \phi_e - \varepsilon_w \phi_w) \quad (۶)$$

که در آن:

$$\phi_e = \frac{1}{4} [(1 - \varepsilon_e) \phi_{i+1}^n + 4\phi_i^n - (1 - \varepsilon_e) \phi_{i-1}^n] \quad (۷)$$

$$\phi_w = \frac{1}{4} [(1 - \varepsilon_w) \phi_i^n + 4\phi_{i-1}^n - (1 - \varepsilon_e) \phi_{i-2}^n] \quad (۸)$$

$$\varepsilon_w = \left( u_{i-\frac{1}{2}}^n \right) \Delta x / \Delta t, \quad \varepsilon_e = \left( u_{i+\frac{1}{2}}^n \right) \Delta x / \Delta t \quad (۹)$$

که در آن  $\varepsilon$  عدد کورانت جریان است. باتوجه به اینکه در پژوهش حاضر، مقادیر عمق در مرکز سلول و سرعت در مرزهای هر سلول تعریف شده است، بنابراین سرعت  $u_{i+1/2}$  در معادلات فوق، از میانگین سرعت دو سلول  $i$  و  $i+1$  به دست می‌آید. در روش تنصیف زمان، ترم‌های جابجایی از معادلات اندازه حرکت در جهت  $X$  و  $Y$  برای شارهای سرعت یعنی  $p$  و  $q$  به صورت یک بعدی مطابق روابط (۱۰) تا (۱۴) حل می‌شوند. لازم به ذکر است ابتدا متغیر  $p$  در جهت  $X$  و سپس در جهت  $Y$  حل می‌شود و متغیر  $q$  نیز به همین ترتیب جداسازی و حل می‌شود.

$$\frac{p_{i,j}^{(1)} - p_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{\partial(up)}{\partial x} = 0 \quad (۱۰)$$

$$\frac{p_{i,j}^{(2)} - p_{i,j}^{(1)}}{\Delta t} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} = 0 \quad (۱۱)$$

$$\frac{p_{i,j}^{(2)} - p_{i,j}^{(1)}}{\Delta t} + \frac{\partial(vp)}{\partial y} = 0 \quad (۱۲)$$

$$\frac{q_{i,j}^{(1)} - q_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{\partial(uq)}{\partial x} = 0 \quad (۱۳)$$

$$\frac{q_{i,j}^{(2)} - q_{i,j}^{(1)}}{\Delta t} + \frac{\partial(vq)}{\partial y} = 0 \quad (۱۴)$$

## ۵. حل ترم پخشیدگی معادله اندازه حرکت جریان

طبیعت به طور ذاتی علاقه‌مند به همسان کردن محیط و ایجاد تعادل در آن از طریق مکانیسم مولکولی و یا آشفتگی است. در معادله پخشیدگی جریان از هر دو سلول پایین دست و بالادست خود تأثیر می‌پذیرد. معادله‌ی پخشیدگی در فضای یک بعدی به صورت رابطه (۱۵) است.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (۱۵)$$

در پدیده پخشیدگی شار عبوری از مرزها همیشه از سلول با کمیت بالاتر به سمت سلول با کمیت پایین تر در جریان است. میزان شار جاری شده به دو عامل گرادین کمیت  $(\partial \phi / \partial x)$  و ضریب دیفیوژن  $D$  بستگی دارد. به مقدار  $(D \partial \phi / \partial x)$  شار پخشیدگی گفته می‌شود. با انتگرال گیری از معادله فوق روی سلول  $i$  برای بازه زمانی  $t$  تا  $t + \Delta t$  خواهیم داشت:

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n + \frac{1}{2} \frac{D \Delta t}{\Delta x^2} (\phi_{i+1}^{n+1} - 2\phi_i^{n+1} + \phi_{i-1}^{n+1}) + \frac{1}{2} \frac{D \Delta t}{\Delta x^2} (\phi_{i+1}^n - 2\phi_i^n + \phi_{i-1}^n) \quad (۱۶)$$

همان طور که مشخص است، معادله بالا یک معادله با سه مجهول است. معادله فوق را می‌توان به صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفت:

$$A_1 \phi_{i-1}^{n+1} + A_2 \phi_i^{n+1} + A_3 \phi_{i+1}^{n+1} = A_0 \quad (۱۷)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} A_1 &= -\frac{1}{2} D \Delta t / \Delta x^2 \\ A_2 &= 1 + D \Delta t / \Delta x^2 \\ A_3 &= -\frac{1}{2} D \Delta t / \Delta x^2 \end{aligned} \quad (18)$$

$$A_0 = \phi_i^n + \frac{1}{2} D \Delta t / \Delta x^2 (\phi_{i+1}^n - 2\phi_i^n + \phi_{i-1}^n)$$

با نوشتن این معادله برای تمامی نقاط و اعمال شرایط مرزی به تعداد گره های محاسباتی، معادله وجود دارد و یک ماتریس سه قطری حاصل می شود. به طوری که اعداد روی این قطر اصلی مخالف سفر و بقیه سلول های ماتریس صفر است. بهترین روش برای حل این گونه دستگاه های معادلات استفاده از روش الگوریتم TDMA است. در این تحقیق برای حل دوبعدی معادله پخشیدگی، ترم های پخشیدگی از معادلات اندازه حرکت در جهت  $x$  و  $y$  برای شارهای سرعت یعنی  $p$  و  $q$  به صورت یک بعدی مطابق روابط (۱۹) تا (۲۲) حل می شوند. لازم به ذکر است ابتدا متغیر  $p$  در جهت  $x$  و سپس در جهت  $y$  حل می شود و متغیر  $q$  نیز به همین ترتیب جداسازی و حل می شود.

$$\frac{p_{ij}^{(3)} - p_{ij}^{(2)}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (19)$$

$$\frac{p_{ij}^{(4)} - p_{ij}^{(3)}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial p}{\partial y} \right) \quad (20)$$

$$\frac{q_{ij}^{(3)} - q_{ij}^{(2)}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( v_t \frac{\partial q}{\partial x} \right) \quad (21)$$

$$\frac{q_{ij}^{(4)} - q_{ij}^{(3)}}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( v_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) \quad (22)$$

#### ۶. حل ترم اصطکاک معادله اندازه حرکت جریان

زبری در معادلات آب های کم عمق تأثیر خود را به صورت پارامتر اصطکاک نشان می دهد. ترم اصطکاک بعد از حل ترم های جابجایی و پخشیدگی از معادله اندازه حرکت در جهت  $x$  و  $y$ ، جدا می شود و به صورت رابطه (۲۳) و (۲۴) روی مرزهای سلول حل می شود:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{-g p \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \longrightarrow \frac{p_{ij}^{(5)} - p_{ij}^{(4)}}{\Delta t} = \frac{-g p_{ij}^{(4)} \sqrt{p_{ij}^{(4)2} + q_{ij}^{(4)2}}}{C^2 h^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{-g q \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \longrightarrow \frac{q_{ij}^{(5)} - q_{ij}^{(4)}}{\Delta t} = \frac{-g q_{ij}^{(4)} \sqrt{p_{ij}^{(4)2} + q_{ij}^{(4)2}}}{C^2 h^2} \quad (24)$$

#### ۷. حل معادله پیوستگی و ترم ثقلی در معادلات اندازه حرکت

پس از حل معادله انتقال و اثر ترم اصطکاک از معادله حرکت جریان، معادلات (۲۵) تا (۲۷) باقی می ماند.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + g h \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + g h \frac{\partial \xi}{\partial y} = 0 \quad (27)$$

حل همزمان معادلات فوق باعث تشکیل یک ماتریس ۵ قطری می شود که حل این ماتریس به صورت مستقیم پیچیده و زمان بر است؛ لذا در این پژوهش برای حل این معادلات از الگوریتم ADI استفاده می شود. طبق این الگوریتم در وضعیت جاروب در جهت  $x$ ، ابتدا معادلات (۲۵) و (۲۶) به صورت همزمان جداسازی و حل می شود و یک ماتریس سه قطری ایجاد می شود که با

حل این ماتریس از طریق الگوریتم TDMA، تراز سطح آب از  $\xi^n$  به  $\xi^{n+1/2}$  و شار سرعت در جهت x از  $p^{(5)}$  به  $p^{n+1}$  به تبدیل می‌شود و در وضعیت جاروب در جهت y، تراز سطح آب از  $\xi^{n+1/2}$  به  $\xi^{n+1}$  و شار سرعت در جهت y از  $q^{(5)}$  به  $q^{n+1}$  به تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است معادلات اندازه حرکت روی مرز سلول‌ها جداسازی می‌شود. برای جداسازی معادلات در وضعیت جاروب در جهت x خواهیم داشت:

$$\frac{p_{i+1/2,j}^{n+1} - p_{i+1/2,j}^{(5)}}{\Delta t} + \frac{gh_{i+1/2,j}^n}{\Delta x} \left[ \theta \left( \xi_{i+1,j}^{n+1/2} - \xi_{i,j}^{n+1/2} \right) + (1-\theta) \left( \xi_{i+1,j}^n - \xi_{i,j}^n \right) \right] = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\xi_{i,j}^{n+1/2} - \xi_{i,j}^n}{\Delta t/2} + \frac{p_{i+1/2,j}^{n+1} - p_{i-1/2,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{q_{i,j+1/2}^{(5)} - q_{i,j-1/2}^{(5)}}{\Delta y} = 0 \quad (29)$$

در رابطه فوق،  $\theta$  متغیر است که می‌توان شمای عددی را صریح و یا ضمنی کرد. در صورتی که این متغیر یک باشد، شمای عددی به صورت ضمنی حل می‌شود. در این پژوهش مقدار آن  $0/5$  در نظر گرفته شده است. با جایگزینی معادله (29) در (28) و ساده‌سازی تراز سطح آب در گام  $n+1/2$  به صورت رابطه (30) محاسبه می‌شود:

$$A_1 \xi_{i-1,j}^{n+1/2} + A_2 \xi_{i,j}^{n+1/2} + A_3 \xi_{i+1,j}^{n+1/2} = A_0 \quad (30)$$

که در آن متغیرهای  $A_0$  تا  $A_3$  به صورت رابطه (31) است:

$$A_1 = \frac{-\theta g \Delta t h_{i-1/2,j}^n}{\Delta x^2}$$

$$A_2 = \frac{2}{\Delta t} + \frac{\theta g \Delta t h_{i+1/2,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{\theta g \Delta t h_{i-1/2,j}^n}{\Delta x^2} \quad (31)$$

$$A_0 = \frac{2\xi_{i,j}^n}{\Delta t} - \frac{1}{\Delta x} (p_{i+1/2,j}^{(5)} - p_{i-1/2,j}^{(5)}) - \frac{1}{\Delta y} (q_{i,j+1/2}^{(5)} - q_{i,j-1/2}^{(5)}) - \frac{(1-\theta)g\Delta t h_{i-1/2,j}^n}{\Delta x^2} \left( \xi_{i,j}^n - \xi_{i-1,j}^n \right) + \frac{(1-\theta)g\Delta t h_{i+1/2,j}^n}{\Delta x^2} \left( \xi_{i+1,j}^n - \xi_{i,j}^n \right)$$

برای جداسازی معادله پیوستگی و باقی‌مانده اندازه حرکت در وضعیت جاروب در جهت y خواهیم داشت:

$$\frac{q_{i,j+1/2}^{n+1} - q_{i,j+1/2}^{(5)}}{\Delta t} + \frac{gh_{i,j+1/2}^n}{\Delta y} \left[ \theta \left( \xi_{i,j+1}^{n+1} - \xi_{i,j}^{n+1} \right) + (1-\theta) \left( \xi_{i,j+1}^{n+1/2} - \xi_{i,j}^{n+1/2} \right) \right] = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\xi_{i,j}^{n+1/2} - \xi_{i,j}^{n+1}}{\Delta t/2} + \frac{p_{i+1/2,j}^{n+1} - p_{i-1/2,j}^{n+1}}{\Delta x} + \frac{q_{i,j+1/2}^{n+1} - q_{i,j-1/2}^{n+1}}{\Delta y} = 0 \quad (33)$$

با جایگزینی معادله (33) در (32) و ساده‌سازی تراز سطح آب در گام  $n+1$  به صورت رابطه (34) محاسبه می‌شود:

$$B_1 \xi_{i,j-1}^{n+1/2} + B_2 \xi_{i,j}^{n+1/2} + B_3 \xi_{i,j+1}^{n+1/2} = B_0 \quad (34)$$

که در آن متغیرهای  $B_0$  تا  $B_3$  به صورت رابطه (35) است:

$$B_1 = \frac{-\theta g \Delta t h_{i,j-1/2}^n}{\Delta y^2}$$

$$B_2 = \frac{2}{\Delta t} + \frac{\theta g \Delta t h_{i,j+1/2}^n}{\Delta y^2} + \frac{\theta g \Delta t h_{i,j-1/2}^n}{\Delta y^2}$$

$$B_3 = \frac{-\theta g \Delta t h_{i,j+1/2}^n}{\Delta y^2} \quad (35)$$

$$B_0 = \frac{2\xi_{i,j}^{n+1/2}}{\Delta t} - \frac{1}{\Delta y} (p_{i+1/2,j}^{n+1} - p_{i-1/2,j}^{n+1}) - \frac{1}{\Delta y} (q_{i,j+1/2}^{(5)} - q_{i,j-1/2}^{(5)}) - \frac{(1-\theta)g\Delta th_{i,j-1/2}^n}{\Delta y^2} (\xi_{i,j}^{n+1/2} - \xi_{i,j-1}^{n+1/2}) + \frac{(1-\theta)g\Delta th_{i,j+1/2}^n}{\Delta y^2} (\xi_{i,j+1}^{n+1/2} - \xi_{i,j}^{n+1/2})$$

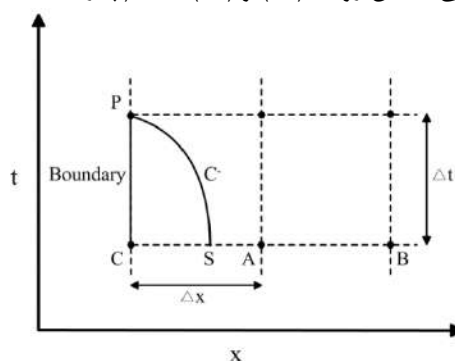
### ۸. شرایط اولیه و شرایط مرزی جریان

در روش های عددی، لازم است برای متغیرهای اصلی یعنی عمق، شار سرعت در جهت x و y در تمام نقاط شبکه، مقداری را به عنوان مقادیر اولیه در نظر گرفت تا به عنوان فرض اولیه در مدل قرار داده شود و در روند انجام محاسبات تصحیح و به جواب واقعی برسد. لازم به ذکر است که اثر مقادیر شرایط اولیه با توجه به شرایط مرزی و حل معادلات، به تدریج از بین رفته و تأثیری در جواب نهایی ندارد. اما شرایط اولیه مناسب، نقش بسزایی در سرعت همگرایی مدل داشته و باعث کاهش زمان انجام محاسبات می شود. به همین منظور انتخاب شرایط اولیه نزدیک به مقادیر واقعی، بهترین انتخاب خواهد بود. شرایط اولیه در تحقیق حاضر شامل عمق آب مشخص و مقادیر صفر برای شارهای سرعت یعنی p و q است.

معادلات ارائه شده در بخش قبلی را می توان برای نقاط میانی شبکه ای محاسباتی استفاده نمود تا عمق و شارهای سرعت در هر لحظه محاسبه شود. این معادلات را نمی توان در مرزهای بالادست و پایین دست شبکه ای محاسباتی استفاده نمود، زیرا که هیچ نقطه ای شبکه ای در خارج محدوده ی جریان وجود ندارد. روش های مختلفی برای در نظر گرفتن مرزها در محاسبات پیشنهاد شده است که روش خطوط مشخصه با فواصل معین یکی از آنها است و نتایج قابل قبولی دارد (چدري، ۲۰۰۸). در این روش، معادله ی مشخصه ی مثبت به طور هم زمان با شرایط مرزی پایین دست و معادله ی مشخصه ی منفی نیز هم زمان با شرایط مرزی بالادست حل می شود.

### ۹. شرایط مرزی بالادست

منحنی مشخصه ی منفی ( $C^-$ ) در راستای x و شبکه محاسباتی در مرز بالادست به صورت شکل (۳) آورده شده است. همچنین معادله ی منحنی مشخصه ی منفی مطابق روابط (۳۶) و (۳۷) است (چدري، ۲۰۰۸):



شکل ۳. شبکه ی محاسباتی برای مرز بالادست در روش فواصل معین

$$\frac{dx}{dt} = u - C \quad (36)$$

$$\frac{dh}{dt} - \frac{C}{g} \frac{du}{dt} = -C(S_{0x} - S_{fx}) \quad (37)$$

در روابط فوق، u سرعت جریان در راستای x و h عمق جریان و C سرعت موج ثقی،  $S_{0x}$  شیب کف کانال و  $S_{fx}$  شیب خط انرژی در جهت x است که با استفاده از رابطه مانینگ قابل محاسبه است. با استفاده از تقریب تفاضل محدود پیشرو برای رابطه ی (۳۶) و میان یابی خطی مقادیر معلوم در نقاط C و A، سرعت و عمق جریان در نقطه ی S مطابق روابط (۳۸) و (۳۹) محاسبه می شود:

$$u_S = \frac{u_C - \Delta t(u_C C_A - u_A C_C) / \Delta x}{1 - \Delta t(u_C - u_A - C_C + C_A) / \Delta x} \quad (38)$$

$$h_S = h_C + \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_S - C_S)(h_C - h_A) \quad (39)$$

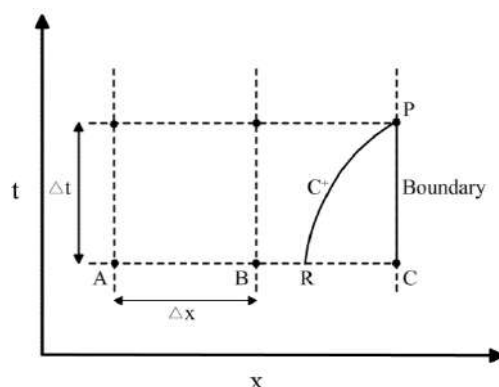
همچنین با منفعل سازی رابطه‌ی (۳۷) و جایگزینی روابط (۳۸) و (۳۹) در معادله‌ی حاصل، رابطه‌ی عمق و سرعت جریان با استفاده از منحنی مشخصه‌ی منفی برای مرز بالادست مطابق معادله‌ی (۴۰) ارائه می‌شود:

$$u_P = u_S - \left(\frac{g}{C_S}\right) h_S + g \Delta t (S_{0x} - S_{fx})_S + \left(\frac{g}{C_S}\right) h_P \quad (40)$$

به منظور تعیین سرعت و عمق جریان در مرز بالادست، رابطه‌ی (۴۰) به صورت هم زمان با شرایط مرزی بالادست حل می‌گردد و در هر گام زمانی پارامترهای هیدرولیکی در مرز بالادست تعیین می‌شود. به عنوان مثال در صورتی که عمق آب در مرز بالادست معلوم باشد، با جایگزینی عمق آب در رابطه (۴۰) مقدار سرعت در مرز بالادست به دست می‌آید. لازم به ذکر است برای محاسبه  $V_p$  در مرز نیز می‌توان منحنی مشخصه‌ی منفی ( $C^-$ ) در راستای  $y$  را نوشت و رابطه عمق و سرعت در جهت  $y$  در مرز را به دست آورد. در صورت وجود دیوار در شبیه سازی، سرعت عمود بر مرز صفر در نظر گرفته می‌شود و سرعت مماس بر مرز نیز می‌توان طبق قانون عدم لغزش برابر صفر فرض کرد.

### ۱۰. شرایط مرزی پایین دست

منحنی مشخصه‌ی مثبت ( $C^+$ ) در راستای  $x$  و شبکه محاسباتی در مرز پایین دست به صورت شکل (۴) آورده شده است. همچنین معادله‌ی منحنی مشخصه‌ی منفی مطابق روابط (۴۱) و (۴۲) است (چدري، ۲۰۰۸):



شکل ۴. شبکه‌ی محاسباتی برای مرز پایین دست در روش فواصل معین

$$\frac{dx}{dt} = u + C \quad (41)$$

$$\frac{dh}{dt} + \frac{C}{g} \frac{du}{dt} = C(S_{0x} - S_f) \quad (42)$$

با استفاده از تقریب‌های تفاضل محدود پیشرو برای رابطه‌ی (۴۱) و میان یابی خطی مقادیر معلوم در نقاط  $B$  و  $C$ ، سرعت و عمق جریان در نقطه‌ی  $R$  مطابق روابط (۴۳) و (۴۴) است

$$u_R = \frac{u_C - \Delta t(u_C C_A - u_A C_C) / \Delta x}{1 + \Delta t(u_C - u_A + C_C - C_A) / \Delta x} \quad (43)$$

$$h_R = h_C - \frac{\Delta t}{\Delta x} (u_R + C_R)(h_C - h_A) \quad (44)$$

همچنین با منفصل سازی رابطه‌ی (۴۲) و جایگزینی روابط (۴۳) و (۴۴) در معادله‌ی حاصل، رابطه‌ی عمق و سرعت جریان با استفاده از منحنی مشخصه‌ی مثبت برای مرز پایین دست مطابق معادله‌ی (۴۵) ارائه می‌شود:

$$u_P = u_R + \left(\frac{g}{C_R}\right) h_R + g \Delta t (S_{0x} - S_f)_R - \left(\frac{g}{C_R}\right) h_P \quad (45)$$



رابطه‌ی (۴۵) دارای دو مجهول  $u_p$  و  $h_p$  است که با استفاده از یک معادله‌ی دیگر که در شرایط مرزی پایین دست صادق است، به صورت هم‌زمان برای هر گام زمانی حل می‌شود.

### ۱.۱. مدل سازی نواحی نزدیک دیوار

جریان نزدیک به یک دیوار صلب مثل کناره کانال و یا رودخانه، پیچیده است. یک زیر لایه لزج نزدیک دیواره وجود دارد و در نزدیکی آن زبری بر هیدرولیک جریان تاثیر دارد. به دلیل آنکه گرادیان سرعت در نزدیکی دیوار زیاد است، حل جریان در زیر لایه لزج در نزدیکی جداره نیازمند ریز کردن اندازه شبکه در مجاورت دیوار است که باعث زمان بر بودن اجرای مدل می‌شود. بجای حل کردن جریان در زیر لایه لزج می‌توان از تابع دیوار استفاده کرد. بدین منظور برای محاسبه سرعت در اولین نقطه شبکه مجاور دیوار از رابطه (۴۶) استفاده می‌شود:

$$\tau_w = \lambda_w U_p \quad (46)$$

که در آن  $U_p$  برآیند سرعت در راستای دیوار و در اولین گره مجاور دیوار،  $\tau_w$  تنش برشی روی دیوار و  $\lambda_w$  ضریبی است که برای مدل های آشفتگی صفر معادله‌ای مطابق رابطه (۴۷) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_w = \frac{\kappa u_*^+}{\ln(E y_p^+)} \quad (47)$$

که در آن،  $u_*^+$  سرعت برشی نزدیک دیواره،  $k$  ضریب فون - کارمن،  $y_p^+$  عدد بدون بعد دیوار ( $y_p^+ = u_* y_p / \nu$ )،  $y_p$  فاصله عمودی اولین گره تا دیوار و  $E$  پارامتر مربوط به زبری است که برای دیواره صاف برابر  $8/432$  و برای دیواره زبر به عدد رینولدز زبری بستگی دارد (سیبیچی و برادشاو، ۱۹۷۷).

باتوجه به اینکه تابع دیواره برای  $y_p^+ > 30$  و کوچکتر از ۱۰۰ صادق است، در این تحقیق فاصله اولین گره محاسباتی تا دیوار طوری انتخاب شد که مقدار عدد بدون بعد دیوار در محدوده فوق قرار گیرد.

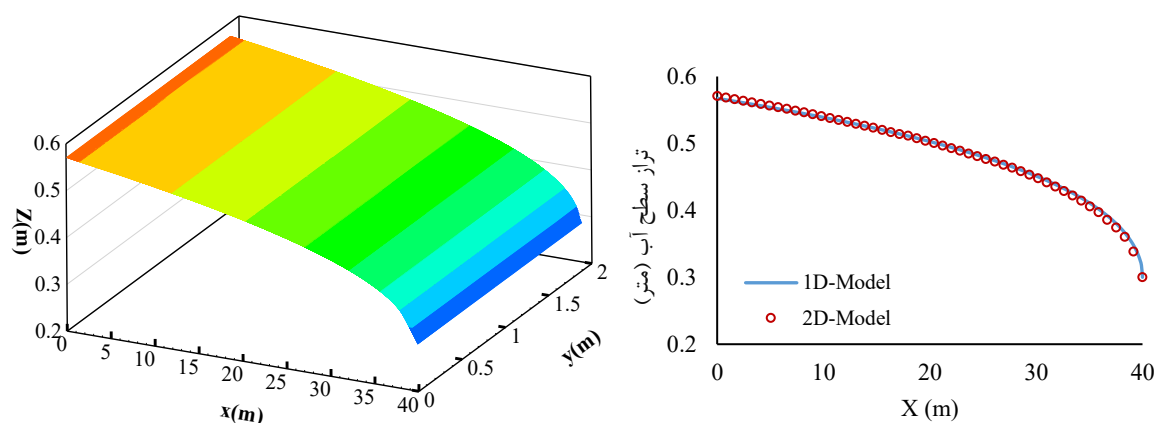
## یافته های پژوهش

### ۱. ارزیابی مدل عددی

به منظور صحت سنجی مدل دوبعدی، آزمون های مختلفی که حل آن ها به صورت تئوری یا اندازه گیری های آزمایشگاهی موجود است، مورد استفاده قرار گرفت. پروفیل طولی جریان متغیر تدریجی در کانال مستطیلی، پرش هیدرولیکی، بازشدگی ناگهانی کانال و شکست نامتقارن سد، آزمون هایی هستند که برای ارزیابی مدل در نظر گرفته شده است.

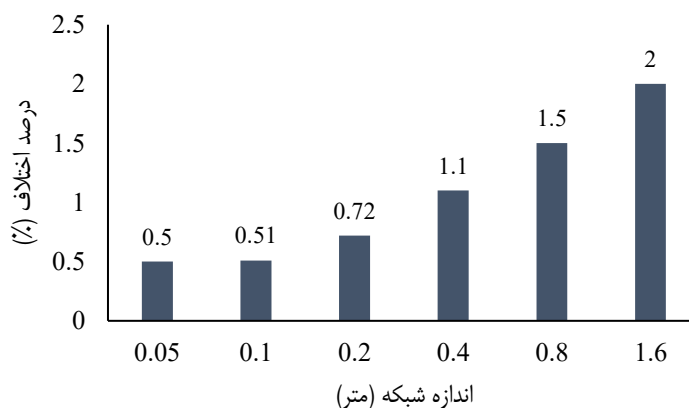
### ۲. شبیه سازی جریان متغیر تدریجی در کانال مستطیلی

اولین آزمون جهت صحت سنجی مدل دوبعدی توسعه یافته، شبیه سازی جریان متغیر تدریجی در یک کانال مستطیلی در نظر گرفته شد. در این آزمون یک کانال مستطیلی به طول ۴۰ متر، عرض ۲ متر، ضریب زبری مانینگ برابر  $0/03$  و شیب بستر  $0/0005$  که دبی یک مترمکعب بر ثانیه را از خود عبور می دهد، در نظر گرفته شد. عمق جریان در پایین دست کانال  $0/3$  متر به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شد. باتوجه به اینکه، عمق نرمال و بحرانی در این کانال به ترتیب  $0/787$  و  $0/294$  متر است، پروفیل M2 در کلنال ایجاد می شود. اندازه گام های مکانی و زمانی به ترتیب  $0/1$  متر و  $0/01$  ثانیه در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن مفروضات فوق، مدل عددی دوبعدی اجرا و پروفیل سطح آب در شکل (۵) آورده شده است. همچنین با استفاده از روش رانج کوتا، پروفیل سطح آب به صورت یک بعدی حل آورده شده است.

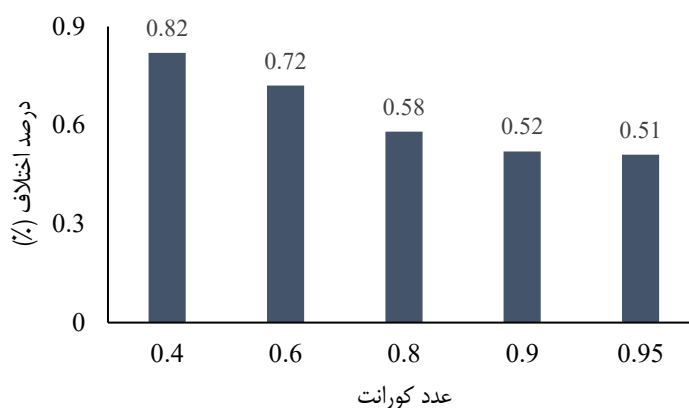


شکل ۵. مقایسه پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل دوبعدی و یک‌بعدی

مقایسه نتایج خروجی مدل‌ها برای پروفیل جریان متغیر تدریجی نشان می‌دهد که مدل عددی دوبعدی با دقت مناسبی سطح آزاد آب را شبیه‌سازی کرده است. متوسط درصد اختلاف مدل دوبعدی و یک‌بعدی برای شبیه‌سازی پروفیل سطح آب ۵۱٪ درصد است که نشان دهنده قابل اعتماد بودن نتایج شبیه‌سازی است. یکی از عوامل موثر بر دقت نتایج اندازه شبکه محاسباتی است. به منظور حساسیت‌سنجی نتایج مدل عددی نسبت به اندازه شبکه، مدل عددی برای گام‌های مکانی مختلف اجرا شد و درصد اختلاف پروفیل آب مدل دوبعدی با یک‌بعدی محاسبه و در شکل (۶) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در صورتی که اندازه گام مکانی کمتر از ۰/۱ متر شود، دقت مدل عددی دوبعدی تغییری نمی‌کند و فقط مدل زمان اجرای برنامه افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است برای کلیه شبیه‌سازی‌ها، اندازه شبکه‌ی بهینه بر اساس روش حساسیت‌سنجی تعیین و لحاظ شده است. اندازه گام زمانی نیز بر اساس عدد کورانت انتخاب شد، بدین ترتیب که بعد از تعیین اندازه شبکه، اندازه گام زمانی طوری انتخاب شد که عدد کورانت کمتر از یک و بیش از ۰/۹ شود. در شکل (۷) حساسیت مدل عددی نسبت به عدد کورانت آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تاثیر عدد کورانت بر دقت مدل عددی کمتر از اندازه گام مکانی است و هر چقدر عدد کورانت به یک نزدیک شود، دقت مدل عددی بهتر می‌شود.



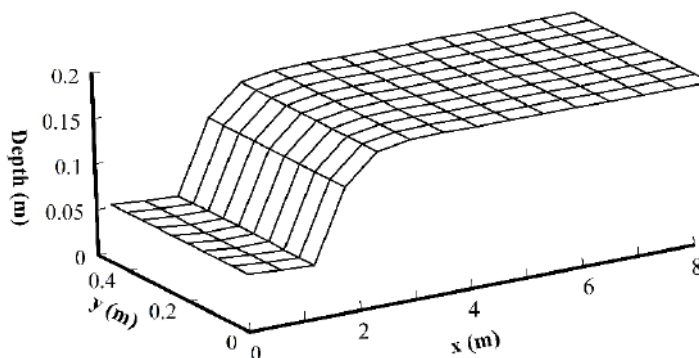
شکل ۶. حساسیت نتایج مدل عددی نسبت به اندازه شبکه



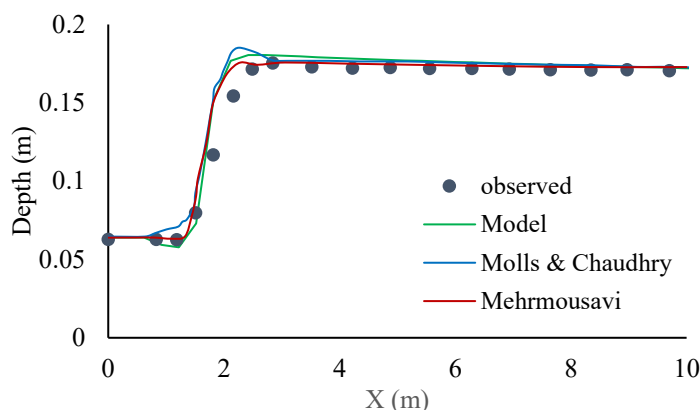
شکل ۷. حساسیت نتایج مدل عددی نسبت به عدد کورانت

### ۳. شبیه سازی پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی

به منظور ارزیابی توفانای مدل عددی، پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی افقی با طول ۱۳/۹ متر، عرض ۰/۴۵ متر و دبی ۰/۰۵۳ مترمکعب بر ثانیه شبیه سازی شد و با داده های آزمایشگاهی گارانگیک<sup>۱</sup> (۱۹۸۸) و همچنین خروجی مدل عددی مولز و چدری<sup>۲</sup> (۱۹۹۵) مقایسه شد. لازم به ذکر است، سرعت و عمق آب در مرز بالادست به ترتیب ۱/۸۲ متر بر ثانیه و ۰/۰۶۴ متر، و عمق آب در مرز پایین دست ۰/۱۷ متر است. عدد فروود جریان در بالادست برابر ۲/۳ است. در شکل (۸) نمای دوبعدی پرش هیدرولیکی شبیه سازی شده توسط مدل عددی آورده شده است. همچنین شکل (۹) مقایسه پروفیل پرش هیدرولیکی شبیه سازی شده توسط مدل عددی حاضر و نتایج آزمایشگاهی گارانگیک (۱۹۸۸)، مدل مولز و چادری (۱۹۹۵) و مدل مهرموسوی (۱۳۹۷) را نشان می دهد.



شکل ۸. شبیه سازی پرش هیدرولیکی در کانال مستطیلی توسط مدل عددی دوبعدی حاضر

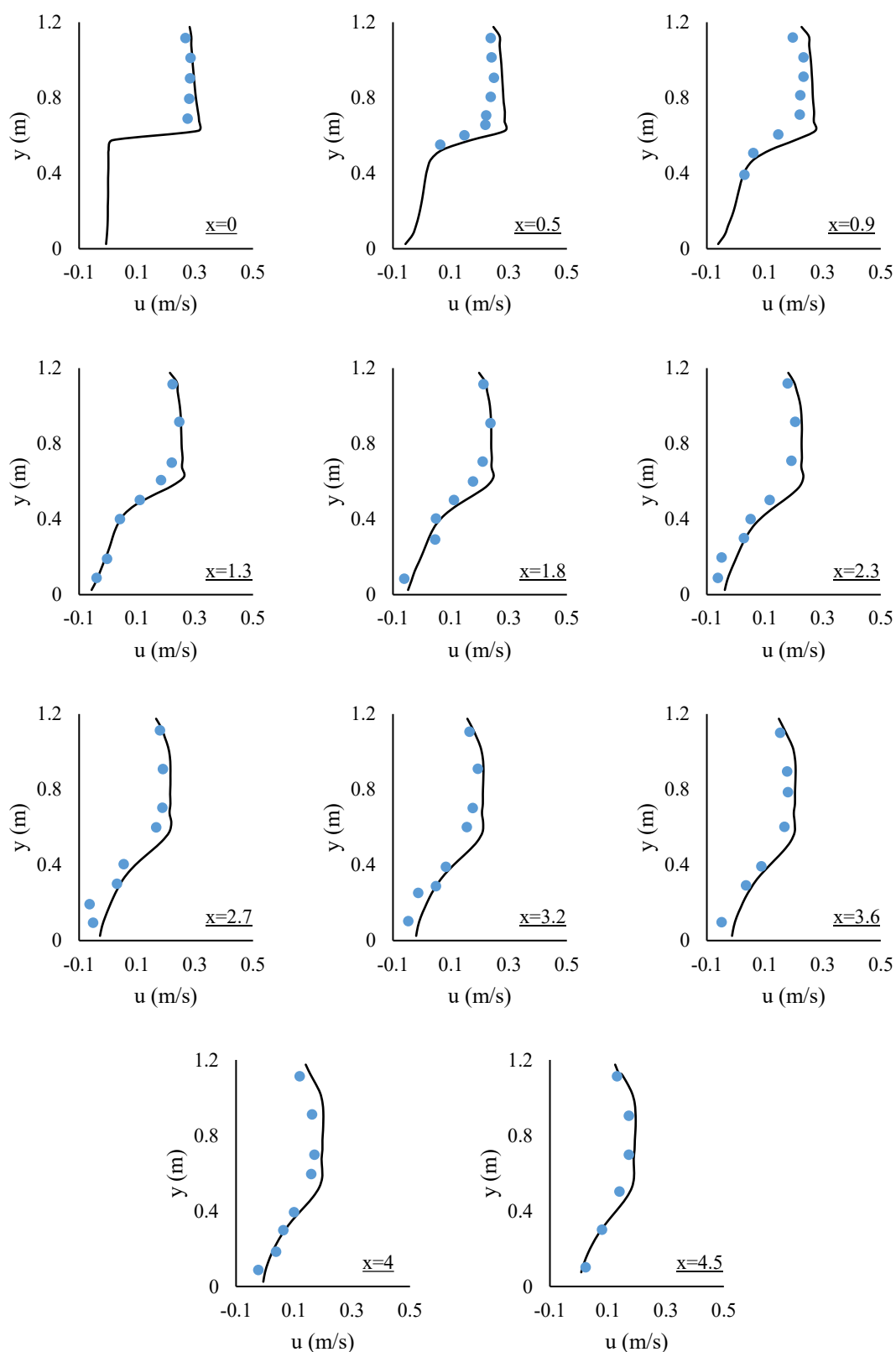


شکل ۹. پروفیل پرش هیدرولیکی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های عددی

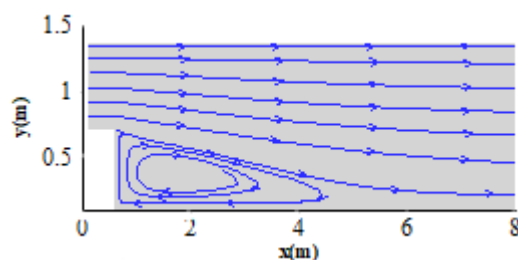
تطابق خوبی بین مدل عددی و مدل آزمایشگاهی وجود دارد، پرش هیدرولیکی در مدل آزمایشگاهی و عددی در ۱/۵ متری از ابتدای کانال شروع می‌شود. متوسط درصد خطا شبیه‌سازی پروفیل سطح آب توسط مدل عددی حاضر از ابتدای کانال تا انتهای پرش ۲/۷ درصد است. مقایسه نتایج مدل‌های عددی نشان می‌دهد، مدل مهرموسوی (۱۳۹۷) بدلیل استفاده از نقاط درگیر بیشتر در محاسبات در نقاطی که شیب پروفیل سطح آب زیاد است (شروع پرش و انتهای پرش) دقت بهتری دارد. اما مزیتی که مدل عددی حاضر دارد، جداسازی معادلات دوبعدی جریان به صورت یک‌بعدی است که کد نویسی آن را بسیار ساده می‌کند.

#### ۴. شبیه‌سازی جریان در بازشدگی ناگهانی کانال

دقت مدل عددی با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اکسی<sup>۱</sup> (۱۹۹۴) در یک کانال با بازشدگی ناگهانی ارزیابی شد. عرض کانال در این آزمایش ۰/۶ متر است که به یکباره به ۱/۲ متر افزایش می‌یابد. ضریب مانینگ بستر و دیواره کانال ۰/۰۱۳، شیب کف کانال ۰/۰۰۱ و دبی عبوری از کانال ۱۸/۱۵ لیتر بر ثانیه است. عمق جریان در مرز پایین دست ۰/۱۰۱ متر و سرعت جریان در ورودی ۰/۳ متر بر ثانیه است. در شکل (۱۰) نتایج خروجی مدل عددی حاضر و داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت آورده شده است. لازم به ذکر است مقطع  $x=0$ ، دقیقاً در ابتدای محل بازشدگی کانال است. همانگونه که در شکل مشخص است در ناحیه بعد از بازشدگی عرض، نتایج حاصل از مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقداری اختلاف دارد که علت این امر استفاده از مدل‌های صفر معادله‌ای برای بررسی ناحیه تلاطم جریان است، اما با دور شدن از این ناحیه مدل حاضر به خوبی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق دارد. شکل (۱۰) میدان جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی را نشان می‌دهد.



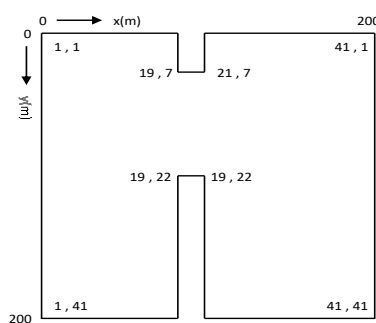
شکل ۱۰. پروفیل محاسباتی و مشاهداتی سرعت جریان در عرض کانال برای آزمایش بازشدگی ناگهانی کانال



شکل ۱۱. میدان جریان شبیه شده توسط مدل عددی در آزمایش باز شدگی ناگهانی کانال

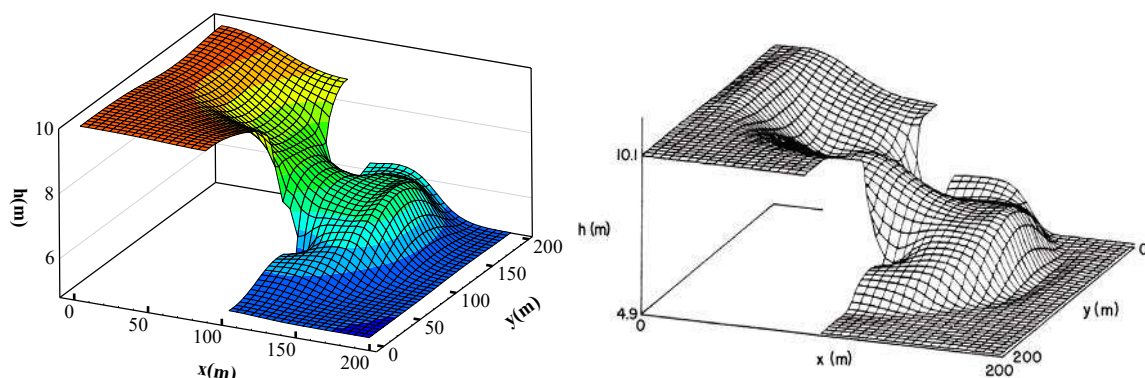
## ۵. شبیه‌سازی دوبعدی شکست سد

به‌منظور شبیه‌سازی جریان غیرماندگار حاصل از شکست نامتقارن سد، یک مخزن به طول و عرض ۲۰۰ متر با کف افقی در نظر گرفته شد. مطابق شکل (۱۲) در قسمتی از این مخزن دریچه‌ای با عرض ۷۵ متر عمود بر جهت جریان وجود دارد. ضخامت این دریچه در جهت جریان ۱۰ متر است. در لحظه اولیه عمق آب در بالادست و پایین‌دست مخزن به ترتیب ۱۰ و ۵ متر و جریان ساکن است. سرعت صفر در ابتدا و انتهای کانال به‌عنوان شرط مرزی بالادست و پایین‌دست در نظر گرفت شد. به‌منظور مش‌بندی از شبکه‌هایی با طول و عرض ۵ متر استفاده شده است. پروفیل سطح آب ۷/۵ ثانیه پس از شکست سد با مدل عددی حاضر شبیه‌سازی شد. لازم به ذکر است که این شبیه‌سازی برای صحت‌سنجی مدل‌های عددی مختلف توسط محققین انجام شده است.



شکل ۱۲. پلان دوبعدی مخزن برای مسئله شکست نامتقارن دوبعدی سد

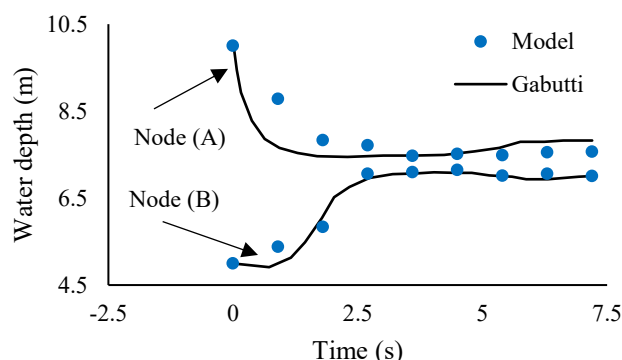
به‌منظور بررسی کارایی مدل عددی حاضر، از نتایج عددی روش گابوتی که توسط چدیری (۲۰۰۸) ارائه شده است، استفاده شد. نتایج حاصل از روش گابوتی و همچنین مدل حاضر برای شبیه‌سازی شکست سد برای زمان ۷/۵ ثانیه در شکل (۱۳) آورده شده است.



شکل ۱۳. پروفیل شبیه‌سازی سطح آب به الف) روش گابوتی ب) مدل حاضر ۷/۵ ثانیه پس از شکست سد

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، پروفیل سطح آب شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی حاضر با مدل ارائه شده توسط چدیری (۲۰۰۸) تطابق خوبی دارند. به‌منظور ارزیابی و مقایسه دو روش عددی، هیدروگراف عمق ناشی از شکست سد در دونقطه A با

مختصات (۹۰ و ۱۰۰) در بالادست سد و نقطه B با مختصات (۱۰۰ و ۱۱۰) واقع در پایین دست سد توسط دو مدل عددی استخراج و در شکل (۱۴) آورده شده است.

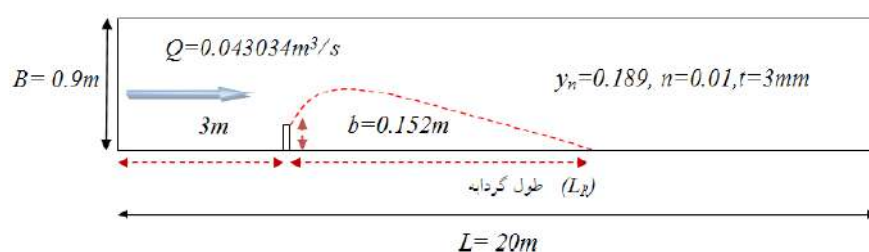


شکل ۱۴. هیدروگراف عمق آب شبیه سازی شده ناشی از شکست سد توسط روش های عددی

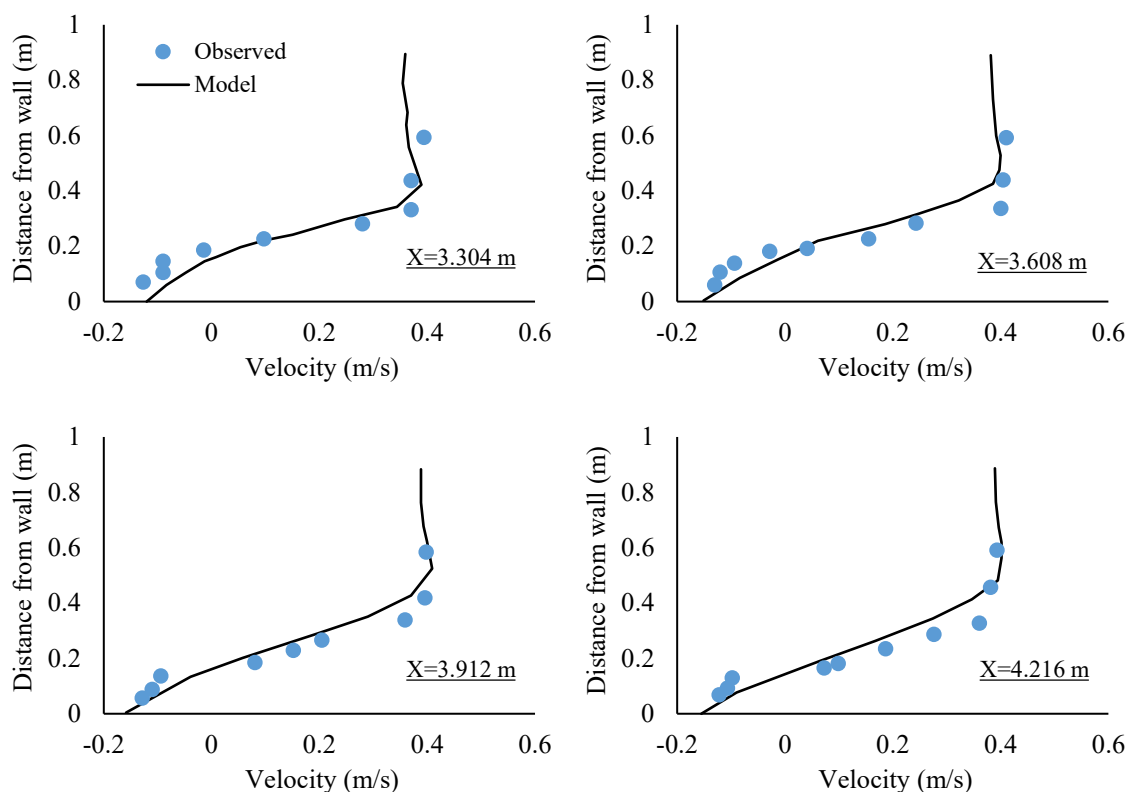
متوسط درصد اختلاف بین مدل حاضر و روش گابوتی در برآورد هیدروگراف عمق آب ناشی از شکست نامتقارن سد ۳/۵ درصد است که نشان دهنده تطابق خوب دو مدل عددی است.

#### ۶. شبیه سازی جریان اطراف آبشکن

اعتبارسنجی حاضر بر اساس کار آزمایشگاهی راجاراتنام و نواچکو<sup>۱</sup> (۱۹۸۳) صورت گرفته است. در این آزمون، یک کانال مستقیم به طول ۲۰ متر و عرض ۰/۹ متر در نظر گرفته می شود. یک آبشکن به طول ۰/۱۵۲ متر و ضخامت ۳ میلی متر به صورت قائم در موقعیت ۳ متری از ورودی کانال و بر روی ساحل راست کانال تعبیه شده است. ضریب زبری مانینگ برای کانال یاد شده برابر با ۰/۰۱ برآورد می گردد. عمق جریان و دبی عبوری از کانال به ترتیب برابر ۰/۱۸۹ متر و ۰/۰۴۳۰۳ مترمکعب بر ثانیه است. شکل (۱۵) مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی را نشان می دهد، همچنین در شکل (۱۶) پروفیل سرعت مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل عددی برای چهار مقطع عرضی بعد از آبشکن آورده شده است.



شکل ۱۵. مشخصات هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی راجاراتنام و نواچکو (۱۹۸۳)



شکل ۱۶. مقایسه پروفیل سرعت مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل عددی برای آزمون جریان اطراف آبشکن متوسط درصد خطا در شبیه‌سازی جریان در اطراف دیواره آبشکن برای مقاطع ۳/۳۰۴، ۳/۶۰۸، ۳/۹۱۲ و ۴/۲۱۶ متری از ابتدای کانال به ترتیب ۸/۷۱، ۱۲/۸، ۱۱/۹ و ۱۲/۱ درصد است که نشان دهنده دقت مناسب مدل عددی در شبیه‌سازی جریان اطراف آبشکن است.

### بحث

در این تحقیق یک مدل عددی دوبعدی جریان در پلان برای مجاری روباز تهیه شد. معادلات حاکم بر جریان در این مدل با استفاده از روش احجام محدود و شمای تنصیف زمان توسعه جداسازی و حل شد. برای گسسته‌سازی از شبکه منظم مستطیلی استفاده شد. به منظور حل معادلات حاکم بر جریان در این مدل، هر گام زمانی به چند مرحله تقسیم می‌شود. در اولین مرحله، ترم‌های جابجایی مربوط به معادله اندازه حرکت برای محاسبه‌ی شارهای سرعت حل می‌شوند و سپس ترم‌های پخشیدگی به صورت ضمنی حل می‌شوند. لازم به ذکر است در حل ترم‌های پخشیدگی، از نتایج خروجی مربوط به مرحله اول استفاده می‌شود. در مرحله بعد، ترم اصطکاک از معادله اندازه حرکت جدا و به صورت صریح حل می‌شود. در آخرین مرحله، به صورت هم‌زمان معادله پیوستگی و باقی مانده معادله اندازه حرکت یعنی ترم ثقلی جداسازی و حل می‌شوند. از مزیت‌های این روش سادگی و فهم راحت آن است، زیرا در همه مراحل معادلات به صورت یک‌بعدی حل می‌شوند. آزمون‌های شبیه‌سازی جریان متغیر تدریجی، پرش هیدرولیکی در یک کانال مستطیلی، هیدرولیک جریان در بازشدگی ناگهانی کانال و شبیه‌سازی دوبعدی شکست سد به منظور صحت‌سنجی مدل عددی انجام شد.

### نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج خروجی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی و حل تحلیلی نشان می‌دهد که مدل توسعه‌یافته، قادر به شبیه‌سازی جریان برای شرایط مختلف است. مدل‌سازی آشفتگی در مدل حاضر با استفاده از مدل سه‌موی متوسط‌گیری شده در عمق انجام شده است. در مواردی که آشفتگی جریان زیاد باشد، دقت این مدل آشفتگی کاهش می‌یابد. پیشنهاد می‌شود که مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  به مدل عددی اضافه شود که دقت آن در شبیه‌سازی جریان بیشتر شود.



### ملاحظات اخلاقی

#### پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

#### تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

## منابع

- تیموری یگانه، مریم، حیدری، محمد مهدی، و قبادیان، رسول. (۱۴۰۲). شبیه‌سازی دوبعدی الگوی جریان در مجاری روباز با استفاده از شمای تنصیف زمان. *مجله مهندسی آبیاری و آب/ایران*. ۱۳، ۲۴۷-۲۳۱.  
[https://www.waterjournal.ir/article\\_177279.html](https://www.waterjournal.ir/article_177279.html)
- سرورام، حامد، و شمسایی، ابوالفضل. (۱۳۹۲). مدل‌سازی دو بعدی جریان ناشی از شکست سد با روش ضمنی شبه لاگرانژی. *مجله پژوهش آب/ایران*، ۷(۱۳)، ۳۰-۲۱.  
[https://iwrj.sku.ac.ir/article\\_10953.html](https://iwrj.sku.ac.ir/article_10953.html)
- قبادیان، رسول. (۱۳۹۸). بکارگیری روش‌های پرش قورباغه و لکس در مدل‌سازی دوبعدی شکست سد به روش تفاضل محدود صریح. *مجله دانش آب و خاک*، ۲۹(۲)، ۸۵-۹۹.  
[https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_9273.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_9273.html)
- مهر موسوی، زهرا. (۱۳۹۷). توسعه مدل عددی دوبعدی (میانگین‌گیری شده در عمق) شبیه‌ساز جریان غیرماندگار و کاربرد آن در شبیه‌سازی شکست سد، پایان‌نامه دکتری، رشته سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
- مهر موسوی، زهرا، قبادیان، رسول، و جوان، میترا. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر ضریب شکل مخزن بر امواج ناشی از شکست سد با استفاده از روش‌های پرش قورباغه و لکس در مختصات منحنی‌الخط. *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۶(۱)، ۱۵۰-۱۳۱.  
[https://jwsc.gau.ac.ir/article\\_4554.html](https://jwsc.gau.ac.ir/article_4554.html)

## References

- Abbott, M.B., & Basco, D. (1989). Computational Fluid Mechanics. An Introduction for Engineers. *Longman Scientific & Technical publications*, New York, United States. <https://archive.org/details/computationalflu0000abbo>
- Anastasio, K., & Chan, C.T. (1997). Solution of the 2D shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 24(11), 1225–1245. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(19970615\)24:11](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0363(19970615)24:11)
- Busto, S., & Dumbser, M. (2022). A staggered semi-implicit hybrid finite volume / finite element scheme for the shallow water equations at all Froude numbers. *Applied Numerical Mathematics*, 175, 108-132. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2022.02.005>
- Cebeci, T., & Bradshaw, P. (1977). Momentum transfer in boundary layers. *Washington : Hemisphere Publications, Corp*, Washington, D.C, United States. <https://archive.org/details/momentumtransfer00cebe>
- Chaudhry, M.H. (2008). Open-Channel Flow. *Springer New York*, New York, USA. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-68648-6>
- Elder, J.W. (1959). The dispersion of marked fluid particles in turbulent shear flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 5(4), 544–560. <https://doi.org/10.1017/S0022112059000374>
- Fennema, R., & Chaudhry, M. (1990). Explicit methods for 2D transient free-surface flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8), 1013–1034. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1990\)116:8\(1013\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:8(1013))
- Gharangik, A.M. (1988). Numerical simulation of hydraulic jump. MSc thesis, *Washington state university*, Pullman, Washington.
- Ghobadian, R. (2019). Application of lax and leap-frog schemes in two-dimensional modeling of dam breaking using explicit finite-difference method. *Journal of Water and Soil Science*, (29)2, 85-99. [https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_9273.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_9273.html) (In Persian)
- Groosi, F., Cusica, A., Shademani, M., & Shakibaeinia, A. (2022). Experimental and numerical investigations of dam break flow over dry and wet beds. *International Journal of Mechanical Sciences*, 215, 106946. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106946>
- Hou, J., Liang, Q., Zhang, H. & Hinkelmann, R. (2015). An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations. *Environmental Modeling & Software*, 66, 131-152. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.007>
- Mehrmousavi, Z. (2019). Development of unsteady flow 2D numerical model and its implementation on dam-break simulation. Ph.D Thesis, *Faculty of Agricultural Sciences and Engineering of Razi University*, Kermanshah, Iran. (In Persian)
- Mehrmousavi, Z., Ghobadian, R., & Javan, M. (2019) Investigation of the effect of reservoir shape coefficient on dam-break waves using Leap-Frog and Lax methods in curvilinear coordinates. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(1), 131-150. [https://jwsc.gau.ac.ir/article\\_4554.html](https://jwsc.gau.ac.ir/article_4554.html) (In Persian)
- Molls, T., & Chaudhry, M.H. (1995). Depth-averaged open-channel flow model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121 (6), 453-465. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:6\(453\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:6(453))
- Namin, M.M. (2003). A fully three dimensional non hydrostatic free surface flow model for hydro environmental predictions. Ph.D. Thesis, *Cardiff School of Engineering of Cardiff University*, Cardiff, United Kingdom.
- Namin, M.M., Lin B. & Falconer, R. A. (2004) Modeling estuarine and coastal flows using an unstructured triangular finite volume algorithm. *Advances in Water Resources*, 27(12), 1179-1197. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.08.012>

- Norouzi, S., Kolahdoozan, M., & Zarrati, A.R. (2022). Development of a 2D depth-averaged model for calculating scouring and deposition in alluvial streams, *Scientia Iranica*, 29(3), 941-950. <https://doi.org/10.24200/sci.2022.50705.1830>
- Nujic, M. (1995). Efficient implementation of non-oscillatory scheme for the computation of free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research*. 33(1), 101-11. <https://doi.org/10.1080/00221689509498687>
- Papanicolaou, A.N., Elhakeem, M. & Wardman, B. (2011). Calibration and verification of a 2D-hydrodynamic model for simulating flow around bendway weir structures. *Journal of Hydraulic Engineering*. 137(1), 75-89. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000280](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000280)
- Patankar, S. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow, *CRC Press*, Boca Raton, USA. <https://doi.org/10.1201/9781482234213>
- Rajaratnam, N., & Nwachukwu B.A. (1983). Flow near Groin-like structures. *Journal of Hydraulics Division*. 109, 463-480. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(463\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(463))
- Rodi, W. (1984). Turbulence models and their application in hydraulics: A state of the art review. *Balkema Publishers*, Leiden, The Netherlands. [https://www.researchgate.net/publication/327303543\\_Turbulence\\_models\\_and\\_their\\_application\\_in\\_hydraulics\\_A\\_state-of-the-art\\_review\\_third\\_edition](https://www.researchgate.net/publication/327303543_Turbulence_models_and_their_application_in_hydraulics_A_state-of-the-art_review_third_edition)
- Sarveram, H., & Shamsaie, A. (2013). A implicit, semi-lagrangian method for 2D numerical modeling of dam break flow. *Iranian Water Research Journal*, 7(13), 21-30. [https://iwrrj.sku.ac.ir/article\\_10953.html](https://iwrrj.sku.ac.ir/article_10953.html) (In Persian)
- Teymouri yeganeh, M., Heidari, M.M., & Ghobadian, R. (2023) Two-dimensional simulation of flow pattern in open channels using time-splitting method. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 13, 2131-247. [https://www.waterjournal.ir/article\\_177279.html](https://www.waterjournal.ir/article_177279.html) (In Persian)
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method, *Pearson Education Limited Publications*, England, United Kingdom. [https://www.researchgate.net/profile/GhassanSmaisim/post/FEM\\_mesh\\_generator/attachment/59d655b479197b80779acc78/AS%3A526908706508800%401502636233004/download/110+Versteeg+2007+an+introduction+to+computational+fluid+dynamics+the+finite+volume+method+2nd+edition.pdf](https://www.researchgate.net/profile/GhassanSmaisim/post/FEM_mesh_generator/attachment/59d655b479197b80779acc78/AS%3A526908706508800%401502636233004/download/110+Versteeg+2007+an+introduction+to+computational+fluid+dynamics+the+finite+volume+method+2nd+edition.pdf)
- Wu, W. (2004). Depth-averaged two-dimensional numerical modeling of unsteady flow and nonuniform sediment transport in open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1013-1024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:10\(1013\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:10(1013))
- Wu, Y., & Yang, Z. (2024) A depth-averaged SPH-FV landslide dynamic model for evaluating hazard zones. *Computers and Geotechnics*, 169, 106210. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106210>
- Xie, B.L. (1994). Flow data measured in a channel with sudden expansion. *Wuhan University*, China. <https://www.ncche.olemiss.edu/sites/default/files/files/docs/cche2d/validation.pdf>
- Zarrati, A.R., Tamai, N., & Jin, Y.C. (2005) Mathematical modeling of meandering channels with a generalized depth averaged model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 131, 467-475. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:6\(467\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:6(467))
- Zhang, S., Ghidaoui, M., & Gray, W. (2003). A kinetic flux vector splitting scheme for shallow water flows. *Advances in Water Resources*, 26(6), 635-47. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(03\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(03)00029-0)



## Long-term precipitation forecasting for Ilam city using a hybrid machine learning model

Navid Moradpoor<sup>1</sup> , Mohsen Najarchi<sup>2</sup> , and Mohammad Mirhosseini Hezave<sup>3</sup>

1. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. Email: [navid.moradpoor@gmail.com](mailto:navid.moradpoor@gmail.com)

2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. Email: [mohsennajarchi@yahoo.com](mailto:mohsennajarchi@yahoo.com)

3. Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. Email: [mo.mirhosseini@iau.ac.ir](mailto:mo.mirhosseini@iau.ac.ir)

### Article Info

**Article type:** Research Article

#### Article history:

Received 29 November 2024

Received in revised form 31

January 2025

Accepted 18 April 2025

Available online 22 June 2025

#### Keywords:

machine learning,

long-term rainfall,

Ilam city,

ORELM,

activation function.

### ABSTRACT

**Objective:** In this study, we seek to predict long-term precipitation in Ilam city using artificial intelligence algorithms.

**Method:** In this study, the long-term precipitation of Ilam city over a 44-year period from 1980 to 2024 is simulated by a hybrid machine learning model.

Ilam Province has a special topographic situation with uneven precipitation distribution due to its location at different latitudes. In this study, after collecting data, the average number of months of rainfall for each of the studied stations for a certain period is obtained. A machine learning model is used for prediction. In the first step, the observed data are normalized and the best normalization coefficients are obtained for this study. Approximately 70% of the observed data are used to train the artificial intelligence models and the remaining 30% are used to test them. Subsequently, the optimal number of hidden layer neurons along with the best activation function of the ORELM model are selected by implementing a trial and error process. In this study, the regularization parameter of the ORELM model is also optimized. Also, using the autocorrelation function (ACF), the effective lags of time series data are identified and using them, fourteen WORELM models are developed.

**Results:** According to the simulation results, the correlation coefficient (R) values for the ELM and ORELM models are obtained as 0.618 and 0.952, respectively. While the NSC values for ELM and ORELM are estimated as -1.137 and -1.138, respectively. In other words, the ORELM model shows more accuracy compared to the ELM model. In addition, the ORELM hybrid learning machine model is identified as the best model for simulating precipitation values in Ilam city.

**Conclusions:** The results of the ORELM hybrid model were compared with the ELM and ORELM artificial intelligence models, which showed that the ORELM hybrid model performed better.

**Cite this article:** Moradpoor, N., Najarchi, M., & Mirhosseini Hezave, M. (2025). Long-term precipitation forecasting for Ilam city using a hybrid machine learning model. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5 (2), 116-133. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11698.1153>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11698.1153>

Publisher: Razi University.

## **Introduction**

Precipitation is the most important hydrological phenomenon, the increase or decrease of which during different periods can cause noticeable changes in the ecosystem of the region and population change. In recent years, due to climate change, the amount of precipitation in different regions of Iran has undergone significant changes. Therefore, estimating and modeling precipitation in this arid and semi-arid country is of great importance. The great importance of precipitation has led climatologists to seek methods to express the characteristics of precipitation. In this study, we seek to predict long-term precipitation in Ilam city using artificial intelligence algorithms.

## **Method**

In this study, the long-term precipitation of Ilam city over a 44-year period from 1980 to 2024 is simulated by a hybrid machine learning model.

Ilam Province has a special topographic situation with uneven precipitation distribution due to its location at different latitudes. In this study, after collecting data, the average number of months of rainfall for each of the studied stations for a certain period is obtained. A machine learning model is used for prediction. In the first step, the observed data are normalized and the best normalization coefficients are obtained for this study. Approximately 70% of the observed data are used to train the artificial intelligence models and the remaining 30% are used to test them. Subsequently, the optimal number of hidden layer neurons along with the best activation function of the ORELM model are selected by implementing a trial and error process. In this study, the regularization parameter of the ORELM model is also optimized. Also, using the autocorrelation function (ACF), the effective lags of time series data are identified and using them, fourteen WORELM models are developed.

## **Extreme Learning Machine (ELM)**

The ELM is an easy-to-implement machine learning algorithm. It is designed to overcome the weaknesses of traditional learning methods such as training-based algorithms based on exchange-oriented models. The algorithm consists of three layers: input, hidden, and output. The ELM is a learning method for training an artificial neural network (ANN) that randomly generates input weights ( $w$ ) and bias ( $b$ ).

## **Outlier Robust Extreme Learning Machine (ORELM)**

In the precipitation modeling, peak values are of considerable importance and, given that the number of peak points is less than other points, they are known as outliers. In fact, outliers comprise a very small percentage of the training samples and generally the focus of modeling using the ELM will be on other samples.

## **Results**

In this section of the present study, the performances of the extreme learning machine (ELM) and outlier robust extreme learning machine (ORELM) models are compared. The results of the comparison of the calculated statistical indices for the ELM and ORELM models are depicted in Figure 1.

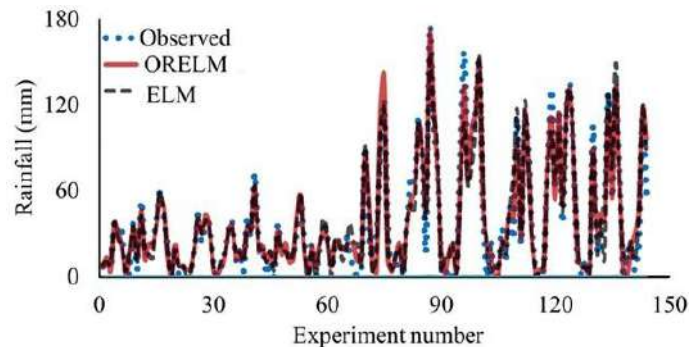


Figure 1. Comparison between the performance of different machine models such as ELM and ORELM for estimating precipitation.

According to the simulation results, the correlation coefficient (R) values for the ELM and ORELM models are obtained as 0.618 and 0.952, respectively. While the NSC values for ELM and ORELM are estimated as -1.137 and -1.138, respectively.

The comparison between the performance of different machine learning models such as ELM and ORELM for estimating precipitation values can be seen in Figure 1.

Based on the modeling results, the combined models display better performance compared to simple models. In other words, the ORELM model shows more accuracy compared to the ELM model. In addition, the ORELM hybrid learning machine model is identified as the best model for simulating precipitation values in Ilam city.

## Conclusions

In this study, a hybrid learning machine model was developed to simulate long-term precipitation values of Ilam city over a long-term period of 44 years from 1980 to 2024. To define the artificial intelligence model, the ELM model and the outlier robust extreme learning machine (ORELM) were combined. Initially, the time series data were divided into two groups: training (70%) and test (30). Subsequently, the observed data were normalized. This normalization was performed to facilitate the simulation of rainfall values by the artificial intelligence model. The examination of different activation functions showed that tribas was the best activation function for simulating precipitation values of Ilam city by this hybrid learning machine. ORELM 9 model was introduced as the superior model and the VAF, R and NSC values for it were 157.93, 0.965 and 0.925, respectively. Also, lags number (t-1), (t-2), (t-3) and (t-10) were identified as the most effective lags of the precipitation time series data of Ilam city. Finally, the results of the ORELM hybrid model were compared with the ELM and ORELM artificial intelligence models, which showed that the ORELM hybrid model performed better.

## 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.





## پیش‌بینی بارش درازمدت شهر ایلام با کاربرد مدل ترکیبی ماشین یادگیری

نوید مرادپور<sup>۱</sup>، محسن نجارچی<sup>۲</sup>، و محمد میرحسینی هزاوه<sup>۳</sup>

۱. گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: [navid.moradpoor@gmail.com](mailto:navid.moradpoor@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: [mohsen.najarchi@iau.ac.ir](mailto:mohsen.najarchi@iau.ac.ir)

۳. گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران. رایانامه: [mo.mirhosseini@iau.ac.ir](mailto:mo.mirhosseini@iau.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

**هدف:** هدف از این پژوهش، پیش‌بینی بارش درازمدت شهر ایلام با کاربرد مدل ترکیبی ماشین یادگیری است.

**نوع مقاله:** مقاله پژوهشی

**روش پژوهش:** در این مطالعه، بارندگی درازمدت شهر ایلام در یک بازه زمانی ۴۴ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ توسط یک مدل ترکیبی ماشین یادگیری شبیه‌سازی گردید. استان ایلام از لحاظ قرارگیری در عرض‌های مختلف جغرافیایی، وضعیت توپوگرافی خاص دارای پراکندگی بارش ناموزونی است. در این تحقیق بعد از جمع‌آوری داده‌ها ابتدا میانگین تعداد ماه‌های بارش برای هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه برای یک دوره‌ی به دست آمد. جهت پیش‌بینی از مدل ماشین یادگیری استفاده گردید. در گام نخست داده‌های مشاهداتی نرمال‌سازی شدند و بهترین ضرایب نرمال‌سازی برای این مطالعه بدست آمدند. تقریباً ۷۰ درصد داده‌های مشاهداتی برای آموزش مدل‌های هوش مصنوعی و مابقی ۳۰٪ نیز جهت آزمون آنها به کار گرفته شدند. در ادامه، تعداد بهینه نرون‌های لایه مخفی به همراه بهترین تابع فعال‌سازی مدل ORELM با اجرای یک پروسه سعی و خطا انتخاب شدند. در این مطالعه، پارامتر منظم‌سازی (regularization parameter) مدل ORELM نیز بهینه‌سازی گردید. همچنین، با استفاده از تابع خودهمبستگی (ACF) تاخیرهای موثر داده‌های سری زمانی شناسایی شدند و با استفاده از این تاخیرها، چهارده مدل ORELM توسعه داده شدند.

**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۹/۰۹

**تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۳/۱۱/۱۲

**تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۱/۲۹

**تاریخ انتشار:** ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

### کلیدواژه‌ها:

ماشین یادگیری،  
بارش درازمدت،  
شهر ایلام،  
ORELM،  
تابع فعال‌سازی.

**یافته‌ها:** بررسی توابع فعال‌سازی مختلف نشان داد که tribas بهترین تابع فعال‌سازی جهت شبیه‌سازی بارش‌های شهر ایلام توسط این ماشین یادگیری ترکیبی بود. مدل 9 ORELM به‌عنوان مدل برتر معرفی شد و مقادیر R، VAF و NSC برای آن به ترتیب برابر با ۰/۹۶۵، ۰/۹۲۵ و ۰/۹۳۱ بودند. همچنین، تاخیرهای شماره (t-1)، (t-2)، (t-3) و (t-10) به‌عنوان مؤثرترین تاخیرهای داده‌های سری زمانی بارش شهر ایلام شناسایی شدند. در انتها نتایج مدل ترکیبی ORELM با مدل‌های هوش مصنوعی ELM و ORELM مقایسه گردید که مقایسه مذکور نشان دهنده عملکرد بهتر مدل ترکیبی ORELM بود.

**نتیجه‌گیری:** با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌های ده‌گانه ORELM، بهترین مدل به همراه مؤثرترین تاخیرهای داده‌های سری زمانی معرفی گردید. در انتها نتایج مدل ترکیبی ORELM با سایر ماشین‌های یادگیری نیز مقایسه شد که این مقایسه حاکی از عملکرد بهتر مدل ORELM بود.

**استناد:** مرادپور، نوید؛ نجارچی، محسن؛ و میرحسینی هزاوه، محمد. (۱۴۰۴). پیش‌بینی بارش درازمدت شهر ایلام با کاربرد مدل ترکیبی ماشین یادگیری. فناوری

های پیشرفته در بهره وری آب، ۵ (۲)، ۱۱۶-۱۳۳.

<http://doi.org/10.22126/atwe.2025.11698.1153>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

### مقدمه

تعیین الگوی توزیع زمانی بارش به منظور برآورد سیلاب، تعیین پتانسیل سیل خیزی رگبارها و همچنین طراحی سیستم زهکشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. طراحی بیشتر تأسیسات مهندسی نیازمند درک جامع و کامل از میزان نزولات جوی به اضافه توزیع زمانی آن‌ها هست. یکی از اصلی‌ترین عوامل مورد نیاز در تهیه مدل و توسعه هیدرولوژیکی حوضه‌های آبریز شناخت توزیع زمانی بارش هست. باتوجه به اینکه ایران در منطقه‌ای خشک واقع شده است، تغییرات زمانی بارش در آن بسیار زیاد است. باینکه میانگین بارش سالانه ایران حدود ۲۵۰ میلی‌متر است و کمتر از ۱/۳ متوسط بارش جهانی است؛ اما در سال‌های پربارش تا ۳۸۰ میلی‌متر هم بارش دریافت کرده و در مقابل در سال‌های کم‌بارش، بارش دریافتی کشور از ۱۵۵ میلی‌متر هم کمتر بوده است. این تغییرات نه تنها در دوره‌های زمانی بلند بلکه در فواصل زمانی کوتاه نیز دیده می‌شوند. بر اساس نتایج بسیاری از طبقه‌بندی‌های آب‌وهوایی، این سرزمین دارای آب‌وهوایی خشک و نیمه‌خشک هست. پایین بودن میزان ریزش‌های جوی، تغییرپذیری بالا و نوسانات شدید بارندگی از سالی به سال دیگر، از ویژگی‌های بارز آب‌وهوایی ایران به شمار می‌رود. علاوه بر ویژگی‌های بارز آب‌وهوایی ایران به شمار می‌رود. علاوه بر ویژگی‌های فوق، توزیع فضایی بارش در این سرزمین نیز، همگون بوده و از غرب به شرق و از شمال به جنوب از میزان آن کاسته می‌شود (باساک<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). علاوه بر توزیع زمانی نایک‌نواخت بارش، تفاوت‌های مکانی آن در ایران نیز بسیار زیاد است. این تفاوت‌ها از یک سو به طبیعت رفتار مکانی بارش بازمی‌گردد که اساساً متغیری سرکش است و تغییرات مکانی شدیدی از خود نشان می‌دهد. از سوی دیگر، تنوع منشأ بارش در نقاط مختلف ایران سبب شده است تا در هر منطقه مقدار ریزش‌های جوی و زمان بارش متفاوت باشد. به‌ویژه در سال‌هایی که کشور از بارش کمتری برخوردار است. این تفاوت‌های مکانی شدیدتر می‌شوند. همچنین در سال‌های پر بارش تفاوت‌های مکانی بارش نقاط مختلف ایران کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که مدل‌سازی پدیده بارش در بازه‌های زمانی درازمدت قادر خواهد بود که دید جامع‌تری به محققین و مهندسین هیدرولوژی و محیط‌زیست جهت بررسی الگوهای بارشی ارائه دهد. در مقابل، مدل‌سازی پدیده بارندگی توسط الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی روبه‌روز در حال گسترش است؛ زیرا این مدل‌ها بسیار منعطف بوده و توانایی شبیه‌سازی پدیده‌های پیچیده و غیرخطی را دارند. علاوه بر این، مدل‌های هوش مصنوعی دارای دقت مناسبی هستند و استفاده از آنها باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های مربوط به مطالعات میدانی خواهد شد.

شناخت شرایط آب‌وهوایی و چگونگی عمل پارامترهای شاخ: هواشناسی مانند دما و بارندگی در یک مکان از عواملی هستند که تعیین‌کننده‌ی آب‌وهوای آن منطقه در درازمدت هستند. این پارامترهای مهم آب‌وهوایی از عوامل جوی هستند که تغییرات آن‌ها از روند خاصی پیروی نمی‌کند و عوامل زیادی از قبیل شرایط همدیدی، وضعیت توپوگرافی، دوری و نزدیکی به منابع آب، عرض جغرافیایی و غیره در تغییرات آن‌ها دخیل هست. استان ایلام از لحاظ قرارگیری در عرضه‌ای مختلف جغرافیایی، وضعیت توپوگرافی و پراکندگی کوهستان‌ها و برخورداری از سامانه‌های سینوپتیک مختلف با اثرگذاری‌های متفاوت در فصول مختلف سال دارای پراکندگی بارش ناموزونی است. به همین خاطر مطالعه ابعاد مختلف ناموزونی بارش و شناسایی تأثیر عوامل جغرافیایی بر میزان بارش در استان و همچنین تحلیل مکانی بارش با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش پهنه‌بندی کریجینگ انگیزه اصلی انجام این تحقیق هست. این مطالعه از لحاظ کاربرد پراکندگی بارش در مناطق مختلف برای مدیریت محیط از اهمیت زیادی برخوردار است. باتوجه به نتایج کاربردی استفاده از بارش‌های ماهانه که به مواردی از آن‌ها اشاره شد، در این مطالعه سعی خواهد شد از روش‌های آماری ذکر شده که عبارت از مدل‌ها و روش‌های استفاده شده که عبارت شبکه عصبی مصنوعی است، استفاده گردد. الگوهای زمانی بارش ماهانه در سطح استان ایلام تجزیه و تحلیل گردد.

بنابراین، در این مطالعه، مقادیر بارندگی شهر ایلام در یک بازه زمانی ۴۴ ساله از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ توسط یک مدل هوش مصنوعی ترکیبی بهینه‌سازی شده، شبیه‌سازی خواهد شد. برای تولید مدل هوش مصنوعی ترکیبی که اختصاراً با ORELM نشان

داده می‌شود، از ماشین آموزش نیرومند خارج از محدوده (ORELM)، سپس با استفاده از تابع خودهمبستگی تاخیرهای مؤثر مربوط به داده‌های سری زمانی شناسایی خواهند شد. در ادامه، ۱۰ مدل ORELM توسط این تأخیرها تعریف می‌گردند. با تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی‌ها، مدل‌های برتر به همراه مؤثرترین تاخیرهای ورودی معرفی خواهند شد.

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تخمین و پیش‌بینی الگوی بارش در نواحی مختلف جهان به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک کره زمین مانند کشور ایران از اهمیت بسزایی برخوردار است. علاوه بر آن روش‌های عددی مختلف مانند روش‌های هوش مصنوعی به دلیل دقت و سرعت بالا توانایی شبیه‌سازی پدیده بارش و موضوعات مشابه را دارد. استفاده از این روش‌ها نقش بسزایی در صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌ها در مطالعات میدانی و آزمایشگاهی دارد؛ بنابراین، روزبه‌روز به کاربرد و محبوبیت تکنیک‌های متنوع هوش مصنوعی برای تخمین و شبیه‌سازی مسائل متفاوت مهندسی و مسائل واقعی افزوده می‌شود (امیری و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۳؛ امان جلیلی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۲۳؛ عزیزی و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۲۳؛ مزرعه و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۲۴؛ شعبانلو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸؛ و فلاحی و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۲۳).

مکسود و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۴) با استفاده از روش‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیونی مبادرت به مدل‌سازی پارامترهای مختلف آب‌وهوایی نمودند و بیان کردند که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مقادیر تابع هدف را با دقت بیشتری در مقایسه با مدل‌های رگرسیونی تخمین زدند. علاوه بر این، رید و همکاران<sup>۸</sup> (۲۰۰۴) توسط شبکه عصبی مصنوعی مقادیر بارش و رواناب در یک حوضه واقع در کشور مراکش را تخمین زدند. آنها با مقایسه نتایج مدل عددی خود با روابط رگرسیونی نشان دادند که مدل‌های هوش مصنوعی دارای دقت بیشتری هستند.

ناصری و همکاران<sup>۹</sup> (۲۰۰۸) شبکه عصبی مصنوعی را برای شبیه‌سازی پارامترهای هواشنایی توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کردند. آنها این مدل بهینه‌سازی شده را برای تخمین میزان بارندگی واقع در یک حوزه در کشور استرالیا استفاده کردند. همچنین مکانیک و همکاران<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۳) میزان بارش درازمدت ۱۱۰ ساله در یک ناحیه واقع در جنوب استرالیا را با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی شبیه‌سازی نمودند. آنها با ارزیابی نتایج مدل‌های عددی مذکور نشان دادند که شبکه عصبی مصنوعی دارای دقت بیشتری بود.

میسلان و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۵) به‌وسیله مدل شبکه عصبی مصنوعی پسخور مقدار بارندگی ماهانه در شرق کشور اندونزی را پیش‌بینی کردند. آنها برای کنترل مقدار خطای مدل عددی خود از خطای مربع میانگین بهره گرفتند.

شیانگ و همکاران<sup>۱۲</sup> (۲۰۱۸) توسط روش تجزیه تجربی گروهی و الگوریتم‌های هوش مصنوعی از قبیل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون بردار پشتیبان مقادیر بارش در یکی از استان‌های کشور چین را در بازه‌های زمانی کوتاه و بلندمدت تخمین زدند. نشان داده شد که شبکه عصبی مصنوعی مقادیر بارش در بازه زمانی درازمدت با دقت بهتری شبیه‌سازی کرد.

آزاد و همکاران<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۹) عملکرد شبکه ANFIS را برای تخمین بارش شهر اصفهان به‌وسیله چند روش بهینه‌سازی از قبیل الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و بهینه‌سازی کلونی مورچه بهبود بخشیدند. آنها بیان کردند که مدل ترکیبی ANFIS بهینه‌سازی کلونی مورچه در مقایسه با سایر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار بود. همچنین، مهر و همکاران<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۹) یک مدل

1. Amiri et al
2. Aman Jalili et al
3. Azizi et al
4. Mazraeh et al
5. Shabanlou et al
6. Fallahi et al
7. Maqsood et al
8. Riad et al
9. Nasser et al
10. Mekanik et al
11. Mislan et al
12. Xiang et al
13. Azad et al
14. Mehr et al

ترکیبی بهینه‌یافته را برای تخمین مقادیر بارش درازمدت شهر تبریز و ارومیه توسعه دادند. آنها برای بهینه‌سازی مدل هوش مصنوعی رگرسیون بردار پشتیبان از الگوریتم کرم شبتاب بهره گرفتند.

شیرعلی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۲۰) مقادیر بارش کوتاه مدت درون حوزه کارون ۴ واقع در جنوب غربی ایران را توسط شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان (SVM) شبیه‌سازی کردند. این نویسندگان نشان دادند که مدل هوش مصنوعی SVM از عملکرد بهتری در مقایسه با سایر مدل‌ها از خود نشان داد.

محمد و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۲۱) با استفاده از تکنیک‌های مختلف هوش مصنوعی مقادیر بارش درون یک حوزه واقع در کشور پاکستان را پیش‌بینی کردند. آنها مدل ویولت را با یک مدل شبکه عصبی مصنوعی ترکیب کردند و نشان دادند که مدل ترکیبی توانایی قابل‌قبولی جهت تخمین مقادیر تابع هدف از خود نشان داد.

### روش پژوهش

روش پژوهش حاضر، تحلیلی و کاربردی است. به جهت گردآوری اطلاعات از طریق جمع‌آوری داده‌های موردنیاز منطقه مورد مطالعه شامل داده‌های بارش ایستگاه‌های موجود، مشخصات فیزیکی شهر ایلام، اطلاعات و مشخصات و تعداد بارش‌ها و همچنین با بررسی مدل‌های شبیه‌سازی بارش - رواناب جهت تعیین هیدروگراف سیلاب و انتخاب مدل مناسب. بررسی مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بارش‌های درازمدت جهت تعیین هیدروگراف روندیابی شده سیلاب در موقعیت پایین دست رودخانه و انتخاب مدل مناسب. بررسی مدل‌های پیش‌بینی (نظیر شبکه عصبی مصنوعی فراابتکاری) که قادر باشد بر مبنای هیدروگراف بارش‌های قبلی به‌عنوان ورودی مدل، هیدروگراف بارش‌های درازمدت را پیش‌بینی نماید.

در این قسمت چگونگی طراحی و کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی بارش در مقیاس‌های زمانی ماهانه و بخشی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۱. ماشین آموزش نیرومند (ELM)

ELM یک الگوریتم machine learning با پیاده‌سازی آسان است که نخستین بار توسط هووانگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) ارائه شده است. این روش برای غلبه بر ضعف‌های روش‌های یادگیری سنتی مانند الگوریتم‌های آموزش‌محور مبتنی بر تبادل گرایان به وجود آمده است. این الگوریتم شامل سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است. ELM در واقع نوعی روش یادگیری برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) است که به طور تصادفی وزن‌های ورودی (w) و بایاس (b) را تولید می‌کند. همچنین در این روش وطن خروجی در فاز آموزش تنظیم می‌شود. تفاوت‌های اساسی بین ELM و classical ANN آموزش‌دیده با استفاده از الگوریتم‌های گرادینانی عبارت‌اند از: (۱) در ورش ELM این امکان وجود دارد که از توابع غیرخطی و kernel استفاده شود، (۲) ELM به پارامترهای بهینه‌سازی در الگوریتم‌های کلاسیک مانند momentum و learning rate، نیاز ندارد و (۳) در ELM به دلیل اینکه فقط وزن‌های خروجی نیاز به تنظیم دارند، نسبت به روش ANN سریع‌تر عمل می‌کنند (محمودیان و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۹؛ حسنی و شعبانلو<sup>۵</sup>، ۲۰۲۰؛ و جلیلیان و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۲۲). (۴) تعمیم‌پذیری (generalizability) روش ELM نسبت به شبکه‌ها عصبی کلاسیک نیز بیشتر است (غریب و همکاران<sup>۷</sup>، ۲۰۲۰؛ شفیعی و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۲۰؛ و پورسعید و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۲۲، ۲۰۲۴):

1. Shirali et al
2. Hammad et al
3. Huang et al
4. Mahmodian et al
5. Hasani & Shabanlou
6. Jalilian et al
7. Gharib et al
8. Shafee et al
9. Poursaeid et al

با در نظر گرفتن تعداد  $N$  نمونه مختلف برای یک مسئله با  $n$  ورودی  $x_i \in \mathbb{R}$  و یک خروجی  $y_i \in \mathbb{R}$  اگر تعداد نرون های لایه مخفی را برابر با  $L$  در نظر بگیریم، ساختار کلی الگوریتم ELM جهت ایجاد نگاشت غیرخطی بین ورودی های مسئله و خروجی مورد نظر، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\sum_{i=1}^L \beta_i g(w_i \cdot x_j + b_i) = y_j, j=1, 2, \dots, N \quad (۱)$$

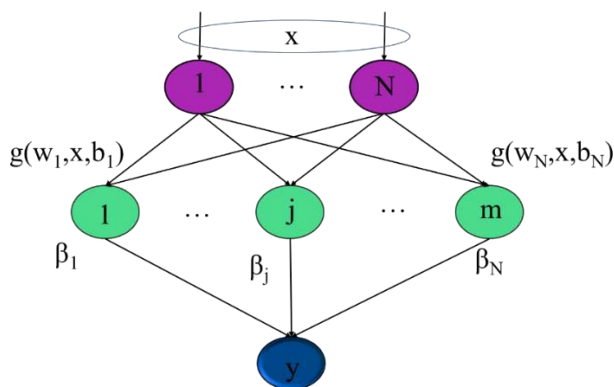
در این رابطه،  $\beta$  ماتریس وزن های خروجی است که وظیفه اتصال لایه پنهان به لایه خروجی را بر عهده دارد،  $g(\cdot)$  به عنوان تابع فعال سازی در نظر گرفته می شود که انواع مختلفی مانند hard-limit, triangular basis, radial basis, sine, sigmoid, tangent hyperbolic دارد،  $w$  ماتریس وزن ورودی است که به صورت تصادفی مقادری می شود و وظیفه آن اتصال لایه ورودی به لایه پنهان است،  $x$  ورودی مسئله است،  $b$  ماتریس بایاس های لایه پنهان است که مشابه به  $w$  به صورت تصادفی مقادری می شود و  $y$  پارامتر هدف است. فرم فشرده رابطه فوق را می توان به شکل زیر بیان کرد (هوآنگ و همکاران، ۲۰۰۶). به طوری که شامل  $N$  معادله و  $N$  مجهول مختلف است و طی یک فرایند خطی به سادگی قابل حل است:

$$H\beta = y \quad (۲)$$

در رابطه فوق،  $y$  خروجی های مسئله است  $y = [y_1, \dots, y_N]^T$  که شامل  $N$  نمونه مختلف است در حالیکه  $\beta$  به عنوان وزن خروجی  $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_L]^T$  دارای  $L$  نمونه مختلف است ( $L = \text{number of hidden neurons}$ ). علاوه بر این دو پارامتر، پارامتر  $H$  است که به عنوان ماتریس خروجی لایه پنهان شناخته می شود و به طورت زیر تعریف می شود. قابل ذکر است که جهت محاسبه این ماتریس که علاوه بر ورودی های مسئله  $x$ ، دارای دو ورودی دیگر شامل  $w$  and  $b$  است که هر دو به صورت تصادفی مقادری می شوند. در واقع این ماتریس قبل از شروع فرایند آموزش در ELM، قابل محاسبه است:

$$H(w_1, \dots, w_L, x_1, \dots, x_N, b_1, \dots, b_L) = \begin{bmatrix} g(w_1 \cdot x_1 + b_1) & \dots & g(w_L \cdot x_1 + b_L) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(w_1 \cdot x_N + b_1) & \dots & g(w_L \cdot x_N + b_L) \end{bmatrix}_{N \times L} \quad (۳)$$

یک نمونه از ساختار ارائه شده برای ELM با  $N$  ورودی مختلف و یک خروجی، در شکل (۱) ارائه شده است:



شکل ۱. ساختار مدل ELM

به دلیل عدم مربعی بودن ماتریس  $H$ ، حل رابطه (۲) جهت محاسبه  $\beta$  به سادگی صورت نمی پذیرد. از این رو، محاسبه least square وزن خروجی (رابطه (۵)) با استفاده از loss function ارائه شده در رابطه (۴)، ساده ترین راه حل در محاسبه  $\beta$  است (هوآنگ و همکاران، ۲۰۰۶):

$$E_1 = \min \|y - H\beta\| \quad (4)$$

$$\hat{\beta} = H^+ y \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $H^+$  برابر است با معکوس تعمیم یافته مور - پنروس<sup>۱</sup> ماتریس  $H$ .

باتوجه به اینکه جهت جلوگیری از overfitting در ELM، تعداد نرون های لایه مخفی ( $L$ ) عموماً از تعداد نمونه های در نظر گرفته شده جهت آموزش مدل ( $N$ ) کمتر است، حل رابطه فوق جهت محاسبه وزن خروجی ( $\beta$ ) به شکل زیر است:

$$\hat{\beta} = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (6)$$

## ۲. ماشین آموزش نیرومند خارج از محدوده (ORELM)

در مدل سازی بارش، پیش بینی مقادیر peak از اهمیت قابل توجهی برخوردار است و باتوجه به اینکه تعداد نقاط peak نسبت به سایر نقاط کمتر است، به عنوان outlier شناخته می شوند. در واقع، outliers درصد بسیار کمی از training samples را شامل می شوند و عموماً تمرکز مدل سازی با استفاده از ELM بر روی سایر نمونه ها خواهد بود. به منظور افزایش عملکرد مدل سازی با استفاده از ELM، با در نظر گرفتن sparsity در training error ( $e$ )، نسبت افزایش عملکرد مدل سازی مبتنی بر ELM اقدام می شود؛ بنابراین، loss function تعریف شده در ORELM نسبت به ELM به شکل زیر اصلاح می شود:

$$E_{ORELM} = C \min_{\beta} \|e\|_0 + \|\beta\|_2^2 \text{subjected to } y - H\beta = e \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $C$  به عنوان regularization parameter شناخته می شود و از این رو، تنها مجهول رابطه، ماتریس وزن خروجی  $\beta$  است. به منظور گارانتی کردن sparsity features، در رابطه فوق به جای  $\ell_1$ -norm از  $\ell_0$ -norm استفاده می شود به طوری که نه تنها sparsity features را ایجاد و حل می کند بلکه overall minimization را نیز به همراه دارد.

$$E_{ORELM} = \min_{\beta} \|e\|_1 + \frac{1}{C} \|\beta\|_2^2 \text{subjected to } y - H\beta = e \quad (8)$$

این رابطه که یک constrained convex optimization problem را می توان به فرم augmented Lagrange multiplier (ALM) بازنویسی کرد (ژانگ و لوو، ۲۰۱۵):

$$L(\beta, e, \lambda) = \|e\|_1 + \frac{1}{C} \|\beta\|_2^2 + \lambda^T (y - H\beta - e) + \frac{\mu}{2} \|y - H\beta - e\|_2^2 \quad (9)$$

در رابطه فوق،  $\lambda \in R^n$  Lagrange multiplier vector است و  $\mu$  نیز پارامتر جریمه است که به صورت  $\mu = 2N\|y\|_1$  در نظر گرفته می شود (یانگ و ژانگ، ۲۰۱۱). در رابطه فوق، دو پارامتر  $\beta$ ،  $e$  مجهول می باشند. حل این رابطه به صورت زیر است (ژانگ و لوو، ۲۰۱۵):

$$\beta_{k+1} = (H^T H + 2/C\mu I)^{-1} H^T (y - e_k + \lambda_k/\mu) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= \text{shrink}(y - H\beta_{k+1} + \lambda_k/\mu, 1/\mu) \\ &\cong \max\{|y - H\beta_{k+1} + \lambda_k/\mu| - 1/\mu, 0\} \circ \text{sign}(y - H\beta_{k+1} + \lambda_k/\mu) \end{aligned} \quad (11)$$

## ۳. نکویی برازش

در این مطالعه، جهت ارزیابی عملکرد مدل های هوش مصنوعی استفاده شده در این پژوهش از شاخص های آماری ضریب همبستگی (R)، شاخص عملکرد (VAF)، خطای نسبی مطلق میانگین (MARE) و ضریب بهره وری نش ساتکلیف (NSC) استفاده شد (شعبانلو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۸؛ زارعی و همکاران، ۲۰۲۰؛ و مقدم و همکاران، ۲۰۲۲):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (12)$$

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(F_i - O_i)}{\text{var}(F_i)}\right) \times 100 \quad (13)$$

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{F_i - O_i}{O_i} \right| \quad (14)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - F_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

در اینجا  $O_i$  مقادیر بارندگی یا رواناب مشاهداتی،  $F_i$  مقادیر مدل سازی شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهداتی و  $n$  برابر تعداد مقادیر مشاهداتی است. در بخش های بعدی به بررسی عملکرد مدل های هوش مصنوعی جهت شبیه سازی مقادیر بارش شهر ایلام پرداخته می شود. در این مطالعه، داده های سری زمانی بارش شهر ایلام در یک بازه ۴۴ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ جهت آموزش و آزمون ماشین های یادگیری WORELM استفاده می شوند. داده های مذکور به دو دسته آموزش (۷۰٪ کل داده ها) و آزمون (۳۰٪ باقیمانده) تقسیم می شوند. نتایج مهم پژوهش حاضر در بخش های بعدی ارائه خواهند شد.

## ۴. منطقه مطالعاتی

استان ایلام با وسعتی بالغ بر ۱۹۰۴۵ کیلومتر مربع در غرب کشور که از شمال به استان کرمانشاه، از شرق و جنوب شرقی به ترتیب با استانهای لرستان و خوزستان و از سمت غرب با کشور عراق همسایه است. استان ایلام دارای هفت شهرستان به نامهای: ایلام، مهران، دهلران، ایوان، آبدانان، دره شهر و سرابله است. این استان با متوسط بارندگی سالیانه ۴۲۷ میلیمتر و باتوجه به ویژگیهای زمین شناسی و توپوگرافی خاص از منابع آب سطحی و زیر زمینی قابل توجهی برخوردار است. نظر به شرایط ویژه استان از جمله وجود ارتفاعات کبیرکوه از سلسله جبال زاگرس پهنه استان ایلام از دو شرایط خاص آب و هوایی برخوردار است: قسمت جنوبی و غربی این رشته کوه شامل دشتهای پست با حداقل ارتفاع حدود ۶۰ متر از سطح دریا دارای شرایط آب و هوایی خشک و با حداکثر دمای بیش از ۵۲ درجه سانتی گراد و در ناحیه شمالی استان آب و هوایی معتدل حکمفرماست. متوسط تبخیر از سطح طشتک تبخیر ۲۵۶۷ میلیمتر در سال، متوسط تبخیر پتانسیل ۲۰۶۰۸ میلیمتر در سال و متوسط تبخیر واقعی ۱۴۴۲۶ میلیمتر در سال است. استان ایلام از نظر تقسیم بندی هیدرولوژیک و باتوجه به نقشه توپوگرافی و شبکه هیدروگرافی رودخانه ها و حوزه های آبریز به دو حوزه تقسیم می شود: حوزه های آبریز رودخانه های مرزی و حوزه های آبریز کرخه، رودخانه های حوزه مرزی اکثرآ از جنوب کبیر کوه سرچشمه گرفته و پس از مشروب نمودن دشتهای واقع در پایین دست حوزه های آبریز از مرز خارج شده و به طرف کشور عراق جریان پیدامی کنند. مهمترین این رودخانه ها از جنوب به شمال به ترتیب عبارتند از: دویرج، میمه، چنگوله، گاوی، کنجانچم، شور شیرین، گذار خوش، تلخاب و کنگیر. علاوه بر این رودخانه ها، مسیل های مهمی مانند: چخاب، فسیل، نصریان وجود دارد. رودخانه حوزه آبریز کرخه عبارتند از: سیمره، مولاب، سیاه گاو، ماژین، دره شهر، سیکان، کلم، شیروان، زنگوان، چناره و جزمان. که بر روی رودخانه های ذکر شده ۲۶ ایستگاه هیدرومتری درجه دو و یک وجود دارد.

## ۵. مقادیر واقعی بارندگی باران

برای این منظور ابتدا با استفاده از رگرسیون چندمتغیره به برآورد ضرایب رگرسیونی پرداختیم و مانند قبل داده‌های جمع‌آوری شده در مدت سال‌های ۱۳۹۵-۱۴۱۰ را به عنوان متغیرهای مستقل در نظر می‌گیریم. آنگاه ۴ سال آتی را با استفاده از معادله به دست آمده برای این مدل پیش‌بینی می‌کنیم. معادله و ضرایب رگرسیونی برای این برازش به صورت زیر است:

$$Y=X.B \quad (۱۶)$$

جدول ۱. جدول ضرایب رگرسیونی

| B1       | B2       | B3       | B4       |
|----------|----------|----------|----------|
| -31558.0 | -054.0   | -94331.0 | -71041.0 |
| 422623.0 | 505038.0 | 383514.0 | -3739.0  |
| -37819.0 | -70144.0 | -74118.0 | 117652.0 |
| -0703.0  | 361226.0 | -85264.0 | 032537.0 |
| 0        | -1352.0  | 419.1.0  | 308962.0 |
| -24496.0 | -1372.0  | -57508.0 | -10597.0 |
| -17474.0 | 0        | 0        | -7073.0  |
| 35212.0  | -17881.0 | 512987.0 | 731307.0 |
| 0        | 315068.0 | 026606.0 | 0        |

۷ سال را با استفاده از داده‌های در اختیار پیش‌بینی کردیم که نشان از برازش نامناسب است، زیرا اطلاعات به دست آمده مقادیر منفی هستند و هر چه به سال‌های بیشتری را پیش‌بینی کنیم داده‌های ما نامناسب می‌شود که متناقض با مقادیر بارندگی است. این مقادیر در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. مقادیر بارندگی برازش داده شده برای ۷ سال از سال ۱۳۹۴ الی ۱۴۰۰ بر حسب mm

| سال و ماه | 2016  | 2017   | 2018   | 2019  | 2020  | 2021   | 2022   |
|-----------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| April     | 11.67 | -66.73 | 40.92  | 72.64 | 38.80 | 47.59  | 28.69  |
| May       | 14.04 | 9.88   | -6.42  | 42.18 | 27.99 | 6.16   | 21.87  |
| June      | -6.24 | -21.65 | 26.30  | 20.71 | 13.45 | -19.27 | -18.06 |
| July      | 4.88  | -11.62 | 1.24   | 7.32  | -1.66 | 12.20  | 2.70   |
| August    | -5.69 | 0.60   | 2.13   | 1.40  | 2.02  | -9.98  | -9.26  |
| September | 0.36  | 1.44   | -5.62  | -8.57 | -1.33 | 11.97  | 5.31   |
| October   | 0.81  | 6.21   | 28.05  | 0.21  | 1.84  | -21.83 | -10.63 |
| November  | 8.83  | 25.40  | -2.54  | 8.44  | 12.51 | 9.50   | 14.90  |
| December  | 2.76  | 5.44   | 56.41  | 43.07 | 456   | -6.50  | 4.99   |
| January   | 11.78 | 0.85   | 2.47   | 16.90 | 7.15  | -0.72  | 20.87  |
| February  | 32.30 | 67.22  | -33.72 | -6.78 | 7.06  | 7.73   | 38.27  |
| March     | 30.61 | 3.06   | 24.89  | 41.95 | 29.27 | -13.80 | 22.80  |

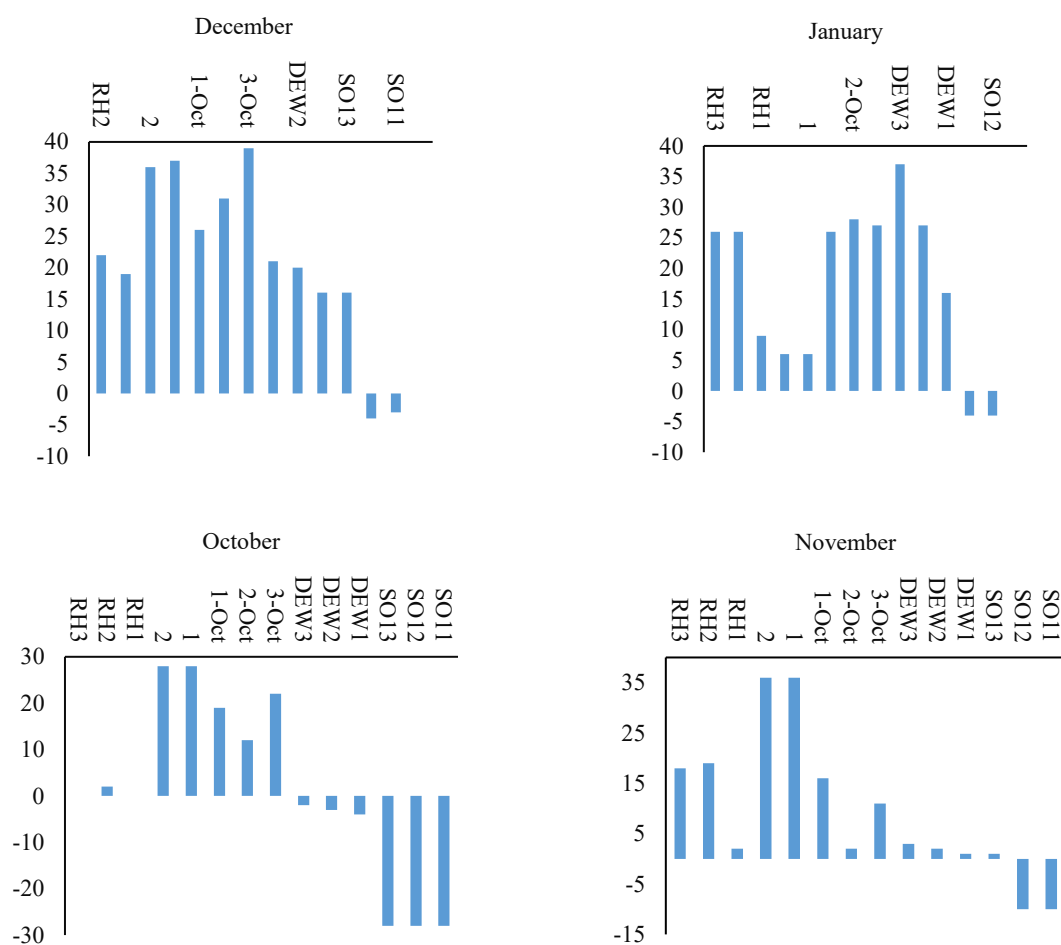


## ۶. پیش‌بینی بارش ماهانه ایلام

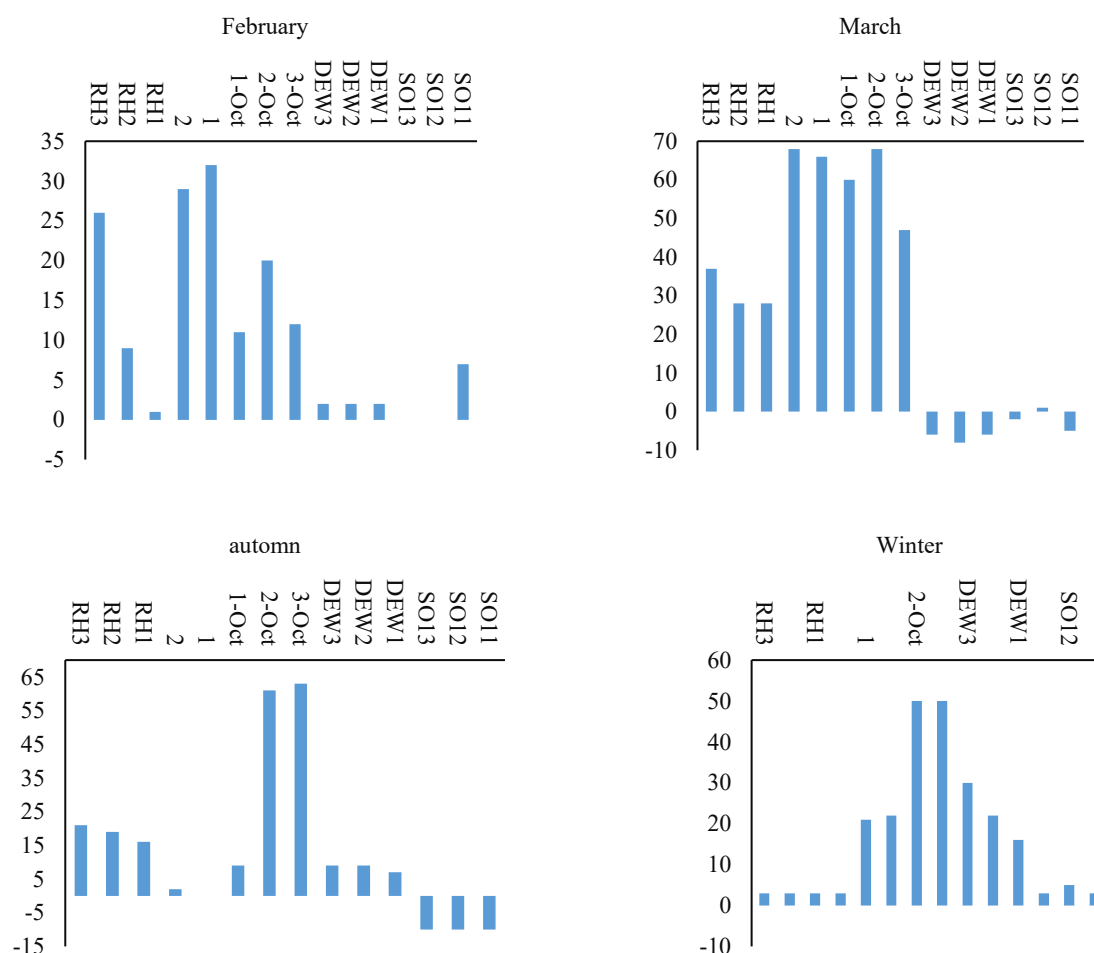
برای پیش‌بینی بارش ماهانه و بخشی در این قسمت از پروژه، اطلاعات ایستگاه‌ها برای پیش‌بینی بارش ماهانه و برای پیش‌بینی بارش بخشی، تهیه گردید. هر فایل شامل، ۴۱۷ الگو است که از بین ۴۷۵ الگوی اول، هر ۱۴ الگو به یک ایستگاه و از الگوی ۵۷۵ تا ۴۱۷ هر ۱۰ الگو به یک ایستگاه تعلق دارد. هر ۱۴ الگو، بارش ماهانه یا بخشی ایستگاه‌ها را طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ و هر ۱۰ الگو بارش ماهانه یا بخشی ایستگاه‌ها، طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ را پیش‌بینی می‌کنند. از کل ۴۱۷ الگو ۸۰ درصد آن‌ها که شامل، ۴۷۵ الگو است و بارش ماهانه یا بخشی طی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ را پیش‌بینی می‌کنند به‌عنوان الگوهای آموزش و ۲۰ درصد باقی‌مانده، یعنی ۴۰ الگو آخر که بارش ماهانه یا بخشی را طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ را پیش‌بینی می‌کنند، به‌عنوان الگوهای آزمون در نظر گرفته شدند. برای اختصاص مقادیر اولیه‌ی وزن اتصالات و بایاس نورون‌ها از تابع وزن تصادفی که در این حالت مقادیر تصادفی وزن‌ها را بین  $\pm 1$  و مقادیر اولیه‌ی نورون‌ها را صفر انتخاب می‌کند، استفاده شده است و از میان روش‌هایی که سریع‌تر به همگرایی می‌رسند و دقت بالاتری دارند، الگوریتم لوبنبرگ - مارکوارت<sup>۱</sup>، برای انجام کار برگزیده شد. برای انتخاب تابع تحریک یا همان تابع انتقال یا تابع فعالیت، چون در روش پس انتشار، این توابع باید مشتق‌پذیر باشند و از طرفی خروجی‌های شبکه بین صفر و یک یا ۱- و ۱+ محدود هستند، توابع محدود، مثل تابع لجستیک یا تانژانت هایپربولیک که مانع از این می‌شوند تا وزن‌ها مقادیر خیلی بزرگ به خود بگیرند، ارجح‌ترند. از این‌رو با توجه به پیش‌پردازشی که روی داده‌ها برای ورود به شبکه (طبق رابطه‌ی (۱)) انجام گرفت، برای تابع انتقال بین لایه‌ی ورودی و لایه‌ی میانی، تابع تانژانت هایپربولیک و برای لایه‌ی میانی و لایه‌ی خروجی، تابع خطی به‌عنوان مناسب‌ترین توابع انتقال، انتخاب گردید. برای تمامی فایل‌های ماه‌های اکتبر تا مارس و فصول پاییز و زمستان، هشت پارامتر که همان تعداد نورون‌های ورودی در لایه‌ی اول را تشکیل می‌دهند و بارش ماهانه و بخشی به‌عنوان تنها نورون در لایه‌ی خروجی ثابت است. تعداد بهینه‌ی نورون‌ها در لایه‌های میانی (مخفی) باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که منجر به کمترین خطای داده‌های آموزش گردد. تعداد نورون‌های لایه‌ی میانی پس از سعی و خطای فراوان، پنج نورون در نظر گرفته شد. بنابراین با مدل ۱ - ۵ - ۸ در طی فرایند آموزش در شبکه‌ی عصبی، ساختاری از شبکه که مقدار مجموع مربعات خطا روی داده‌های آموزش در آن به پایین‌ترین مقدار ممکن خود برسد، ساختار بهینه و وزن‌های متناظر با آن به‌عنوان مقدار بهینه‌ی وزن‌ها در نظر گرفته شدند. در فرایند آموزش، مقدار خروجی محاسبه شده توسط شبکه با مقدار خروجی هدف که در مجموعه داده‌های آموزش تعریف شده، مقایسه و مجموع مربعات خطا روی کل الگوهای آموزشی برای نورون‌ها در لایه‌ی خروجی شبکه، محاسبه شده است. برای محاسبه‌ی مجموع مربعات خطا از رابطه‌ی (۱۷)، استفاده می‌شود.

$$SSE = \sum_{p=1}^N (t_p - Z_p)^2 \quad (17)$$

که در آن  $t_p$  و  $Z_p$  به ترتیب خروجی موردنظر و خروجی محاسبه شده‌ی واقعی برای الگوی  $p$  است. پس از به‌دست آوردن خروجی‌های شبکه و بازگرداندن آن‌ها از مقادیر بین ۱- و ۱ به مقادیر واقعی، به‌منظور ارزیابی عملکرد شبکه‌ی عصبی، از سه شاخص زیر کمک گرفته شد که این شاخص‌ها برای تمامی قسمت‌های پیش‌بینی بارش، مورد استفاده واقع شده و طبق روابط زیر محاسبه گردیده است. برای بررسی اثر پارامترهای موردبررسی بر بارش ماهانه و بخشی نمودارهای ضریب همبستگی آن‌ها در ادامه ارائه می‌شود. در تمام نمودارهای موجود در شکل‌های این بخش dew، برای دمای نقطه‌ی شبنم و شماره‌های ۱ و ۲ برای بارش سالانه‌ی یک و دو سال قبل، بکار برده شده است.



شکل ۲. نمودار ضرایب همبستگی پارامترها با بارش ماهانه ایلام



شکل ۳. نمودار ضرایب همبستگی پارامترها با بارش ماهانه و فصلی ایلام

با توجه شکل های (۲) و (۳) می توان تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر بارش ماهانه را به شرح ذیل بیان کرد. شاخص *SOI* سه ماه قبل، در طی ماه های اکتبر تا مارس، به تدریج با کاهش ضریب همبستگی همراه بوده و بیشترین تأثیر را بر بارش ماه های اکتبر و نوامبر دارد. تأثیر دمای نقطه ی شبنم سه ماه قبل بر بارش ماهانه، در طی ماه های اکتبر و نوامبر بسیار ناچیز بوده و به جز در ماه فوریه بر بارش ماه های دسامبر، ژانویه و مارس، تأثیر نسبتاً خوبی داشته است. بارش ماه های مورد بررسی طی یک تا سه سال قبل به جز برای ماه های اکتبر و نوامبر، بر بارش ماه های دیگر به خصوص مارس، تأثیر خوبی داشته و بارش سالانه به جز برای ماه های ژانویه و تا حدودی اکتبر بر بارش ماه های دیگر به خصوص ماه مارس، تأثیر بسزایی داشته است و آخرین پارامتر یعنی میانگین رطوبت نسبی برای ماه مارس بیشترین تأثیر را داشته است و برای ماه های اکتبر و نوامبر با ضریب بسیار پایین تأثیر چندانی ندارد. بر طبق شکل (۵)، تأثیر پارامترها بر بارش بخشی را می توان به شرح ذیل به آن ها اشاره کرد. از میان پارامترها، بارش سالانه بیشترین تأثیر را به خصوص بر بارش بخش زمستان داشته و از لحاظ تأثیرگذاری در مرتبه ی بعد، شاخص *SOI* سه ماه قبل، برای بارش بخش پاییز و شاخص *NINO3,4* سه ماه قبل، برای بارش بخش زمستان قرار می گیرند. از بین دو پارامتر دیگر، میانگین دمای نقطه ی شبنم و میانگین رطوبت نسبی سه ماه قبل از شروع بارش بخشی، بر بارش بخش زمستان، تأثیر نسبتاً خوبی داشته اند، ولی این دو پارامتر برای بارش بخش پاییز با ضریب همبستگی بسیار ناچیزی همراه هستند. در تمامی بخش های این پروژه، به منظور بررسی بهتر نتایج حاصل از خروجی مدل ها، برای پیش بینی بارش ماهانه و بخشی، سعی شده پارامترهایی که به طور میانگین در تمامی فایل ها ضرایب همبستگی بالاتری دارند، به عنوان ورودی انتخاب شوند.

## یافته‌های پژوهش

پس از اجرای مدل برای تمامی فایل‌های مربوط به ایلام، بهترین نتایج برای شش ماه و دو بخش در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از مدل برای بارش ماهانه و بخشی ایلام

| اکتبر  | مدل   | Sse train | Sse test | Rmse train | Rmse test | Cor train | Cor test | بایاس آموزش | بایاس آزمون |
|--------|-------|-----------|----------|------------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------|
| اکتبر  | 8-5-1 | 5.01      | 0.76     | 13.79      | 13.5      | 0.71      | 0.71     | -1.52       | -1.12       |
| نوامبر | 8-5-1 | 4.18      | 1.2      | 25.18      | 21.18     | 0.7       | 0.7      | -1.63       | -1.14       |
| دسامبر | 8-5-1 | 4.64      | 2.05     | 27.07      | 22        | 0.76      | 0.7      | -2.46       | -1.29       |
| ژانویه | 8-5-1 | 5.72      | 3.05     | 20.5       | 18        | 0.79      | 0.71     | -2.01       | -1.88       |
| فوریه  | 8-5-1 | 6.4       | 1.98     | 25.2       | 22.6      | 0.7       | 0.71     | -2.64       | -1.37       |
| مارس   | 8-5-1 | 5.5       | 1.9      | 21         | 18        | 0.81      | 0.7      | -4.81       | -4.61       |
| پاییز  | 8-5-1 | 4.71      | 1.33     | 12.83      | 10        | 0.76      | 0.7      | -1.02       | -0.66       |
| زمستان | 8-5-1 | 6.25      | 1.68     | 17.03      | 16        | 0.7       | 0.7      | -2.37       | -1.92       |

جدول ۴. نتایج به‌دست‌آمده از مدل برای بارش ماهانه ایلام

| اکتبر  | میانۀ واقعی (آموزش) | میانۀ پیش بینی (آموزش) | میانۀ واقعی (آزمون) | میانۀ پیش بینی (آزمون) | انحراف معیار واقعی (آموزش) | انحراف معیار پیش بینی (آموزش) | انحراف معیار واقعی (آزمون) | انحراف معیار پیش بینی (آزمون) |
|--------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| اکتبر  | 0.40                | 5.05                   | 0.1                 | 3.2                    | 19.55                      | 14.21                         | 14.69                      | 11.04                         |
| نوامبر | 7                   | 14                     | 10.45               | 39.3                   | 31                         | 17.7                          | 23.47                      | 14.15                         |
| دسامبر | 20.3                | 28                     | 28.7                | 28.8                   | 36.02                      | 23.28                         | 39.49                      | 22.4                          |
| ژانویه | 17.1                | 20.4                   | 22.9                | 23.1                   | 33.15                      | 26.37                         | 34.24                      | 31.96                         |
| فوریه  | 22.65               | 21.05                  | 21.8                | 25.85                  | 32                         | 21                            | 22.48                      | 18.55                         |
| مارس   | 25.95               | 22.95                  | 13.3                | 10.2                   | 36.02                      | 30.94                         | 28.18                      | 19.89                         |
| پاییز  | 14.9                | 16.75                  | 15.8                | 19.45                  | 19.97                      | 16.10                         | 17.97                      | 10.22                         |
| زمستان | 32.2                | 30.9                   | 25.3                | 28.7                   | 24.26                      | 17.03                         | 19.7                       | 12.35                         |

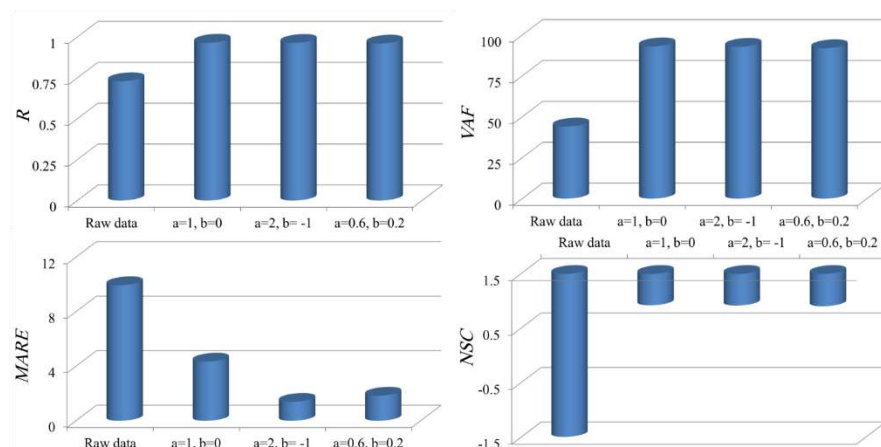
در جدول‌های (۳) و (۴)، مجموع مربعات خطا ( $SSE$ )، ریشه‌ی میانگین مربعی خطاها ( $RMSE$ )، ضرایب همبستگی ( $CORR$ ) و بایاس، برای مراحل آموزش و آزمون و همچنین، میانۀ و انحراف معیار برای مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده در مراحل آموزش و آزمون، آورده شده است و از آنجایی‌که نتایج مربوط به آزمون‌ها برای ما اهمیت بیشتری دارند. نزدیکی تقریبی مقادیر میانۀ و انحراف معیار برای مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده و ضرایب همبستگی بالای ۷۰ درصد، حاکی از کارایی نسبتاً خوب مدل دارد بالاین‌حال، مقادیر ریشه‌ی میانگین مربعی خطاها بالاست.

## ۱. نرمال سازی

جهت سهولت کار با مقادیر مشاهداتی، این داده ها نرمالایز شدند. برای نرمال سازی مقادیر بارندگی های مشاهداتی از رابطه زیر استفاده گردید:

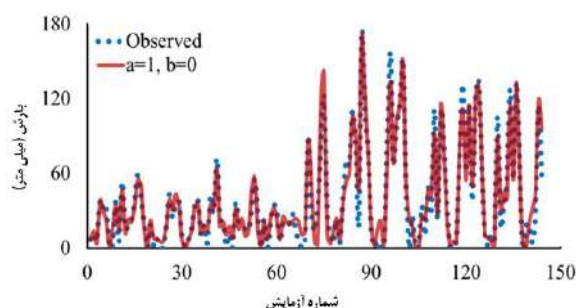
$$x_n = a[(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})] + b \quad (18)$$

در اینجا،  $x_n$  مقدار نرمال شده،  $x$  مقدار مشاهداتی،  $x_{\min}$  حداقل مقدار مشاهداتی،  $x_{\max}$  حداکثر مقدار مشاهداتی،  $a$  و  $b$  نیز مقادیر ثابت هستند. در این مطالعه، برای مقادیر  $a$  و  $b$  سه مقدار مختلف از قبیل  $a=1, b=0$ ،  $a=2, b=-1$  و  $a=0.6, b=0.2$  انتخاب شد و نتایج شبیه سازی برای شرایط بدون نرمال سازی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شاخص های آماری محاسبه شده برای ضرایب نرمال سازی مختلف در قالب شکل (۳) قابل مشاهده است. بر اساس نتایج شبیه سازی ها، عملکرد مدل ماشین یادگیری در وضعیتی که ضرایب نرمال سازی مساوی با  $a=1, b=0$  بدست آمد. به عنوان مثال، مقادیر  $R$ ،  $VAF$  و  $NSC$  برای مدل هوش مصنوعی در حالتی که ضرایب نرمال سازی مساوی با  $a=1, b=0$  بود به ترتیب برابر با  $0.965$ ،  $0.93/0.957$  و  $0.925$  محاسبه شدند.



شکل ۴. نتایج شاخص های آماری محاسبه شده برای ضرایب نرمال سازی مختلف

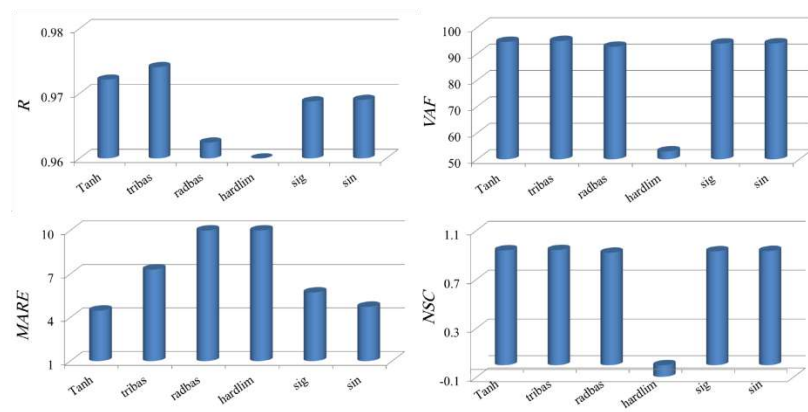
در شکل (۵) نیز مقادیر بارش های شبیه سازی شده برای ضرایب نرمال سازی مساوی با  $a=1, b=0$  و مقادیر مشاهداتی با هم مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، مدل ماشین یادگیری استفاده شده در مطالعه حاضر توانست مقادیر بارش ها را در این وضعیت بادقت مناسبی تخمین بزند.



شکل ۵. مقایسه مقادیر بارش های شبیه سازی شده برای ضرایب نرمال سازی مساوی با  $a=1, b=0$  و مقادیر مشاهداتی

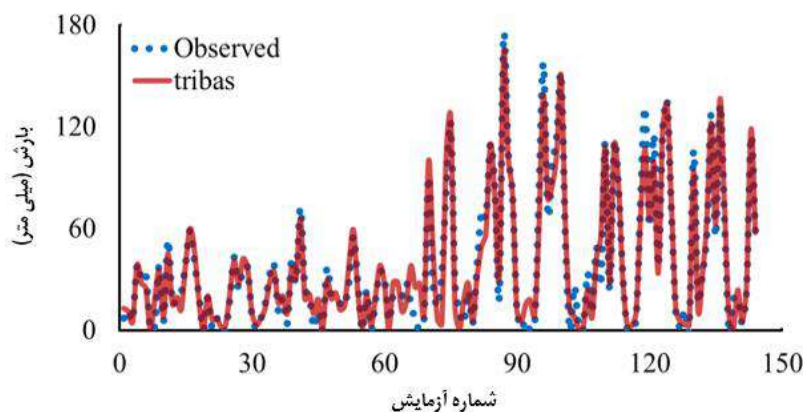
## ۲. تابع فعال سازی

در این مطالعه، شش تابع فعال سازی مختلف از قبیل  $\text{tangent hyperbolic (Tanh)}$ ،  $\text{triangular basis (tribas)}$ ،  $\text{sigmoid (sig)}$ ،  $\text{radial basis (radbas)}$  و  $\text{sinusoidal (sin)}$  استفاده شد. نتایج شاخص های آماری محاسبه شده برای این شش تابع فعال سازی در شکل (۶) قابل مشاهده است. همان طور که دیده می شود، تابع فعال سازی  $\text{tribas}$  دارای کمترین مقدار خطا و بیشترین دقت با مقادیر مشاهداتی بود. برای تابع فعال سازی  $\text{tribas}$  مقادیر  $\text{NSC}$ ،  $\text{VAF}$  و  $\text{MARE}$  به ترتیب برابر با  $۰/۹۴۲$ ،  $۹۴/۸۱۷$  و  $۷/۳۱۱$  بدست آمدند؛ بنابراین، در ادامه برای شبیه سازی مقادیر بارندگی های شهر ایلام از تابع فعال سازی  $\text{tribas}$  استفاده گردید.



شکل ۶. نتایج شاخص های آماری محاسبه شده برای توابع فعال سازی مختلف

در شکل (۷) نیز نتایج بارش های شبیه سازی شده توسط تابع فعال سازی  $\text{tribas}$  با مقادیر مشاهداتی مقایسه شده است.

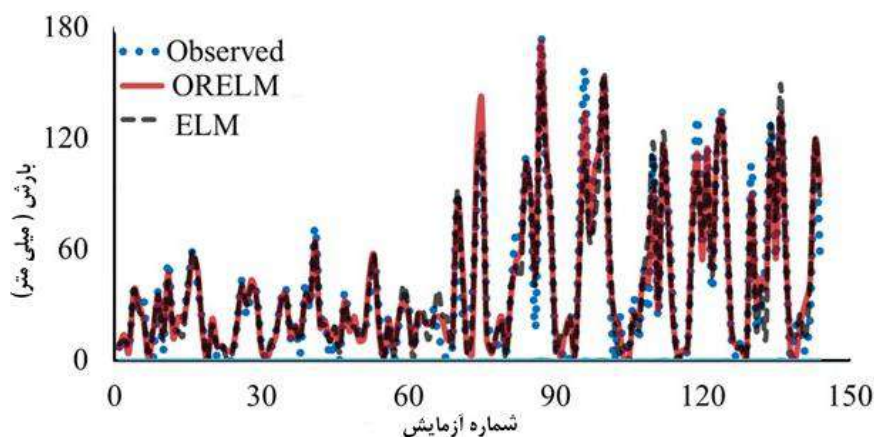


شکل ۷. مقایسه نتایج بارش های شبیه سازی شده توسط تابع فعال سازی  $\text{tribas}$  با مقادیر مشاهداتی

## ۳. مقایسه الگوریتم ها

در این قسمت از مطالعه حاضر، به مقایسه عملکرد مدل های  $\text{extreme learning machine (ELM)}$ ،  $\text{outlier robust}$ ،  $\text{extreme learning machine (ORELM)}$  و  $\text{extreme learning machine (ORELM)}$  پرداخته می شود. نتایج مقایسه شاخص های آماری محاسبه شده برای مدل های  $\text{ELM}$  و  $\text{ORELM}$  در شکل (۸) به تصویر کشیده شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی ها، مقدار ضریب همبستگی ( $R$ ) برای مدل های  $\text{ELM}$  و  $\text{ORELM}$  به ترتیب مساوی با  $۰/۶۱۸$  و  $۰/۹۵۲$  بدست آمدند. این در حالی است که مقدار  $\text{NSC}$  برای  $\text{ELM}$  و  $\text{ORELM}$  به ترتیب برابر با  $-۱/۱۳۷$  و  $-۱/۱۳۸$  تخمین زده شدند.

مقایسه بین عملکرد مدل های ماشین یادگیری مختلف از قبیل ELM و ORELM جهت تخمین مقادیر بارش ها در شکل (۸) قابل مشاهده است. بر اساس نتایج مدل سازی ها، مدل های ترکیبی عملکرد بهتری در مقایسه با مدل های ساده از خود نشان دادند. به عبارت دیگر مدل ORELM دقت بیشتری در مقایسه با مدل ELM از خود نشان داد. علاوه بر این، مدل ماشین یادگیری ترکیبی ORELM بهترین مدل جهت شبیه سازی مقادیر بارش های شهر ایلام شناسایی گردید.



شکل ۸. مقایسه بین عملکرد مدل های ماشین یادگیری مختلف از قبیل ELM و ORELM جهت تخمین مقادیر بارش ها

### بحث

در این مطالعه، جهت شبیه سازی مقادیر بارندگی های درازمدت شهر ایلام در یک بازه زمانی درازمدت ۴۴ ساله از ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴، یک مدل ماشین یادگیری ترکیبی توسعه داده شد. برای تعریف مدل هوش مصنوعی، مدل ELM و ماشین یادگیری Outlier robust extreme learning machine (ORELM) با همدیگر ترکیب شدند. در ابتدا داده های سری زمانی به دو دسته آموزش (۷۰ درصد) و آزمون (۳۰) تقسیم شدند. در ادامه، داده های مشاهداتی نرمال سازی شدند. این نرمال سازی جهت سهولت شبیه سازی مقادیر بارش ها توسط مدل هوش مصنوعی اجرا گردید.

### نتیجه گیری

بررسی توابع فعال سازی مختلف نشان داد که tribas بهترین تابع فعال سازی جهت شبیه سازی بارش های شهر ایلام توسط این ماشین یادگیری ترکیبی بود. مدل 9 ORELM به عنوان مدل برتر معرفی شد و مقادیر  $R$ ،  $VAF$  و  $NSC$  برای آن به ترتیب برابر با ۰/۹۶۵، ۰/۹۲۵ و ۰/۹۳۱ بودند. همچنین، تاخیرهای شماره (t-1)، (t-2)، (t-3) و (t-10) به عنوان مؤثرترین تاخیرهای داده های سری زمانی بارش شهر ایلام شناسایی شدند. در انتها نتایج مدل ترکیبی ORELM با مدل های هوش مصنوعی ELM و ORELM مقایسه گردید که مقایسه مذکور نشان دهنده عملکرد بهتر مدل ترکیبی ORELM بود.

### 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

- 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>
- 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>
- Gharib, R., Heydari, M., Kardar, S., & Shabanlou, S. (2020). Simulation of discharge coefficient of side weirs placed on convergent canals using modern self-adaptive extreme learning machine. *Appl Water Sci*, 10, 50. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1136-0>
- Azad, A., Manoochehri, M., Kashi, H., Farzin, S., Karami, H., Nourani, V., & Shiri, J. (2019). Comparative evaluation of intelligent algorithms to improve adaptive neuro-fuzzy inference system performance in precipitation modelling. *Journal of Hydrology*, 571, 214–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.062>
- 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>
- Basak, A., Mengshoel, O.J., Kulkarni, C., Schmidt, K., Shastry, P., & Rapeta, R. (2017). Optimizing the decomposition of time series using evolutionary algorithms: soil moisture analytics. *The genetic and evolutionary computation conference*, Berlin, Germany. <http://dx.doi.org/10.1145/3071178.3071191>
- 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>
- Hammad, M., Shoaib, M., Salahudin, H., Baig, M. A. I., Khan, M. M., & Ullah, M. K. (2021). Rainfall forecasting in upper Indus basin using various artificial intelligence techniques. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35(1-2), 1–23. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-021-02013-0>
- Hasani, F., and Shabanlou, S. (2021). Weighted regularized extreme learning machine to model the discharge coefficient of side slots. *Flow Measurement and Instrumentation*, 79, 101955. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.101955>
- Huang, G. B., Zhu, Q. Y., & Siew, C. K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1-3), 489–501. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126>
- Mahmodian, A.R., Rajabi, A., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2019). Evaluation of side orifices shape factor using the novel approach self-adaptive extreme learning machine Model. *Earth Syst. Environ*, 5, 925–935. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00579-x>
- Maqsood, I., Khan, M.R., & Abraham, A. (2004). An ensemble of neural networks for weather forecasting. *Neural Computing & Applications*, 13(2), 112–122. <https://doi.org/10.1007/s00521-004-0413-4>
- 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., & Ekhlasmand, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 24, 101062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062>
- Mehr, A. D., Nourani, V., Khosrowshahi, V. K., & Ghorbani, M. A. (2019). A hybrid support vector regression–firefly model for monthly rainfall forecasting. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(1), 335-346. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-018-1674-2>
- Mekanik, F., Imteaz, M. A., Gato-Trinidad, S., & Elmahdi, A. (2013). Multiple regression and Artificial Neural Network for long-term rainfall forecasting using large scale climate modes. *Journal of Hydrology*, 503, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.035>
- Mislan, H., Hardwinarto, S., & Sumaryono, M. A. (2015). Rainfall monthly prediction based on artificial neural network: a case study in Tenggara Station, East Kalimantan-Indonesia. *Procedia Computer Science*, 59, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.528>
- Moghadam, R.G., Yaghoubi, B., Rajabi, A. Shabanlou, S., & Izadbakhsh, M.A. (2022). Evaluation of discharge coefficient of triangular side orifices by using regularized extreme learning machine. *Appl Water Sci*, 12, 145. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01665-9>
- Nasseri, M., Asghari, K., & Abedini, M. J. (2008). Optimized scenario for rainfall forecasting using genetic algorithm coupled with artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, 35(3), 1415-1421. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.033>
- Poursaeid, M., Poursaeed, A.H., & Shabanlou, S. (2022). Study of water resources parameters using artificial intelligence techniques and learning algorithms: a survey. *Appl Water Sci*, 12, 156. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01675-7>
- Poursaeid, M., Poursaeed, A.H., & Shabanlou, S. (2024). Water quality fluctuations prediction and Debi estimation based on stochastic optimized weighted ensemble learning machine. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 1160-1174. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.146>
- Riad, S., Mania, J., Bouchaou, L., & Najjar, Y. (2004). Rainfall-runoff model using an artificial neural network approach. *Mathematical and Computer Modelling*, 40(7-8), 839-846. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2004.10.012>
- 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>
- Shafiei, S., Najarchi, M., & Shabanlou, S. (2020). Prognostication of discharge coefficient of labyrinth weir using outlier robust extreme learning machine. *Flow Measurement and Instrumentation*, 71, 101681. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101681>
- Shirali, E., Shahbazi, A. N., Fathian, H., Zohrabi, N., & Hassan, E. M. (2020). Evaluation of WRF and artificial intelligence models in short-term rainfall, temperature and flood forecast (case study). *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1-16. <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-020-01450-9>
- Xiang, Y., Gou, L., He, L., Xia, S., & Wang, W. (2018). A SVR–ANN combined model based on ensemble EMD for rainfall prediction. *Applied Soft Computing*, 73, 874-883. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.09.018>

- Yang, J., & Zhang, Y. (2011). Alternating approximation algorithms for  $\ell_1$ -problems in compress sensing. *SIAM J. Sci. Comput*, 33(1), 250-278. <https://doi.org/10.1137/090777761>
- Zarei, S., Yosefvand, F., & Shabanlou, S. (2020). Discharge coefficient of side weirs on converging channels using extreme learning machine modeling method. *Measurement*, 152, 107321. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107321>
- Zhang, K., & Luo, M. (2015). Outlier-robust extreme learning machine for regression problems. *Neurocomputing*, 151, 1519-1527. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.09.022>