انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز

Iranian Hydraulic Association

علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

ISSN 2588-5952

تابستان ۱۴۰۵ | جلد چهل و نهم شماره ۲

عنوان	نویسندگان	صفحه
بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع منقطع تک ردیفه بر کاهش طول کف‌بند در شیب‌شکن‌های قائم	آزاده جمشیدی، محمود شفاعی بجستان، محمد بهرامی یاراحمدی و مصطفی رحمانشاهی	۱
بررسی اثر تغییر الگوی کشت بر منابع آب حوضه آبریز سد ملاصدرا با استفاده از روش پویایی سیستم	ابوالفضل لقب‌دوست‌آرانی، حیدر زارعی، فریدون رادمنش، اباذر سلگی و مهدی ضرغامی	۱۵
تولید شبکه‌های بی‌سازمان بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه‌های فرسایش و رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد دز)	علیرضا دنه‌دزفولی و سیدسعید بحرینیان	۳۳
ارزیابی دقت مدل‌های مولد LarsWG و پیش بینی بارش در حوضه آبریز کرخه	مریم آریاصدر و داریوش رحیمی	۵۱
بررسی تأثیر استراتژی‌های مختلف کوددهی بر روی میزان نیترات خروجی شبکه آبیاری با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی دز)	عباس بختیاری‌فر، محمد الباجی، منا گلابی، سعید برومندنسب و علی شاهنظری	۷۳
تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رواناب و شبیه‌سازی بارش-رواناب با مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خرسان)	کاکا شاهدی، سیدحسین روشان، علی شاهنظری و مهدی قربانی‌فرد	۸۹
تعیین محیط خیس شده و سطح مقطع جریان آب در آبیاری جویچه‌ای با استفاده ازروش‌های مختلف	ابوبکر رحیمی	۱۰۵
ارزیابی مدل‌های بهینه هیبریدی SVR و RF در پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی محصول آفتابگردان	سعیده محمدزاده، وحید رضاوردی نژاد، جواد بهمنش و میلاد شرفی	۱۱۹

علوم و مهندسی آبیاری

(علمی)

جلد چهل و نهم شماره۲ **تابستان ۱۴۰۵**

مدیر مسؤول: سعید برومندنسب

سردبیر: سیدمحمود کاشفی‌پور

مدیر داخلی: مهدی دریایی

تایپ و صفحه آرایی: ندا یزدانی

ویراستار: ندا یزدانی

هیأت تحریریه :

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

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

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

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

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

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

بسم الله الرحمن الرحيم

اسامی بررسی کنندگان مقالات این شماره

ادیب	آرش
الباجی	محمد
بذرافشان	ام البنین
پارسائی	عباس
برومندنسب	سعید
جلالوند	مهدی
خرمیان	امین
خورشیددوست	علی محمد
دانشفراز	رسول
دریایی	مهدی
دیوبند هفشجانی	لاله
رمضانی مقدم	جواد
زایری	محمدرضا
سلطانی	جابر
شریفی	محمدرضا
شکری کوچک	سعید
گلابی	منا
گودرزی	مسعود
نصراللهی	علی حیدر

پیشگفتار

سپاس و ستایش پروردگار متعال که بر ما منت گذاشت تا با همت و پشتکار اعضاء هیأت تحریریه، کارکنان مجله، همکاری داوران و ویراستاران، جلد ۴۹، شماره ۲ مجله علمی علوم و مهندسی آبیاری با خرسندی فراوان به علاقه‌مندان علوم مهندسی آب تقدیم گردد.

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

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

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

سردبیر

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع منقطع تک ردیفه بر کاهش طول کف‌بند در شیب‌شکن‌های قائم آزاده جمشیدی، محمود شفاعی بجستان، محمد بهرامی یاراحمدی و مصطفی رحمانشاهی	۱
بررسی اثر تغییر الگوی کشت بر منابع آب حوضه آبریز سد ملاصدرا با استفاده از روش پویایی سیستم ابوالفضل لقب‌دوست‌آرانی، حیدر زارعی، فریدون رادمنش، اباذر سلگی و مهدی ضرغامی	۱۵
تولید شبکه‌های بی‌سازمان بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه‌های فرسایش و رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد دز) علیرضا دنه‌دزفولی و سیدسعید بحرینیان	۳۳
ارزیابی دقت مدل‌های مولد LarsWG و پیش بینی بارش در حوضه آبریز کرخه مریم آریاصدر و داریوش رحیمی	۵۱
بررسی تأثیر استراتژی‌های مختلف کوددهی بر روی میزان نیترات خروجی شبکه آبیاری با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی دز) عباس بختیاری‌فر، محمد الباجی، منا گلابی، سعید برومندنسب و علی شاهنظری	۷۳
تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رواناب و شبیه‌سازی بارش-رواناب با مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خرسان) کاکا شاهدی، سیدحسین روشان، علی شاهنظری و مهدی قربانی‌فرد	۸۹
تعیین محیط خیس شده و سطح مقطع جریان آب در آبیاری جویچه¬ای با استفاده ازروش‌های مختلف ابوبکر رحیمی	۱۰۵
ارزیابی مدل‌های بهینه هیبریدی SVR و RF در پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی محصول آفتابگردان سعیده محمدزاده، وحید رضاوردی نژاد، جواد بهمنش و میلاد شرفی	۱۱۹

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 1-14

Research Paper

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

EXTENDED ABSTRACT

Experimental investigation of the effect of single-row dentate baffles on the length of vertical drop structure

A. Jamshidi[1], M. Shafai Bejestan[2], M. Bahrami Yarahmadi[3] and M. Rahmanshahi [4]

1- MSc student, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2- Correponding Author, Professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (m_shafai@yahoo.com).*
3-Associate professor, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Research assistant, University of Hong Kong, Hong Kong.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 28 March 2025
Revised: 30 April 2025
Accepted: 24 May 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
bed erosion, grade control structure, vertical drop structures, dam reservior.

TO CITE THIS ARTICLE:

Jamshidi, A., Shafaei Bajestan, M., Bahrami Yarahmadi, M., Rahmanshahi, M. 2026. 'Experimental investigation of the effect of single-row dentate baffles on the length of vertical drop structure', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 1-14. doi: 10.22055/jise.2025.49328.2156

Abstract

Among the hydraulic structures used in watershed management for sediment management in mountain streams are vertical weirs. In order to prevent bed erosion downstream of the structures a horizontal concrete slab is used which a hydraulic jump is formed. One of the important design parameters is to reduce the length of the hydraulic jump and, as a result, reduce the length of the slab for the economic efficiency of the project, which is the main goal of this research. The experiments were conducted in a rectangular flume 30 cm wide and 12 m long. The experiments in this research are divided into two groups with and without barriers. In the experiment with barriers, a row of dentated barriers with a height of five centimeters installed at a distance of 40 centimeters from the weir toe. In addition, in the experiment with barriers, a sill was used at the end of the weir. The height of the end sill was considered to be two, three, and four centimeters. The experiments were conducted under seven different flow conditions (Froude number in the range of 6.34 to 12.5 at the beginning of the jump). The results showed that the use of a discontinuous barrier with the end sill reduced the length of the hydraulic jump. Changing the height of the final sill did not have a significant effect on reducing the length of the hydraulic jump, with a maximum effect of about 5.7%. The results showed that the use of a discontinuous barrier at heights of 0.05, 0.08, and 0.11 times the height of the structure reduced the length of the hydraulic jump by 52, 53, and 57.7 percent, respectively.

Introduction

Neck point migration in steeply sloping mountain streams, in addition to reducing the bed level and widening the channel for a long distance, causes a large amount of sediment to transport downstream. The sediments are deposit in the downstream areas of the riverbed or dam reservoirs, which leads to a decrease in the sediment transport capacity of the river or a gradual decrease in the capacity of the dam reservoir. Studies show that up to 90 percent of the sediment accumulated in dam reservoirs is due to

neck-point migration. To control such disaster, the location of all depressions in the streambed must first be determined with the help of accurate maps or ground surveys. Then, a grade control structure is construct at the site of the depression. Among the most widely used structures is the vertical drop structure (VDS). As is clear, the kinetic energy at the basin should be dissipate by creation of hydraulic jump. This occurs when sufficient downstream flow depth is available. Although this point is taken into account during the design of the structure, the gradual erosion of the channel bed during operation will lead to the deepening of the downstream streambed and, as a result, tailwater depth decreases. In addition, climate change has led to abnormal events, and as a result, the flow conditions have also changed, causing floods with higher flow discharge and higher entrance flow velocity. Which results in increasing both L_1 and L_2 and part of the jump shifted downstream of the basin which led scouring at the streambed.

Considering the above problem mentioned, a new structure can be construct, or the existing structure to be modified in such a way that the hydraulic jump requires a smaller tailwater depth and occurs over a shorter length. Various solutions have been investigated so far to deal with this problem. Among them, several studies have been conducted to reduce the kinetic energy of the jet entering the structure, which in turn reduces the L_1 and the length of the hydraulic jump or L_2. Placing mesh plates, dentate the crest of the structures or widening the approaching channel are among studies have been done so far. Although these studies have achieved good results in dissipating the approach velocity, trapping the boulders, tree branches, foliage, and floating objects can block the meshes and take them out of use.

Therefore, the purpose of the present studies is to use dentate baffles on the basin floor and the end sill at the end of the basin to investigate their use on the basin length reduction.

Experimental apparatus

A model of vertical drop structure (VDS) built in a flume of 15 meters long, 30 cm wide and 50 cm long with glass walls at the hydraulic laboratory of Shahid Chamran University of Ahvaz. To measure the flow rate, an ultrasonic digital flowmeter manufactured by Farasanj Company used with an accuracy of one percent. A mechanical depth gauge with an accuracy of one tenth of a millimeter used to measure the water depth. The VDS is a metal plate 30 cm wide and 35 cm high, installed at 3 meters downstream of the flume entrance. Two series of experiments conducted: the first series of seven experiments without baffles and the second series of 21 experiments with baffles in the middle of the jump and at the end with three different heights. The test method was as follows: the water flow entered the flume slowly to provide the desired flow rate. Then the downstream valve gradually closed until the hydraulic jump formed freely downstream. These conditions e kept constant for a while and after ensuring that the flow conditions is stable. Seven different inlet flow conditions were established. The head upstream of the structure was considered equal to : 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 and 7 cm, respectively. During each test, the flow rate, the initial jump depth, the secondary jump depth, the jump length and the location of the nape flow attack the bed downstream of the breakwater measured. The hydraulic jump length s defined as the distance between the starting point and the point where the bubbles almost disappear and water surface has little variation. The initial and secondary jump depths measured by a point gauge. At the same time, photographs and videos taken from the front view with a camera.

Results

The measured L_1 were compared with Rand (1955) formula which shows 2% difference. The measured Y_2 also were compared with Blanger's equation and the Rand (1955)'s relation The results show good agreements.

Figure (1) also shows comparison of the results of L_2/P for the baseline and dentate floor baffle (DBF) and end sill with different height. As seen, the value of L_2/P is higher for the end sill with $H_2/P=0.05$ than in the other end sill. After that, the end sill with $H_2/P=0.08$ have the highest value of L_2/P. The value of L_2/P at $H_2/P=0.11$ has the lowest value. It should be noted that the value of L2/P at

H2/Ps of 0.05 and 0.08 is the same except for Yc/P of 0.09, so the data related to them are consistent. Figure (1) shows that the value of L2/P in the experiments with the presence of DBF with different threshold heights has decreased compared to the control experiments. The lowest value of L_2/P reduction is related to all Yc/Ps with height H_2/P=0.05, which is an average of 52%. The value of L2/P reduction for the end sill with height H/P=0.08 for Yc/Ps of 0.07 to 0.19 is an average of 53%. The value of L_2/P reduction for the end sill with height of H2/P=0.11 at Yc/Ps = 0.07 to 0.19 is an average of 57.7%; therefore, the weakest performance in terms of jump length reduction is for the end sill with H_2/P=0.05 and the best performance in this regard is for the end sill with height of H_2/P=0.11.

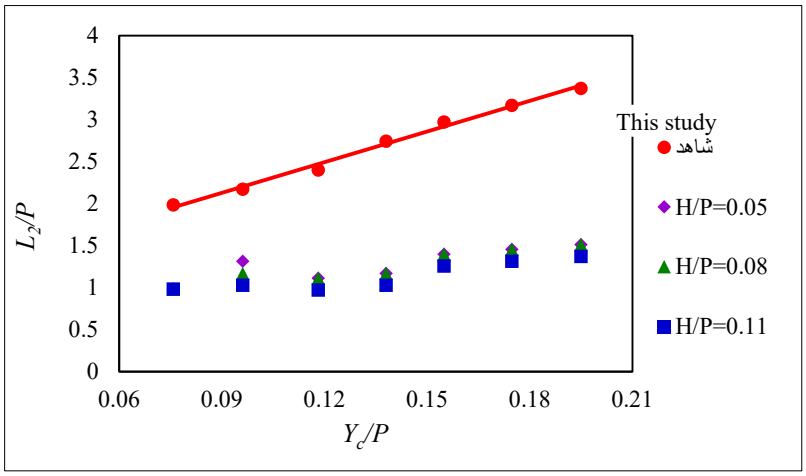


Fig. 1- Variation of L_2/P from basin without baffles and with dentate baffles and end sill with different height

Conclusion

The aim of the present study was to experimentally investigate the effect of dentate baffles installed at the floor of vertical drop structure's basin and the end sill with different height, on the jump characteristics. The basin can be design and installed to control the neck-point migration in mountain streams or to modify the existing basin with smooth bed which its downstream bed has experience sever erosion. To reach such purpose, two series of experiments carried out and by analysis of data, the following results were obtained:

1-The results of the baseline tests agree with the Rand (1955)'s prediction relations for the L_1 and Y_2 in the basin.

2-The height of the end sill has shown a little effect on the length of hydraulic jump, L_2.

3-The dentate floor baffles and the higher end sill (H_2/P=0.11) can reduce the jump length by as high as much 57% compare to the jump which occur at the smooth bed basin.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1400.25487.

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Azadeh Jamshidi, experimental works and data collection.
Second Author: Mahmood Shafaei Bajestan, research topic, analysis of data, respond to the reviewers.
Third Author: Mohammad Bahrami Yarahmadi, control and analysis of data.
Fourth author: Mostafa Rahmanshahi, analysis of some data.

Acknowledgment

This study was supported financially from grant provided by vice-chancellor of research of Shahid Chamran university of Ahvaz. The authors would like to thanks for providing the grant.

References

1- Rand, W., 1955, September. Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 81, No. 9, pp. 1-13). ASCE.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۴-۱

بررسی آزمایشگاهی تأثیر موانع منقطع تک ردیفه بر کاهش طول کف‌بند در شیب‌شکن‌های قائم

آزاده جمشیدی [۱]، محمود شفاعی بجستان [۲]، محمد بهرامی یاراحمدی [۳] و مصطفی رحمانشاهی [۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.m_shafai@yahoo.com

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- محقق، دانشگاه پلی تکنیک هنگ کنگ، هنگ کنگ، چین.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۸ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

از جمله سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده در آبخیزداری به‌منظور مدیریت رسوب در آبراهه‌های کوهستانی شیب شکن‌های قائم می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از آبشستگی بستر در پایین دست شیب شکن قائم از کف‌بند استفاده می‌شود که روی آن پرش هیدرولیکی شکل می‌گیرد. یکی از پارامترهای مهم طراحی کاهش طول پرش هیدرولیکی و در نتیجه کاهش طول کف‌بند برای اقتصادی شدن پروژه می‌باشد که هدف اصلی این تحقیق محسوب می‌شود. آزمایش‌ها در فلوم مستطیلی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و طول ۱۲ متر انجام شده است. آزمایش‌های این تحقیق به دو دسته با مانع و بدون مانع تقسیم می‌شود. در آزمایش با مانع از یک ردیف مانع منقطع به ارتفاع پنج سانتی‌متر که در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از شیب شکن نصب شده بود، استفاده شد. علاوه بر این در آزمایش با مانع از آستانه در انتهای کف‌بند استفاده شد. ارتفاع آستانه انتهایی دو، سه و چهار سانتی‌متر در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها تحت هفت شرایط مختلف جریان (عداد فرود در محدوده ٦/٣٤ تا ۱۲/۵در ابتدای پرش) انجام شدند. نتایج نشان داد که استفاده از مانع منقطع به‌همراه آستانه انتهایی باعث کاهش طول پرش هیدرولیکی شده است. تغییر ارتفاع آستانه انتهایی تأثیری زیادی بر کاهش طول پرش هیدرولیکی نداشت بگونه‌ای که حداکثر تاثیر آن حدود ۵/۷ درصد می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده از مانع منقطع به‌همراه آستانه انتهایی به ارتفاع‌های ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۱۱ برابر ارتفاع شیب شکن باعث شد طول پرش هیدرولیکی به‌ترتیب ۵۲، ۵۳ و ۵۷/۷ درصد کاهش یابد.

کلید واژه‌ها: کنترل رسوب بستر، آبراهه با شیب تند، سازه کنترل شیب، شیب شکن قائم.

مقدمه

فرسایش بستر در آبراهه‌های کوهستانی که شیب تندی دارند، علاوه بر کاهش تراز بستر و تعریض آبراهه، باعث انتقال رسوب زیادی به پایین‌دست می‌گردد. این رسوبات در نواحی پایین دست در بستر رودخانه‌ها و یا مخازن سدها نهشته شده که منجر به کاهش ظرفیت انتقال رسوب در رودخانه و یا کاهش تدریجی ظرفیت مخزن سد می‌گردد. در چنین آبراهه‌هایی، هر نوع تغییر اختلاف تراز بستر یا رقوم سطح آب، باعث شروع فرسایش پس‌رونده می‌گردد. بدین ترتیب که موقعیت پایین افتادگی (کاهش تراز) بستر، به سمت بالادست مهاجرت می‌کند. در یک سیلاب ممکن است این مهاجرت به بالادست، تا کیلومترها رخ دهد و باعث عمیق شدن بستر آبراهه و تعریض آن در نتیجه ریزش سواحل شود. در نتیجه حجم زیادی از رسوب به پایین دست منتقل می‌شود. مطالعه‌ها نشان می‌دهد که تا ۹۰ درصد رسوب تجمع یافته در سدها ناشی از فرسایش پس‌رونده می‌باشد. برای مهار فرسایش پس‌رونده، ابتدا باید موقعیت تمام پایین افتادگی‌های بستر آبراهه با کمک نقشه‌های دقیق یا پیمایش زمینی مشخص گردد. آن‌گاه در محل پایین افتادگی بستر اقدام به ساخت سازه‌ای مقاوم در مقابل جریان سیلابی کرد تا از پس‌روی محل پایین افتادگی به بالادست جلوگیری شود. انواع سازه‌ها با مصالح مختلفی تاکنون به‌وجود آمده و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند که به سازه‌های کنترل شیب معروف هستند. از جمله‌ی این سازه‌ها می‌توان به شیب شکن‌های مایل و قائم اشاره کرد. این نوع شیب شکن‌ها با مصالح مختلفی مانند لاشه سنگ، آجر و ملات سیمان، توری سنگی (گابیون)، سنگ و سیمان، بتن پیش ساخته و یا بتن‌آرمه احداث می‌شوند. شکل (۱) نمونه‌هایی از انواع شیب شکن را نشان می‌دهد (Chamani and Beirami, 2002).

 DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156


Concrete vertical drop


Inclined drop


Gabion stepped drop

Fig. 1- Different types of drop structures (searching in Google)
شکل ۱- انواع سازه‌های شیب شکن (جستجو در گوگل)

بیشترین کاربرد در بین انواع سازه‌های اصلاح شیب را سازه شیب شکن قائم دارد که موضوع مطالعه حاضر می‌باشد. اولین مطالعه‌ها مرتبط با شیب شکن قائم توسط Moore (1943)، Donnelly و Blaisdell (1959)، Rand (1955) و Gill (1979) انجام شده است و روابطی برای ابعاد حوضچه و نیز نیم رخ جت عبوری از شیب شکن ارائه داده‌اند. جریان آب با عبور از شیب شکن به‌صورت سقوط آزاد به کف‌بند پایین‌دست سازه برخورد می‌کند. جت آب پس از برخورد با کف‌بند، به دو قسمت تقسیم می‌شود. بخشی از آن به عقب جت رانده شده که با برخورد آن به دیواره عمودی شیب شکن، انرژی جنبشی آن به صفر رسیده و به انرژی فشاری تبدیل می‌شود در نتیجه سطح آب پشت جت در فاصله بین جت و دیواره عمودی شیب شکن افزایش می‌یابد. در صورتی که شرایط جریان ورودی به شیب شکن تغییر نکند، ارتفاع آب در ناحیه نیز تغییر نمی‌کند هر چند به‌دلیل نوسانات لحظه‌ای سرعت جت آب، سطح آب پشت جت نیز نوسان می‌کند. بخش دیگری از جت برخوردی به کف‌بند، با انرژی زیاد به پایین‌دست منتقل می‌شود لذا ضروری است انرژی جنبشی آن قبل از ورود به بستر فرسایشی آبراهه، تا حدی کاهش یابد که منجر به فرسایش بستر آبراهه نگردد. ایجاد پرش هیدرولیکی یکی از راه‌های مؤثر برای کاهش انرژی جنبشی می‌باشد. ایجاد پرش هیدرولیکی البته مستلزم وجود عمق پایاب کافی در آبراهه می‌باشد. در صورتی که عمق آب در دبی طراحی به‌اندازه‌ی عمق مزدوج پرش هیدرولیکی باشد، در آن صورت در پایین‌دست محل برخورد جت با کف‌بند، پرش هیدرولیکی شکل خواهد گرفت. در نتیجه طول کف بند باید به‌اندازه‌ی مجموع فاصله افقی محل برخورد جت با کف‌بند از دیواره عمودی شیب شکن و طول پرش هیدرولیکی باشد. در صورتی که به هر دلیلی عمق پایاب کمتر از عمق مزدوج باشد، پرش به پایین‌دست منتقل شده و منجر به آبشستگی بستر آبراهه در پایین‌دست سازه و در نهایت تخریب سازه خواهد شد. هر چند در زمان طراحی شیب شکن، این نکته مد نظر قرار می‌گیرد، ولی فرسایش تدریجی بستر آبراهه در طول بهره‌برداری منجر به گود شدگی بستر پایین‌دست و در نتیجه کاهش عمق پایاب می‌گردد. علاوه بر این تغییر اقلیم منجر به رخدادهای غیر نرمال شده است و در نتیجه الگوی طبیعی جریان نیز تغییر کرده است که باعث وقوع سیلاب‌ها با دبی بیشتری شده است. افزایش دبی آبراهه نیز باعث افزایش سرعت ورودی جریان به سازه می‌گردد که درنتیجه آن طول پرش هیدرولیکی افزایش یافته و بخشی از پرش به خارج از کف‌بند منتقل می‌شود و چنانچه تمهیداتی صورت نگیرد، می‌تواند منجر به آبشستگی در پایین‌دست سازه گردد.

راهکارهای مختلفی تاکنون مورد بررسی قرار گرفته است تا بتوان با این مسئله مقابله کرد. مطالعه‌هایی در خصوص تأثیر شیب پایین‌دست توسط Hong et al (2010) انجام شد. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که طول کف‌بند با افزایش میزان شیب پایین‌دست افزایش یافته است. Liu et al. (2014) به بررسی تأثیر شیب مثبت کانال در بالادست شیب شکن قائم مستطیلی بر مشخصات جریان پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش شیب، عمق لبه شیب شکن، عمق استخر و راندمان استهلاک انرژی کاهش پیدا می‌کند. Chiu et al. (2017) با در نظر گرفتن یک گودال مستطیلی با ابعاد متفاوت در پای شیب شکن به بررسی عددی جریان بر روی

شیب شکن قائم پرداختند. نتایج مطالعه‌های آن‌ها بیان‌گر این است که وجود یک گودال در پای شیب شکن سبب به‌وجود آمدن سه نوع رژیم جریان شامل جریان سطحی، جریان ریزشی و جریان نوسانی متناوب بر روی این سازه می‌گردد. مطالعه‌های متعددی انجام شده است تا بتوان انرژی جنبشی جت را کاهش داد که خود باعث کاهش فاصله افقی برخورد جت تا دیواره عمودی شیب شکن و نیز کاهش طول پرش هیدرولیکی می‌گردد. مطالعه‌هایی نیز با هدف تعیین شرایط هیدرولیکی یا اصلاح دهانه ورودی شیب شکن به‌منظور افزایش استهلاک انرژی در نتیجه کاهش ابعاد حوضچه صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه Ghaderi, et al (2019) به بررسی تأثیر تنگ شدگی ورودی شیب شکن پرداختند و دریافتند که با وجود تنگ‌شدگی قائم سرعت ورودی جریان افزایش می‌یابد که منجر به ورود هوا و افزایش تلاطم و افزایش استهلاک انرژی به میزان ۳۰ درصد می‌گردد. یک سری مطالعه‌هایی در خصوص نصب صفحات مشبک در ورودی شیب شکن نیز انجام شده است. Hasannia et al. (2020) دریافتند که نصب صفحات مشبک ترکیبی (افقی و قائم) در ورودی شیب شکن تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. Daneshfaraz et al (2020) گزارش دادند که تغییر شیب مثبت صفحات مشبک بر روی عمق نسبی پایین‌دست و استهلاک انرژی بی‌تاثیر است. مطالعه Daneshfaraz et al (2021) نشان داد که با نصب صفحات مشبک مقدار استهلاک انرژی نسبی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. ضمن اینکه میزان بازشدگی صفحات مشبک تأثیر چندانی بر روی استهلاک انرژی جریان ندارد. Mirzaee et al. (2021) و Pasbani Khiavi و Hasanniya (2022)، با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D به بررسی عددی پارامتر استهلاک انرژی شیب شکن قائم با لبه دندانه‌ای افقی پرداختند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که لبه دندانه‌ای افقی، شدت آشفتگی را افزایش و در نتیجه میزان استهلاک انرژی جنبشی را افزایش می‌دهد. ضمن اینکه افزایش ابعاد لبه و کاهش تعداد آن‌ها نیز مؤثر می‌باشد.

با نگاهی به مطالعه‌های گذشته مشخص می‌شود که بیشتر تحقیقات برای افزایش استهلاک انرژی و در نتیجه کاهش طول کف‌بند، بر اصلاح سازه ورودی با نصب صفحات مشبک یا دندانه کردن لبه تاج بوده است. این روش‌ها هر چند موجب افزایش استهلاک انرژی می‌گردد ولی برای سازه شیب شکن در آبراهه‌هایی که رسوب یا مواد شناور حمل می‌کنند مناسب نیست و در کوتاه مدت منجر به گرفتگی می‌شود و تأثیر آن ممکن است بر خلاف انتظار باشد. از این رو در این تحقیق استفاده از مانع منقطع در بستر یا کف‌بند سازه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مطالعه‌های محققین قبلی نشان داده که نصب موانع در کف سازه می‌تواند طول پرش هیدرولیکی را کاهش دهند (Shafai Bejestan and Neisi, 2009).

مواد و روش‌ها

آنالیز ابعادی

متغیرهای مؤثر بر پرش هیدرولیکی در شرایط شیب شکن قائم بدون مانع و با مانع و آستانه انتهایی که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند، عبارت‌اند از: عمق اولیه پرش هیدرولیکی (Y_1)، عمق ثانویه پرش هیدرولیکی (Y_2)، سرعت جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی (V_1)، عمق بحرانی جریان در بالادست شیب شکن (Y_C)، جرم مخصوص آب (ρ)، لزوجت دینامیکی آب (μ)، کشش سطحی (σ)، شتاب ثقل (g)، ارتفاع شیب شکن (P)، ارتفاع مانع عرضی (H)، فاصله مانع عرضی از شیب شکن (X)، ارتفاع آستانه انتهایی (H_2)، طول برخورد تیغه جریان به کف‌بند در پایین‌دست شیب شکن (L_1)، طول پرش هیدرولیکی (L_2) (رابطه ۱).

$$f(Y_1, Y_2, V_1, Y_C, \rho, \mu, \sigma, g, P, H, X, H_2, L_1, L_2) = 0 \quad (۱)$$

با استفاده از روش پی باکینگهام و انتخاب متغیرهای ρ و V_1 و Y_1 به‌عنوان متغیرهای تکراری، پارامترهای بی‌بعد استخراج شدند. از آنجا که در تمامی آزمایش‌ها عمق جریان روی تاج شیب شکن در بالادست بیش از سه سانتی‌متر بود لذا اثر کشش سطحی یا عدد وبر در این تحقیق قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد (Rahmanshahi et al., 2023 Doustkam et al., 2024). علاوه بر این جریان در بالادست و پایین دست سازه کاملاً آشفته و تأثیر لزجت نیز ناچیز است لذا از عدد رینولدز جریان نیز صرفنظر می‌شود. علاوه بر این مقدار پارامتر X/P در این تحقیق ثابت و برابر ۱/۱۴ می‌باشد لذا از این پارامتر نیز صرفنظر می‌شود. در نتیجه رابطه نهایی به‌صورت زیر می‌باشد (رابطه ۲):

$$\frac{Y_2}{Y_1}, \frac{Y_2}{P}, \frac{L_2}{P}, \frac{L_1}{P} = f(Fr_1, \frac{H}{P}, \frac{H_2}{P}, \frac{Y_C}{P}) \quad (۲)$$

در رابطه فوق Fr_1 عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی می‌باشد.

 DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156

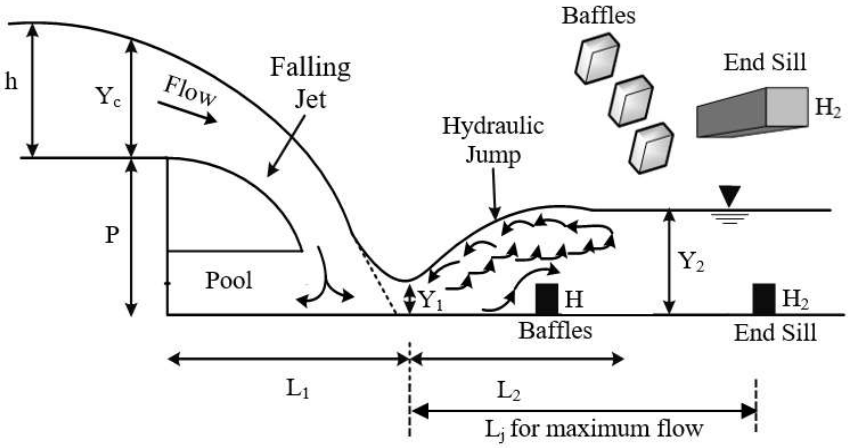


Fig. 2- Vertical drop structures with dentate baffles and end sill
شکل ۲- شیب شکن قائم با مانع منقطع و آستانه انتهایی



Fig. 3- View of the laboratory flume
شکل ۳- نمائی از فلوم آزمایشگاهی

تجهیزات آزمایشگاهی

آزمایش‌ها در فلومی به طول ۱۵ متر، عرض ۳۰ سانتی‌متر و عمق ۵۰ سانتی‌متر با دیواره‌های شیشه‌ای انجام شده است (شکل ۳). برای اندازه‌گیری دبی از فلومتر دیجیتالی آلتراسونیک تولید شرکت فراسنج است با دقت یک درصد استفاده شد. از عمق‌سنج مکانیکی با دقت یک دهم میلی‌متر برای اندازه‌گیری عمق آب استفاده شده است. شیب شکن، صفحه‌ی فلزی به عرض ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد که در فاصله سه متری از ابتدای فلوم نصب شده است. موانع از جنس تفلون فشرده بوده که در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از ابتدای شیب شکن نصب گردیده است. این فاصله با آزمایش‌های مقدماتی که بیشترین تأثیر را داشته باشد تعیین گردید. در فاصله نزدیکتر، جت با برخورد به مانع موجب می‌شد تا سطح آب به‌طور ناگهانی افزایش یابد و تأثیر موانع بر طول پرش کمتر شود. در فواصل دورتر نیز تأثیر آن‌ها کمتر بود. در مطالعه Donnelly و Blaisdell (1959) بر روی شیب شکن قائم، فاصله نصب موانع از محل برخورد جت با کف برابر $0.8Y_c$ پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در آزمایش‌های شاهد و در بیشترین دبی جریان، عمق بحرانی برابر ۶/۸ سانتی‌متر و L_1 برابر ۳۷ سانتی‌متر بود لذا در مطالعه حاضر این فاصله حدوداً $0.45Y_c$ می‌باشد. ارتفاع موانع منقطع برابر پنج سانتیمتر (معادل حدود $0.80Y_c$) بود که تقریبا برابر با توصیه Donnelly و Blaisdell (1959) که معادل $0.85Y_c$ می‌باشد، مطابقت دارد. عرض و فاصله بین موانع سه سانتی‌متر (معادل $0.45Y_c$) موانع منقطع با دیوار ها نیز سه سانتی‌متر فاصله داشتند. ضمناً مقدار Y_1 و یا عمق آب قبل از پرش در بیشترین دبی برابر دو سانتی‌متر بوده است که در این صورت ارتفاع موانع منقطع $2.5Y_1$، عرض ، فاصله بین موانع و فاصله موانع از دیوار برابر $1.5Y_1$بوده است. همچنین موانع منقطع در فاصله $1.5Y_1$ از محل اصابت جت به بستر نصب شده‌اند. ارتفاع آستانه انتهایی در این مطالعه متغیر (دو، سه و چهار سانتی‌متر) بود.

برای رسیدن به اهداف تحقیق، دو سری آزمایش انجام شد که سری اول تعداد هفت آزمایش بدون مانع و سری دوم ۲۱ آزمایش با مانع در میانه پرش و آستانه انتهایی در انتهای پرش انجام شد. ارتفاع آستانه انتهایی متفاوت بود. روش انجام آزمایش هم بدین گونه بود که جریان آب به‌آرامی وارد فلوم می‌شد تا دبی مورد نظر

تأمین گردد. آنگاه دریچه پایین دست به تدریج بسته می‌شد تا پرش هیدرولیکی در پایین‌دست شیب شکن به‌طور آزاد شکل بگیرد. این شرایط برای مدتی ثابت نگه داشته می‌شد و پس از اطمینان از ثابت بودن شرایط جریان، رقوم سطح آب از بالادست شیب شکن تا پایین‌دست در چندین نقطه توسط عمق‌سنج اندازه‌گیری می‌شد. هم‌زمان توسط دوربین از نمای روبه‌رو عکس و فیلم نیز تهیه می‌شد. دبی جریان نیز پس از اطمینان از تثبیت جریان، قرائت و یادداشت می‌گردید. در این مطالعه از هفت دبی مختلف استفاده شد به‌طوری که عمق جریان در بالادست شیب شکن (h) به‌ترتیب برابر ۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ و ۷ سانتی‌متر و عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش به‌ترتیب برابر ۶/۳۴، ۶/۸۴، ۷/۵۲، ۸/۰۶، ۹/۰۷، ۱۰/۵۰ و ۱۲/۵۲ بود. در طول هر آزمایش دبی جریان، عمق اولیه پرش، عمق ثانویه پرش، طول پرش و محل اصابت تیغه جریان به بستر در پایین‌دست شیب شکن اندازه‌گیری شد. طول پرش هیدرولیکی به‌عنوان فاصله بین نقطه شروع پرش و نقطه‌ای که تقریباً حباب‌ها از بین می‌روند تعریف می‌شود. برداشت عمق اولیه و ثانویه پرش توسط عمق‌سنج انجام شد. مکان مناسب برای اندازه‌گیری عمق ثانویه، انتهای پرش هیدرولیکی است که اثرات آشفتگی و سایر اختلالات در جریان کمتر است و تراز سطح آب تقریباً وضعیت ثابتی دارد. از تفاضل رقوم سطح آب و رقوم بستر، عمق اولیه و ثانویه پرش به دست می‌آید. در شکل (۴) نمائی از پرش هیدرولیکی در آزمایش بدون مانع (شاهد) نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

آزمایش‌های بدون مانع

تخمین L_1 و Y_2

از اولین مطالعه‌هایی که منجر به ارائه ابعاد طراحی شیب شکن قائم شده است می‌توان به مطالعه‌های Rand (1955) اشاره کرد که روابط (۳) و (۴) را برای یک شیب شکن قائم در بستر بدون مانع ارائه کرد.

$$\frac{L1}{P} = 4.3\left(\frac{Yc}{P}\right)^{0.81} \quad (۳)$$

$$\frac{Y2}{P} = 1.66\left(\frac{Yc}{P}\right)^{0.81} \quad (۴)$$

در روابط فوق L_1 فاصله محل اصابت تیغه جریان به بستر از شیب شکن، Y_C عمق بحرانی جریان در بالادست لبه‌ی شیب شکن، P ارتفاع شیب شکن و Y_2 عمق مزدوج پرش هیدرولیکی است (شکل ۲).

شکل (۵) طول اندازه‌گیری شده L_1 در این مطالعه را در مقایسه با طول محاسبه شده از رابطه (۳) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج تحقیق تفاوت اندکی با رابطه (۳) دارد و میزان خطا به‌طور متوسط دو درصد می‌باشد.

شکل (۶-الف) نیز مقادیر اندازه‌گیری شده عمق مزدوج Y_2 را در مقابل مقادیر محاسبه شده از رابطه بلانگر Belanger (1828) رابطه (۵) را نشان می‌دهد.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1\right) \quad (۵)$$

در رابطه فوق، Y_1 و Y_2 به‌ترتیب برابر اعماق اولیه و ثانویه پرش هیدرولیکی و Fr_1 عدد فرود جریان در مقطع اولیه پرش هیدرولیکی است.

با دقت در شکل (۶) ملاحظه می‌کنید که نسبت Y_2/Y_1 آزمایشگاهی کمتر از رابطه بلانگر است. محاسبات نشان داد که نسبت Y_2/Y_1 حاصل از رابطه بلانگر به‌طور متوسط نه درصد بیش از داده‌های آزمایشگاهی است. میزان خطا می‌تواند ناشی از فرضیات به‌کار رفته در رابطه بلانگر و همچنین خطای ناشی از تجهیزات مورد استفاده و یا خطای انسانی در برداشت داده‌ها باشد که در تحقیقات آزمایشگاهی معمول است و این میزان خطا مورد قبول می‌باشد. علاوه بر این داده‌های حاصل از آزمایش‌های بدون مانع با رابطه ارائه شده Rand (1955) نیز مقایسه گردید که نتایج در شکل (۶ ب) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و رابطه (۴) وجود دارد. محاسبات نشان داد که Y_2/P حاصل از نتایج آزمایشگاهی به‌طور متوسط سه درصد بیش از رابطه (۴) است.



Fig. 4- View of the formation of the hydraulic jump of the control experiment

شکل ٤- نمایی از تشکیل پرش هیدرولیکی آزمایش شاهد در وضعیت پایدار

 DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156

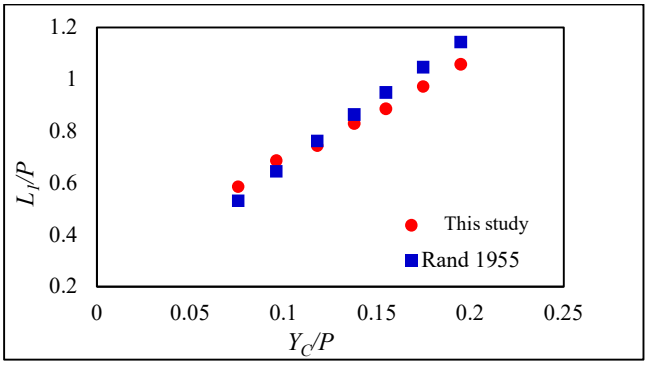


Fig. 5- Comparison of the baseline experimental data with Eq.3

شکل ۵ – مقایسه نتایج این تحقیق با رابطه (۳)

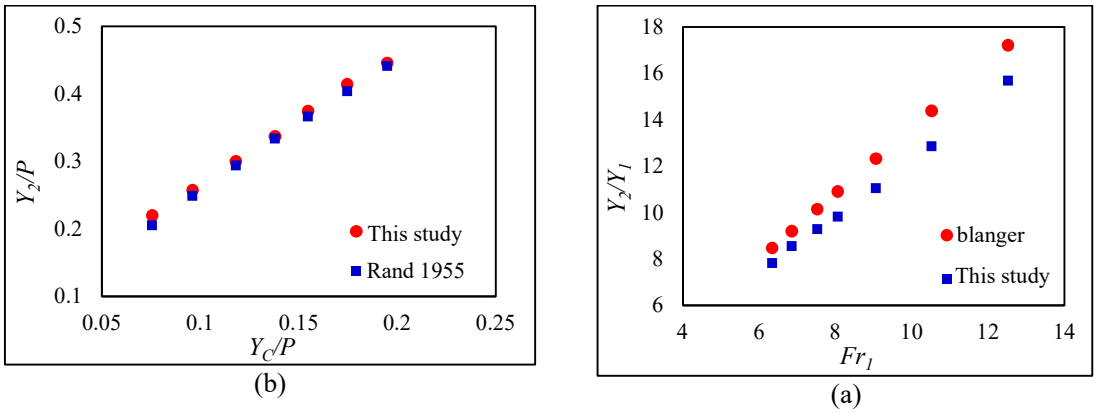


Fig. 6- Comparison of the sequent depth ratio obtained from the baseline experiments with equations of (a) Belanger (1828) and (b) Rand (1955)

شکل ٦- مقایسه نسبت اعماق مزدوج پرش حاصل از آزمایش شاهد و معادله‌های (a) بلانگر (۱۸۲۸) و (b) رند (۱۹۵۵)

آزمایش‌های با مانع منقطع

موانع منقطع در فاصله یک سوم طول پرش هیدرولیکی از شروع پرش نصب گردید. طول پرش هیدرولیکی هم با توجه به بیشترین طول که در این آزمایش‌ها به‌دست آمد، مربوط به آزمایش با حداکثر دبی جریان در آزمایش‌های بدون مانع، اختیار گردید. در این سری آزمایش‌ها، آستانه انتهایی پیوسته نیز در انتهای طول پرش مربوط به حداکثر دبی جریان نیز نصب گردید. سه اندازه مختلف ارتفاع آستانه انتهایی مورد آزمایش قرار گرفت. هدف از نصب موانع میانی و آستانه انتهایی بررسی میزان تأثیر آن‌ها بر طول پرش هیدرولیکی بود. این موانع تأثیر چندانی بر طول L_1 که تابع شرایط جریان ورودی به شیب شکن است، ندارد ولی جریان فوق بحرانی که به سمت پایین‌دست حرکت می‌کند با برخورد به این موانع بخشی از انرژی جنبشی خود را مستهلک می‌کند در نتیجه انتظار این است که طول پرش هیدرولیکی کاهش یابد. از این رو در این بخش تأثیر این موانع صرفاً روی طول پرش هیدرولیکی بررسی می‌شود. توضیح اینکه نتایج تحقیقات از جمله Izadjoo و Shafai- Bejestan (2007) و Shafai Bejestan و Neisi (2009) نشان داد که موانع نیز می‌توانند باعث کاهش عمق مزدوج پرش هیدرولیکی تا حدود ۲۰ درصد گردد. ولی در این بررسی و همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در این سری آزمایش‌ها، عمق پایاب برابر عمق مزدوج در آزمایش‌های بدون مانع اختیار گردید، در نتیجه تأثیر موانع منقطع صرفاً بر طول پرش هیدرولیکی بررسی شده است.

ارتفاع آستانه انتهایی

در این بخش اثر ارتفاع آستانه انتهایی بر طول پرش هیدرولیکی بررسی شده است. در شکل (۷) تغییرات طول نسبی پرش هیدرولیکی (L_2/P) در مقابل ارتفاع نسبی آستانه انتهایی (H_2/P) را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تغییر ارتفاع نسبی آستانه (H_2/P) در محدوده ۰/۰۵ الی ۰/۰۸ و در جریان با عمق‌های بحرانی ۰/۰۷، ۰/۱۵، ۰/۱۷، ۰/۱۹=Y_c/P، تأثیری بر مقدار L_2/P ندارد. افزایش شرایط جریان در Y_c/P های ۰/۰۹، ۰/۱۱ و ۰/۱۳ باعث کاهش اندکی بر L_2/P گردیده است به‌طوری که محاسبات نشان می‌دهد که این کاهش به‌ترتیب برابر ۲۱/۷، ۳۰/۶ و ۱۷/۸ درصد است. همچنین افزایش ارتفاع آستانه (H_2/P) در محدوده

۰/۰۸ الی ۰/۱۱ و برای جریان با Y_c/P های ۰/۰۷، ۰/۰۹، ۰/۱۱ و ۰/۱۳ روی شیب شکن، تأثیرناچیزی بر مقدار L_2/P ندارد. افزایش ارتفاع نسبی آستانه برای Y_c/P های ۰/۱۵، ۰/۱۷ و ۰/۱۹ باعث کاهش مقدار L_2/P گردید. این کاهش به‌ترتیب برابر ۷/۲، ۶/۵ و ۰/۰۶ درصد محاسبه شد. همان‌گونه که از شکل (۷) مشهود است، با تغییر Y_c/P از ۰/۱۳ به ۰/۱۵ مقدار L_2/P افزایش بیشتری را نسبت به Y_c/P های قبلی نشان می‌دهد.

شکل (۸) تغییرات L_2/P برای آزمایش‌های شاهد و با مانع منقطع را نشان می‌دهد. محور عمودی این شکل نشان دهنده نسبت طول پرش به ارتفاع شیب شکن (L_2/P) و محور افقی آن نشان دهنده نسبت عمق بحرانی به ارتفاع شیب شکن (Y_c/P) است. این شکل نشان می‌دهد که در آزمایش‌های با حضور مانع منقطع، مقدار L_2/P در مانع با $H_2/P=0.05$ نسبت به سایر موانع بیشتر است. پس از آن مانع با $H_2/P=0.08$ بیشترین مقدار L_2/P را به خود اختصاص داده است. مقدار L_2/P در $H_2/P=0.11$ کمترین مقدار را دارد. لازم به ذکر است که مقدار L_2/P در H_2/P برابر ۰/۰۵ و ۰/۰۸ به غیر از $Y_c/P=0.09$ یکسان است لذا داده‌های مربوط به آن‌ها برهم منطبق شده‌اند. شکل (۸) نشان می‌دهد که مقدار L_2/P در آزمایش‌های با حضور با مانع منقطع و ارتفاع‌های مختلف آستانه انتهایی نسبت به آزمایش‌های شاهد کاهش یافته است. کمترین مقدار کاهش L_2/P مربوط به آستانه با ارتفاع H_2/P=0.05 است که این میزان کاهش به‌طور متوسط برابر ۵۲ درصد می‌باشد. مقدار کاهش L_2/P برای مانع با ارتفاع H/P=0.08 به ازای Y_c/Pهای ۰/۰۷ الی ۰/۱۹ به‌طور متوسط برابر ۵۳ درصد است. مقدار کاهش L_2/P برای مانع با $H_2/P=0.11$ به ازای Y_c/P های ۰/۰۷ الی ۰/۱۹ به‌طور متوسط برابر ۵۷/۷ درصد است؛ بنابراین ضعیف‌ترین عملکرد از نظر کاهش طول پرش برای آستانه با ارتفاع $H_2/P=0.05$ و بهترین عملکرد در این زمینه برای آستانه با ارتفاع $H_2/P=0.11$ می‌باشد.

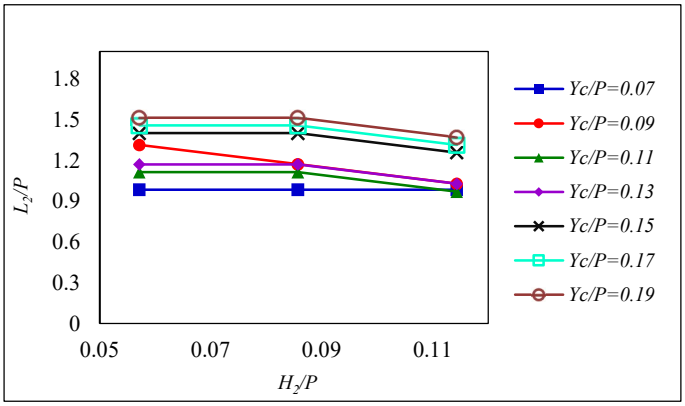


Fig. 7- Variation of L_2/P versus H_2/P for basin with dentate baffles and different flow conditions

شکل ۷- تغییرات L_2/P در مقابل H_2/P برای آزمایش‌های با موانع منقطع برای شرایط مختلف جریان

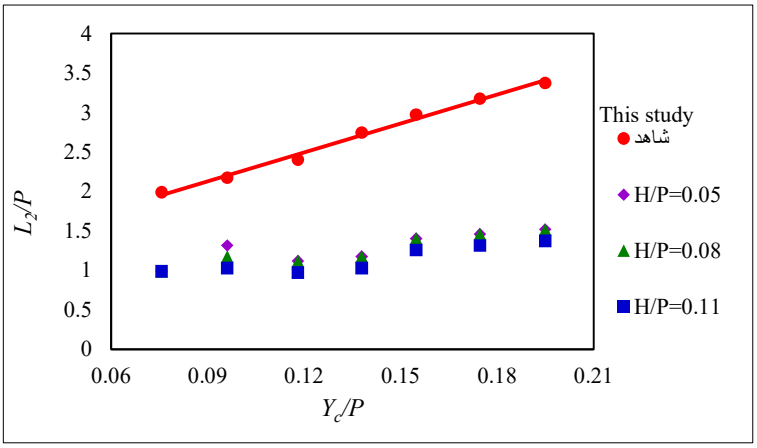


Fig. 8-Variation of L_2/P from basin without baffles and with dentate baffles and end sill with different height

شکل ۸- مقایسه L_2/P در حوضچه بدون مانع و با مانع منقطع و آستانه انتهایی با ارتفاع‌های مختلف

DOI: 10.22055/jise.2025.49328.2156

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، سازه‌های آبشکن عمودی از جمله سازه‌هایی هستند که برای کنترل فرسایش بستر در رودخانه‌هایی با شیب تند احداث می‌شوند. طی سالیان گذشته تعداد زیادی از این سازه‌ها احداث شده‌اند که بنا به دلایل متعددی از جمله فرسایش بستر رودخانه پایین‌دست و در نتیجه کاهش عمق پایاب و یا تغییر اقلیم منطقه و در نتیجه افزایش دبی‌های حدی باعث شده تا حوضچه در حال حاضر راندمان اولیه را نداشته باشد و بخشی از پرش به بیرون حوضچه منتقل می‌شود. در نتیجه ضرورت دارد تا اصلاحاتی برای این‌گونه سازه‌ها اعمال شود. در این مطالعه افزودن موانع منقطع در بستر حوضچه به‌عنوان راهکاری برای کاهش طول پرش مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج ارائه شده نشان داد که طول پرش در حداکثر دبی تا ۵۷ درصد نیز کاهش می یابد که دلیل اصلی آن را می‌توان این‌طور بیان کرد: برخورد جت به موانع منقطع باعث می شود تا اولا جت به بخش های جداگانه تقسیم می‌شود و بخشی از بین موانع عبور می‌کند و بخشی از روی موانع. این دو جت در پایین دست تلاقی می‌کنند. برخورد جت به مانع و پراکنده شدن آن نیز باعث تلاطم بیشتر توده جریان در بدنه پرش می‌شود که در نتیجه منجر به افزایش بیشتر استهلاک انرژی و در نتیجه کاهش طول پرش می گردد.

نتیجه‌گیری

این تحقیق باهدف بررسی نصب موانع منقطع و آستانه انتهایی با ارتفاع‌های مختلف بر طول پرش هیدرولیکی پایین دست شیب شکن قائم انجام گردید. برای رسیدن به اهداف تحقیق دو سری آزمایش با و بدون مانع تحت دبی‌های مختلف انجام شد و خلاصه نتایج به شرح زیر به دست آمد:

۱- داده‌های آزمایش‌های مقدماتی نشان داد که مناسبترین فاصله نصب موانع منقطع در فاصله $0.6Y_c$ از محل برخورد جت با کف حوضچه می‌باشد. Y_c برابر با عمق بحرانی در شرایط دبی طرح است. همچنین ارتفاع موانع کف در این مطالعه برابر $0.8Y_c$ می‌باشد.

۲- نتایج آزمایش‌های بدون مانع اختلاف ناچیزی با روابط روابط (۳) و (۴) دارند و روابط ارائه شده توسط Rand (1955) می‌توانند برای محاسبه طول L_1 و Y_2 مورد استفاده قرار گیرند.

۳- نتایج آزمایش‌های با موانع نشان داد که ارتفاع نسبی آستانه انتهایی (H_2/P) برابر ۰/۰۵ کمترین تأثیر (معادل ۵۲ درصد) و H_2/P برابر ۰/۱۱ بیشترین تأثیر (معادل ۵۷/۷ درصد) بر کاهش طول پرش هیدرولیکی دارد.

۴- به‌طور کلی طول پرش هیدرولیکی در آزمایش‌های با مانع منقطع نسبت به آزمایش‌های بدون مانع کاهش یافت که مقدارحداکثر آن حدود ۵۷ درصد محاسبه شد.

۵- مطالعه حاضر نشان داد که موانع منقطع تأثیر بسیاری بر کاهش طول پرش هیدرولیکی و در نتیجه طول حوضچه دارند، از این رو توصیه می‌شود تا قبل از کابرد این نتایج، آزمایش‌های بیشتری در فلوم‌های بزرگ‌تر و در محدوده اعداد فرود بیشتر انجام گردد.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

حمایت‌های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی نویسنده دوم به شماره پژوهانه SCU.WH1400.25487 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت شده و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان می‌باشد.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آزاده جمشیدی، انجام کارهای آزمایشگاهی و جمع آوری داده‌ها.

نویسنده دوم: محمود شفاعی بجستان، نگارش مقاله، تحلیل و بررسی نتایج، ایده طرح، پاسخ به داوران.

نویسنده سوم: محمد بهرامی یاراحمدی، تحلیل داده‌های آزمایشگاهی.

نویسنده چهارم: مصطفی رحمانشاهی، نظارت بر کار آزمایشگاه.

تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت مالی از محل پژوهانه نویسنده دوم انجام شده است. بدین وسیله از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی می‌شود .

References

1- Belanger, J.B., 1828. *Essai sur la solution numerique de quelques problemes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes; par m. J.-B. Belanger.*. Chez Carilian-Goeury, libraire, des corps royaux des ponts et chaussees et des mines.

2- Blaisdell, F.W., 1959. *The SAF stilling basin: A structure to dissipate the destructive energy in high-velocity flow from spillways* (No. 156). Agricultural Research Service.

3- Chamani, M. and Beirami, M.K., 2002. Flow characteristics at drops. *Journal of Hydraulic Engineering*, *128*(8), pp.788-791.. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:8(788.

4- Chiu, C.L., Fan, C.M. and Tsung, S.C., 2017. Numerical modeling for periodic oscillation of free overfall in a vertical drop pool. *Journal of Hydraulic Engineering*, *143*(1), p.04016077. DOI:10.1061/(ASCE)HY. 1943-7900.0001236.

5- Daneshfaraz, R., Hasanniya, V., Mirzaei, R. and Bazyar, A., 2020. Experimental investigation of the effect of positive slope of the horizontal screen on hydraulic characteristics of vertical drop. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(10), pp.2499-2509. DOI:10.22059/ijswr.2019.283685.668238. (In Persian)

6- Daneshfaraz, R., Majedi Asl, M. and Jafari, M., 2021. Experimental study of the effect of the location of the horizontal screen from the edge of the vertical drop on the pool depth and the amount of downstream energy loss. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, *22*(84), pp.55-68. DOI.org/10.22092/idser.2021.355547.1482. (In Persian)

7- Donnelly, C.A. and Blaisdell, F.W. 1954. Straight drop spillway stilling basin. Technical Paper No. 15, Series B, University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, 35p.

8- Doustkam, M., Rahmanshahi, M., Fathi-Moghadam, M., Keramat, A. and Duan, H.F., 2024. Experimental study on the hydraulic performance of porous broad-crested weirs with sloping crests. *Water Resources Management*, *38*(12), pp.4783-4802., DOI: 10.1007/s11269-024-03887-9.

9- Ghaderi, A., Dasineh, M. and Abbasi, S., 2019. Impact of vertically constricted entrance on hydraulic characteristics of vertical drop (numerical investigation). *Journal of Hydraulics*, *13*(4), pp.121-131. DOI.org/10.30482/jhyd.2019.82713. (In Persian)

10- Gill, M. A. 1979. Hydraulics of rectangular vertical drop structures. *Journal of Hydraulic Research*, 17(4): 289-302. DOI:10.1080/00221687909499573

11- Hasannia, V., Daneshfaraz, R. and Sadeghfam, S., 2020. Experimental investigating on hydraulic parameters of vertical drop equipped with combined screens. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *52*(10), pp.2487-2500. DOI: 10.22060/ceej.2019.16431.6223. (In Persian)

12- Hong, Y.M., Huang, H.S. and Wan, S., 2010. Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway. *Journal of Hydraulic Research*, *48*(1), pp.125-129. https://doi.org/10.1080/00221680903568683.

13- Izadjoo, F., & Shafai-Bejestan, M. 2007. Corrugated bed hydraulic jump stilling basin. *Journal of Applied Sciences*, 7(8): 1164-1169.

14- Liu, S.I., Chen, J.Y., Hong, Y.M., Huang, H.S. and Raikar, R.V., 2014. Impact characteristics of free over-fall in pool zone with upstream bed slope. *Journal of Marine Science and Technology*, *22*(4), p.9. http://dx.doi.org/10.6119/JMST-013-0604-1.

15- Mirzaee, R., Hosseini, K. and Mousavi, F., 2021. Numerical investigation on energy loss in vertical drop with horizontal serrated edge. *Journal of Hydraulics*, *16*(1), pp.23-36. DOI: 10.30482/jhyd.2021.256774.1486. (In Persian).

16- Moore, W.L., 1943. Energy loss at the base of a free overfall. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *108*(1), pp.1343-1360.

17- Pasbani Khiavi, M. and Hasanniya Giglou, V., 2022. Numerical Study of the Effect of Height of Vertical Screens on Vertical Drop Energy Dissipation. *Irrigation and Water Engineering*, *13*(2), pp.65-84.DOI: 10.22125/iwe.2022.162566. (In Persian)

18- Rahmanshahi, M., Jafari-Asl, J., Shafai Bejestan, M. and Mirjalili, S., 2023. A hybrid model for predicting the energy dissipation on the block ramp hydraulic structures. *Water Resources Management*, *37*(8), pp.3187-3209. DOI:10.1007/s11269-023-03497-x.

19- Rand, W., 1955, September. Flow geometry at straight drop spillways. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (Vol. 81, No. 9, pp. 1-13). ASCE.

20- Shafai Bejestan, M., Neisi, K. 2009. A new roughened bed hydraulic jump stilling basin. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2(5): 436-445. DOI: 10.3923/ajaps.2009.436.445.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 15-32

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

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Investigating the effect of changing the cropping pattern on Water Resources in Molla Sadra Dam Basin using the System Dynamics method

A. Laghbdost arani[1], H. Zarei[2], F. Radmanesh[3*], A. Solgi[4] and M. Zarghami[5]

1-Ph.D. Student, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
2- Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.
3- corresponding author, Associate Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (Feridon_radmanesh@yahoo.com.)*
4-Postdoctoral Researcher, Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
5-Professor, Department of Civil Engineering (Water), Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 14 March 2023
Revised: 29 February 2024
Accepted: 7 April 2024
Available online: 05 August 2026

Keywords: System dynamics, VENSIM model, Changing the cropping pattern, Molla Sadra Dam.

TO CITE THIS ARTICLE:

Laghbdost arani, A., Zarei, H., Radmanesh, F., Solgi, A., Zarghami, M. 2026. 'Investigating the effect of changing the cropping pattern on Water Resources in Molla Sadra Dam Basin using the System Dynamics method', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 15-32. doi: 10.22055/jise.2024.43286.2062.

Abstract

System dynamics is a management approach that has been used in recent years for simulating water resources systems. In this study, an attempt was made to simulate the water resources status of the Molla Sadra Dam basin (located in the north of Fars Province, southern Iran) using the system dynamics approach. For this purpose, the economic subsystem, groundwater level fluctuations, groundwater volume changes, surface water, and the overall system were examined using VENSIM software. The performance of the upstream and downstream aquifers of the Molla Sadra Dam and the Molla Sadra Dam reservoir was simulated for the years 2009 to 2020. Accordingly, twelve different scenarios (management options) were proposed. The results of evaluating the different management options showed that if rice cultivation is eliminated and replaced with sesame cultivation, the income of farmers in the downstream area of the Molla Sadra Dam would increase by 54% (Management Option 11). Under this management option, the average annual income of farmers downstream of the dam would be 114 million Tomans. With this management option, it is possible to cultivate the same cultivated areas currently under cultivation in the downstream regions of the dam while consuming less water.

Introduction

In recent years, the system dynamics method has been used to simulate complex water resources systems. In this method, attention is paid to the dynamic relationships between the quantitative and qualitative features of water and even socio-economic issues, and the desired system can be easily simulated without the need for complex mathematics. The system dynamics method is an object-oriented and feedback-based simulation method that, in addition to describing complex systems based on reality, can provide the possibility of effective user involvement in model development and gaining his confidence during the modeling process. System dynamics models have the ability to accurately recognize the events that happen in the outside world and simulate them, and then identify and present effective policies, as well as examine and observe the effects of these policies in the model. to eliminate the lack of effect of the policies that have been implemented in the country so far. Therefore, it is useful to use a systemic approach in the field of understanding the reasons for the ineffectiveness of the policies applied to the control groundwater level. The main goal of this study

is the integrated modeling of water resources in the upstream basin of Mulla Sadra Dam. In this regard, the effects of different scenarios on the status of water resources in the catchment area were investigated. Choosing the best scenario in order to reduce the excessive drop of the groundwater level in the short term and in the direction of the balance and stability of the water resources of the region was another objective of the study.

Methodology

Area of study

Tashk-Bakhtegan and Maharlu watersheds with an area of 31451.8 square kilometers are located in Fars province. The catchment area of Mulla Sadra Dam, a part of Tashk-Bakhtegan and Maharlu basins, is located in the north of Fars province with an area of 2254 square kilometers. The catchment area of Molla Sadra Dam is located in two subbasin, Aspas and Khosro-Shirin. In the studied area, there are two aquifers, Khosroshirin and Aspas. In terms of altitude, the highest point of the basin is 3495 meters high and the lowest point of the basin is 2061 meters above sea level.

Data preparation

The data of this study, including precipitation data, temperature and observation well data, were obtained from Fars Province Regional Water Company. The data of the cultivated area, the dominant crop of the region, were obtained from the Agricultural Jihad Organization of Fars Province. The GIS software and kriging method were used to draw the maps. Monthly rainfall and isotemperature maps were drawn for the study area.

Modeling

In this section, economic subsystems, groundwater level changes, groundwater storage changes, surface water, and the whole system (which includes all the components related to Mulla Sadra Dam) are presented. These subsystems are connected in VENSIM software as a cause-and-effect relationship.

Results and Discussion

The simulation of the performance of upstream and downstream aquifers of Molla Sadra Dam and the reservoir of Molla Sadra Dam during the years 2008 to 2019 was investigated. The model was then evaluated for a ten-year horizon. For this purpose, twelve different scenarios were presented. Economically, different scenarios based on the income of all farmers are presented in Table (1). Based on this table, scenario 11 is the best scenario because it is expected to have more income for all the farmers downstream of Mulla Sadra Dam.

Table 1- Income of farmers of each region (in billion Tomans per year) in different scenarios

	Different scenarios											
Area	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aspas	245	245	129	21	129	245	245	245	245	245	245	129
	5.0	5.0	0.7	6.2	0.7	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	0.7
Khosro-shirin	263	263	132	26.	132	263	263	263	263	263	263	132
	.9	.9	.6	4	.6	.9	.9	.9	.9	.9	.9	.6
Downstream	594	298	578	48	289	381	679	659	594	627	916	890
Molla Sadra dam	.9	.7	.0	6.1	.3	.8	.3	.1	.9	.0	.4	.5

Conclusions

Among the scenarios of changing the cultivation pattern, scenario number 7 has more income, but because planting apple trees consumes more water, scenario number 8, which is changing the pattern of rice cultivation with sesame, is known as the best scenario related to changing the pattern of cultivation. The results of the investigation of different scenarios showed that if rice is not cultivated completely, and is replaced with sesame, the income of the farmers in the downstream area of Molla Sadra dam can be increased by 54% (scenario 11). In this scenario, the income of farmers downstream of Mulla Sadra dam will be 114 million per year on average. The results showed that changing the cropping pattern with apple, sesame, rapeseed, and sunflower crops respectively have more income. So that among them, sunflower has the lowest income for farmers. Therefore, according to these scenarios, it is recommended to change the cultivation pattern of sesame instead of rice.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number SCU.WH1401.589

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Author Contributions

First author: Abolfazl Loghdoost, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing.
Second author: Heidar Zarei, Conceptualization, Methodology, Writing – original draft, Writing – review & editing.
Third author: Fereydoun Radmanesh, Writing – review & editing.
Fourth author: Abazar Solgi, Software, Writing, and preparation of the initial draft.
Fifth author: Mehdi Zarghami, Methodology, Writing, and preparation of the initial draft.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Research Council of the Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support. Also great thanks to the Fars Regional Water Authority for sharing the required data.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۳۲-۱۵

بررسی اثر تغییر الگوی کشت بر منابع آب حوضه آبریز سد ملاصدرا با استفاده از روش پویایی سیستم

ابوالفضل لقب‌دوست‌آرانی[۱]، حیدر زارعی[۲]، فریدون رادمنش[۳*]، اباذر سلگی[۴] و مهدی ضرغامی[۵]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳*- نویسنده مسئول، استاد گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، feridon_radmanesh@yahoo.com

۴- پژوهشگر پسا دکتری، گروه مهندسی علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۵- استاد گروه مهندسی عمران آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

یکی از نگرش‌های مدیریتی، که در سال‌های اخیر برای شبیه‌سازی سامانه‌های منابع آب، استفاده شده، پویایی سیستم است. در این تحقیق تلاش شده است با استفاده از پویایی سیستم، اقدام به شبیه‌سازی وضعیت منابع آبی حوضه سد ملاصدرا (در شمال استان فارس و جنوب کشور ایران) گردد. برای این منظور زیرسیستم‌های اقتصادی، تغییرات سطح آب زیرزمینی، تغییرات حجم آب زیرزمینی، آب سطحی و کل سامانه در محیط نرم افزار VENSIM مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی عملکرد آبخوان‌های بالادست و پایین دست سد ملاصدرا و مخزن سد ملاصدرا طی سال‌های ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۹ بررسی شد. برای این منظور دوازده سناریو (گزینه مدیریتی) مختلف ارائه شد. نتایج بررسی گزینه‌های مدیریتی مختلف نشان داد در صورت عدم کشت برنج به طور کامل، و جایگزینی آن با محصول کنجد، درآمد کشاورزان منطقه پایین دست سد ملاصدرا به میزان ٥٤ درصد افزایش می‌یابد (گزینه مدیریتی ۱۱). در این گزینه مدیریتی درآمد کشاورزان در پایین دست سد ملاصدرا به‌طور متوسط ١١٤ میلیون در سال خواهد بود. با این گزینه مدیریتی می‌توان، ضمن مصرف آب کمتر، همان سطوح زیرکشتی که در شرایط فعلی در مناطق پایین سد ملاصدرا کشت می‌شود، را کشت نمود.

کلیدواژه‌ها: پویایی سیستم، مدل VENSIM، تغییر الگوی کشت، سد ملاصدرا.

مقدمه

ایران از جمله کشورهایی است که با میزان متوسط بارندگی ۲۵۰ میلی‌متر در سال، در مقابل ۷۵۰ میلی‌متر میانگین جهانی سالانه باران، نزولات جوی آن از یک سوم متوسط نزولات جهان کمتر بوده و جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌رود (Alizadeh, 2004). همچنین توزیع زمانی و مکانی بارندگی در کشور بسیار نامناسب است و به‌دلیل شرایط خاص جوی، در بیشتر سال‌های گذشته با خشکسالی مواجه بوده است. به گونه‌ای که بیشتر استان‌های کشور در معرض بی‌آبی شدید قرار دارند که این امر لزوم توجه بیشتر به موضوع مدیریت آب و استفاده بهتر از ذخایر آبی را می‌طلبد. در ایران مصرف غیرمعقولانه و بی‌رویه‌ی منابع آبی باعث شده است که این منبع ارزشمند به سرعت به سمت نابودی حرکت کند. بخش خانگی شش درصد از آب موجود در کل کشور را استفاده می‌کند. بخش صنعت نیز مصرف بسیار ناچیز و معادل دو درصد از منابع آبی کشور را داشته و در این میان بخش کشاورزی مسئول مصرف عمده‌ی آب کشور است. این بخش به تنهایی ۹۲ درصد از منابع آب شیرین ایران را مصرف می‌کند. ادامه‌ی روند کنونی در بخش کشاورزی، باعث تشدید هر چه بیشتر بحران آب می‌شود (Madani, 2014). به‌عنوان نمونه حوضه بختگان، با معضلاتی مانند کاهش شدید سطح آب زیرزمینی، تشدید روند نزولی سطح آبخوان، نشست زمین و خشک شدن رودخانه کر مواجه است که نشان از اهمیت توجه به مدیریت منابع آب منطقه مذکور را دارد. همچنین بر اساس تحقیقات صورت گرفته در حوضه آبریز بختگان، اثبات شده که در غالب دشت‌های حوضه آبریز بختگان سهم بخش کشاورزی بسیار بیش از سایر بخش‌ها می‌باشد (Hedayat, 2016). همچنین با توجه به اقلیم خشک منطقه و نبود جریان‌های سطحی در بخش‌های زیادی از حوضه آبریز، استفاده از منابع آب زیرزمینی به‌خصوص منابع آب زیرزمینی آبرفتی با حفر چاه و قنات‌ها در این منطقه آغاز گردیده است. در دهه‌های اخیر با توجه به افزایش نیاز آب برای مصارف مختلف، علاوه بر منابع آبرفتی استفاده از آب منابع سازند سخت نیز رایج گردیده است، به‌گونه‌ای که آب آشامیدنی اغلب شهرهای این حوضه از مخازن سازند سخت تأمین

می‌گردد (Hedayat, 2016).

در سالیان اخیر از روش پویایی سیستم برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب استفاده شده است. در این روش به روابط دینامیکی بین خصوصیات کمی و کیفی آب و حتی مسائل اجتماعی اقتصادی توجه می‌شود و سیستم مورد نظر بدون نیاز به ریاضیات پیچیده به سهولت قابل شبیه‌سازی است. روش پویایی سیستم، روش شبیه‌سازی شیءگرا و بر پایه بازخورد بوده که می‌تواند علاوه بر تشریح سیستم‌های پیچیده براساس واقعیت، امکان دخالت مؤثر کاربر در توسعه مدل و جلب اطمینان وی در طول فرایند مدل‌سازی را فراهم نماید. مدل‌های پویایی سیستم این قابلیت را دارند که با شناخت دقیق وقایعی که در جهان بیرون اتفاق می‌افتند و شبیه‌سازی آن‌ها و سپس شناخت و ارائه سیاست‌های مؤثر و همچنین بررسی و مشاهده تأثیر این سیاست‌ها در مدل، کاستی ناشی از عدم تأثیر سیاست‌هایی که تاکنون در کشور اجرا شده‌اند را برطرف نماید. ازین رو استفاده از رویکرد سیستمی در زمینه شناخت دلایل اثرگذار نبودن سیاست‌های اعمال شده برای کنترل سطح آب‌های زیرزمینی مفید می‌باشد.

در سال‌های اخیر مطالعه‌های زیادی در زمینه پویایی سیستم از جمله در زمینه مدیریت یکپارچه منابع آب Zarghami و Akbariyeh، (2012))، مدیریت عرضه و تقاضای منابع آب Goldani et al (2012)؛ Adeniran و Bamiro (2010) و تخصیص منابع آب Luo et al (2009) انجام شده است.

Simonovic و Rajasekaram (2004)، مدل "water canada"، که یک مدل مدیریت یکپارچه‌ی آب در کشور کانادا است را توسعه دادند. آن‌ها ۱۲ گزینه مدیریتی ارائه و تأثیر این گزینه‌های مدیریتی را بر میزان در دسترس بودن آب شیرین، رشد اقتصادی، رشد جمعیت، تولید انرژی و تولید غذا بررسی کردند. نتایج، وابستگی بسیار شدید پیشرفت آینده‌ی کانادا را به کیفیت قابل قبول منابع آب و کنترل مقدار آب مصرفی در بخش‌های مختلف، نشان داد.

Ahmad و Simonovic (2004) روش مکانی پویایی سیستم‌ها را که به اختصار SSD نامیده شده است را برای مدیریت منابع آب معرفی کردند. این روش با کوپل کردن روش پویایی سیستم‌ها و سیستم اطلاعات جغرافیای (GIS) توسعه داده شده است. این مدل در پروسه‌هایی که برهم کنش زمانی مکانی در آن‌ها اهمیت دارد نظیر پروسه‌های منابع طبیعی، زیست محیطی، مدیریت منابع طبیعی، تغییر اقلیم و مدیریت سوانح طبیعی می‌تواند استفاده شود. محققین ارائه کننده این روش، قابلیت مدل را در مدیریت سیلاب حوضه رودخانه سرخ مانیتوبا کانادا نشان داده‌اند.

Winz et al., (2009) با استفاده از شبیه‌سازی پویایی سیستم به بررسی مدیریت تجمیعی منابع آب پرداختند. در این مدل سیستم آب‌های سطحی برای دوره‌ای ۴۰ ساله توسط مدل روابط علت و معلولی و انباره و جریان شبیه‌سازی شد. این مدل برای نشان دادن ارزش و اهمیت به‌کار بردن پویایی سیستم برای مدل‌سازی سیستم‌هایی با پیچیدگی بالا ارائه شد و نتایج نشان داد که استفاده از این مدل برای شبیه‌سازی و شناخت این گونه سیستم‌ها و همچنین استفاده از این رویکرد جهت سیاست گذاری بسیار کارا می باشد.

Giordano et al., (2012) سیستم مدل‌سازی پویا را برای تجزیه و تحلیل تعارضات موجود در مدیریت آب های زیرزمینی به‌کار گرفتند. نتایج نشان داد هر چند طراحی و پیاده‌سازی سیاست‌های حفاظت از آب‌های زیرزمینی بسیار با اهمیت هستند، اما در بسیاری از موارد تلاش برای حل مشکل مدیریت آب به علت عوارض پیش بینی نشده، آن را بدتر می‌کند.

Koti et al., (2016) در تحقیقی مدل شبیه سازی پویایی سیستم برای مدیریت منابع آب پایدار و توسعه کشاورزی در حوضه رودخانه ولتا در کشور غنا را انجام دادند. نتایج نشان داد که خروجی‌های شبیه‌سازی شده با واقعیت مشاهده شده سیستم هم‌خوانی دارد.

Aram (2014) با استفاده از رویکرد پویایی شناسی سیستم، مدلی شبیه به واقعیت از سیستم آب زیرزمینی آبخوان دشت فیروزآباد در استان فارس، ارائه کرد. با استفاده از این مدل می‌توان سیاست‌های مختلف در افق ۴۰ ساله را پیش‌بینی نمود. پس از آن، مدل اعتبارسنجی شد و نتایج، نشان دهنده‌ی کارایی قابل قبول مدل در پیش‌بینی رفتار سیستم مورد مطالعه بود.

Hedayat (2016) به‌منظور دست‌یابی به یک دیدگاه کلان نسبت به حوضه آبریز بختگان-مهارلو و مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی آن، وضعیت منابع آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که از بین دشت‌های مورد بررسی، همه دشت‌ها بجز دشت خرامه و شیراز (۹۰ درصد از دشت‌ها)، دارای افت سالیانه بیش از ۲۵ سانتی‌متر می‌باشند. با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که صرفاً استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین به جای سیستم-های سنتی در تمام یا بخشی از سطح زیرکشت محصول غالب، به تنهایی برای کاهش افت موجود کافی نیست و باید طرح تغییر الگوی کشت غالب به محصولات با نیاز آبی پایین مد نظر قرار گیرد.

Sahin et al., (2016) یک مدل مدیریت منابع آب را تحت گزینه‌های مدیریتی تغییر اقلیم و رشد جمعیت با استفاده از رویکرد پویایی سیستم مدل کردند. آن‌ها دوره‌ی شبیه‌سازی را ۱۰۰ سال در نظر گرفتند تا نتایج سیاست‌هایی از قبیل افزایش قیمت آب در مدل شبیه‌سازی به خوبی نمایان شود.

Zhilia et al., (2018) با روش پویایی سیستم، برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی منابع آب شهر زنگورو چین یک مدل را با استفاده از نرم‌افزار استلا توسعه دادند. این مدل که شامل چهار زیر سیستم جمعیت، اقتصادی، تأمین آب و تقاضای آب بود با استفاده از داده‌های سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ صحت‌سنجی شد. نتایج استفاده از مدل رضایت بخش بود.

Soleimani Sardoo et al., (2021) مدیریت یکپارچه

 DOI: 10.22055/jise.2024.43286.2062

منابع آب جنوب استان کرمان را با استفاده از مدل پویایی سیستم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که چارچوب علت و معلولی DOSIR و رویکرد مبتنی بر پویایی سیستم در ارزیابی و شبیه‌سازی سیاست‌های مختلف منطقه مورد مطالعه کارآمد است. علاوه بر این در سناریو ادامه وضع موجود، نسبت کفایت آب برای کشاورزی ۰/۵۵ در سال ۱۳۸۵ به ۰/۲ در سال ۱۴۱۰ کاهش ولی در سناریو افزایش منابع تامین آب این نسبت به ۰/۹ تا سال ۱۴۱۰ افزایش می‌یابد.

Shahrokhi Sardo و Jalal Kamali (2021) مدل پویایی سیستم مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و عملکرد تغذیه مصنوعی دشت نسا در بم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل پویایی سیستم نشان داد ادامهٔ روند برداشت کنونی از منابع زیرزمینی دشت، در سال‌های آینده، افت تراز سطح آب معادل ۸/۳ متر نسبت به وضع موجود. همچنین، نتایج نشان داد پخش حدود ۶۰ درصد آب مازاد سد نسا براساس برنامهٔ بهره‌برداری از مخزن، در بیست سال به کاهش روند افت تراز آب زیرزمینی منطقه منجر می‌شود و کسری بودجه زیرزمینی را از ۶۵/۴۸ میلیون مترمکعب به حدود ۳۵/۱۷ میلیون مترمکعب می‌رساند.

Phan et al., (2021) کاربردهای مدل‌سازی دینامیک سیستم را برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه به طور سیستماتیک کاربردهای دینامیک سیستم در مدیریت منابع آب را با توجه به عوامل مکانی، اهداف تحقیق، مدل‌سازی زیرسیستم‌ها و روش‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بررسی کردند. نتایج نشان داد که اکثر مطالعات بررسی شده از رویکردهای مبتنی بر سناریو (۸۲ درصد) برای ارزیابی اثربخشی اقدامات مدیریتی استفاده کردند، در حالی که اقلیتی از مطالعه‌ها (۱/۸درصد) بهینه‌سازی مدیریت آب را در نظر گرفتند. در نهایت، یک چارچوب مدل‌سازی دینامیک سیستم یکپارچه پیشنهاد شد که فرصت‌هایی را برای ادغام دینامیک سیستم با سایر ابزارهای مدل‌سازی بر اساس نقاط قوت و محدودیت‌های مدل‌سازی دینامیک سیستم بررسی می‌کند.

Guemouria et al., (2023) رویکرد دینامیک سیستمی را برای مدیریت منابع آب حوضه سوس-ماسا (Souss-Massa) ارائه دادند. شاخص عملکرد انتخاب شده بر اساس دستیابی به یک شاخص پایداری پایه (SI ،baseline sustainability index) می‌باشد که به‌عنوان نسبت آب موجود به آب تأمین شده است. برای جلوگیری از وضعیت تنش آبی این شاخص باید بالاتر از ۲۰ درصد باشد. داده‌های منابع مختلف برای دوره زمانی بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۰ اخذ شد. نتایج نشان داد که سیاست‌های فعلی منجر به مدیریت پایدار آب نمی‌شود. برداشت از آب‌های زیرزمینی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است و از ۷۴۷ میلی‌متر مکعب در سال ۲۰۰۷ به ۴۸۸۴ میلی‌متر مکعب در سال ۲۰۲۰ رسیده است. تعادل بین عرضه و تقاضا تنها برای سه سال، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ به‌دست آمده است، بدون اینکه هرگز به شاخص پایداری پایه ۲۰ درصد برسد.

با بررسی مطالعه‌های پیشین می‌توان موارد زیر را بیان نمود : ۱- در زمینه مدل‌سازی منابع آب با روش جامع‌نگری سیستم‌های پویا وجود دارد . ۲-در اکثر تحقیقات انجام یافته صرفاً یک منبع آبی را لحاظ شده و شبیه‌سازی صورت گرفته است. ۳-تحقیقات صورت گرفته محدود به یک دشت کوچک بوده و اثرات پارامترها و گزینه های مدیریتی در کل حوضه دیده نشده است. ازین رو پژوهش صورت گرفته در اینجا می تواند بسیار مؤثر واقع شود و نیز مجالی مناسب و کارا برای تحقیق و پژوهش باشد. هدف اصلی این مطالعه مدل‌سازی یکپارچه منابع آب حوضه بالادست سد ملاصدرا می‌باشد. در این راستا بررسی اثرات گزینه‌های مدیریتی مختلف بر وضعیت منابع آب حوضه آبریز بررسی شد. انتخاب بهترین گزینه مدیریتی در راستای کاهش افت بی رویه سطح آب زیرزمینی در کوتاه مدت و برای تعادل و پایداری منابع آب منطقه نیز یکی دیگر از اهداف مطالعه بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز طشک-بختگان و مهارلو با مساحت ۳۱۴۵۱/۸ کیلومتر مربع در استان فارس واقع شده است. حوضه آبریز سد ملاصدرا، جزئی از حوضه طشک-بختگان و مهارلو، به وسعت ۲۲۵۴ کیلومترمربع در شمال استان فارس واقع گردیده است. حوضه آبریز سد ملاصدرا در دو محدوده مطالعاتی آسپاس و خسرو-شیرین واقع شده است. در منطقه مورد مطالعه دو آبخوان خسروشیرین و آسپاس وجود دارد. از لحاظ ارتفاعی بلندترین نقطه حوضه به ارتفاع ۳۴۹۵ متر و پست‌ترین نقطه حوضه دارای ارتفاع ۲۰۶۱ متر از سطح دریا می باشد. متوسط بارندگی منطقه ۴۶۰ میلی‌متر و متوسط دمای آن ۱۳/۰۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رودخانه کر یکی از رودخانه‌های مهم حوضه آبریز بختگان می‌باشد. روی این رودخانه، سد ملاصدرا در محلی به نام تنگ براق احداث گردیده است. این رودخانه دارای آب دائم بوده و رژیم آن برفی-بارانی است و بخش عمده‌ای از آب آن به مصرف کشاورزی رسیده و به همین علت در فصل تابستان و در پایاب گاهی فاقد آب می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات محدوده‌های مطالعاتی ارائه شده است. در شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در حوضه آبریز طشک-بختگان و مهارلو، استان فارس و کشور ایران نشان داده شده است. به‌دلیل بررسی وضعیت آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه، مجبور به بررسی وضعیت آب در پایین دست سد ملاصدرا نیز بوده تا بتوان میزان رهاسازی از آب سد را نیز مورد بررسی قرار داد، لذا وضعیت آب سطحی و زیرزمینی در پایین دست سد ملاصدرا و آبخوان دزکرد-کامفیروز نیز مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱-محدوده‌های مطالعاتی و آبخوان‌های موجود در منطقه مورد مطالعه

Table 1- Sub-basins and aquifers in the study area

Sub-basins	Sub-basin code	Aquifer	Area of sub-basin (square kilometers)	Area of aquifer (square kilometer)
Aspas	4321	Aspas	1628.72	747.31
Khosro-shirin	4320	Khosro-shirin	618.68	189.38
Dezkord-Kamfirooz	4319	Dezkord-Kamfirooz	2092.91	187.36

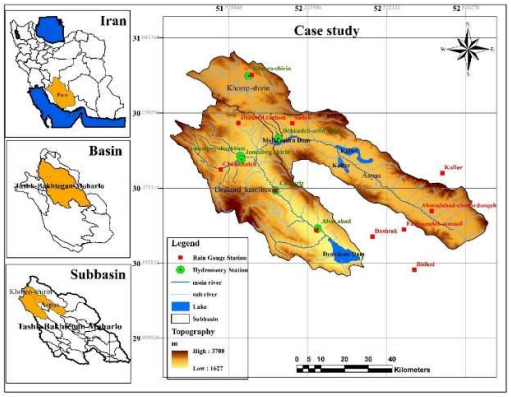


Fig. 1- The location of the studied area and the stations used in Fars province and Iran

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های استفاده شده در استان فارس و کشور ایران

آماده سازی داده‌ها

داده‌های این مطالعه، شامل داده‌های بارش، دمای ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای، از شرکت آب منطقه‌ای استان فارس اخذ شد. داده‌های سطح زیرکشت، کشت غالب منطقه از سازمان جهاد کشاورزی استان فارس اخذ گردید. بررسی و تطویل داده‌های بارش با نرم افزار HEC-4 صورت گرفت. سپس به‌منظور بررسی داده‌های پرت، از روش نمودار جعبه‌ای (Box Plot) در نرم‌افزار Excel استفاده شد. در صورت مواجهه با داده‌های پرت، آن داده‌ها حذف و دوباره با نرم افزار HEC-4 بازسازی صورت گرفت. برای ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزار GIS و روش کریجینگ استفاده شد. نقشه‌های هم‌بارش ماهانه برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شد. سپس مقادیر بارش ماهانه برای محدوده‌های مطالعاتی و حوضه بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری استخراج گردید. برای بررسی داده‌های دما و تطویل آن‌ها از روش تفاضلات استفاده شد. بعد از بررسی داده‌های پرت، نقشه‌های هم‌دمای ماهانه برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شد. سپس مقادیر دمای ماهانه برای محدوده‌های مطالعاتی و حوضه بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری استخراج گردید.

محاسبه نیاز کشاورزی

اطلاعات دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی به‌صورت شهرستانی بود، ولی در این مطالعه نیاز به اطلاعات سطح زیرکشت به‌صورت محدوده مطالعاتی و آبخوانی بود ، لذا برای این منظور، ابتدا در نرم‌افزار گوگل ارث، سطوح زیرکشت برای هر محدوده مطالعاتی ترسیم و محاسبه شد، سپس با توجه به مساحت هر شهرستان در محدوده، سطوح زیرکشت و کل سطح زیرکشت شهرستان، محصولات کشت شده در هر سال، نوع کشت و نیاز آبی آنها محاسبه شد. در شکل (۲) سطوح زیرکشت در منطقه مورد مطالعه که در نرم‌افزار گوگل ارث ترسیم شده است نمایش داده شده است. برای بررسی وضعیت سطح زیرکشت از اطلاعات افراد بومی نیز استفاده شد.

مدل‌سازی

در این بخش به‌ترتیب زیرسیستم‌های اقتصادی، تغییرات سطح آب زیرزمینی، تغییرات حجم آب زیرزمینی، آب سطحی و کل سیستم (که شامل همه مولفه‌های مربوط به سد ملاصدرا می‌باشد) ارائه شده است. این زیرسیستم‌ها در نرم‌افزار ونسیم به‌صورت رابطه علل و معلولی به هم مرتبط شده‌اند.

زیرسیستم اقتصادی

زیرسیستم اقتصادی بیان‌گر سود کشاورزان از فروش محصولات خود است. در جدول (۲) محصولات اصلی، فرعی و جایگزین در مناطق مختلف ارائه شده است. در محدوده مطالعاتی آسپاس محصول گندم و جو به عنوان محصولات اصلی هستند و انواع لوبیا به‌عنوان محصولات فرعی کشت می‌شوند. برای محاسبه درآمد کشاورزان در این منطقه، محصول گندم به‌عنوان کشت اصلی

DOI: 10.22055/jise.2024.43286.2062

و انواع لوبیا به‌عنوان کشت فرعی لحاظ می‌شود. در محدوده مطالعاتی خسروشیرین، محصولات گندم، جو و سیب درختی به‌عنوان محصولات اصلی و انواع لوبیا به‌عنوان محصول فرعی کشت می شود. با توجه به اینکه سطح زیرکشت محصول سیب درختی در مقابل گندم و جو در این محدوده بسیار ناچیز است (حدود ۱۰۰ هکتار باغ سیب وجود دارد) در محاسبات درآمد کشاورزان این منطقه محصول سیب به‌عنوان محصول اصلی لحاظ نمی‌شود. در پایین دست سد ملاصدرا، محصول اصلی برنج، و محصول فرعی گندم می‌باشد. همچنین در جدول (۳) هزینه‌های هر هکتار زمین در طول یکسال ارائه شده است. در این جدول، هزینه‌های مربوط به اجاره زمین درنظر گرفته نشده است یعنی فرض شده است که کشاورز مالک زمین می‌باشد. در جدول (۴) نیاز آبی، زمان کاشت و برداشت محصولات کشت شده در منطقه ارائه شده است. در بالادست سد ملاصدرا، آبخوان‌های آسپاس و خسرو–شیرین وجود دارند که بیشتر از آب‌های زیرزمینی و چشمه‌ها استفاده می‌کنند، زیرسیستم اقتصادی برای آبخوان آسپاس به‌عنوان نمونه در شکل (۳) ارائه شده است.

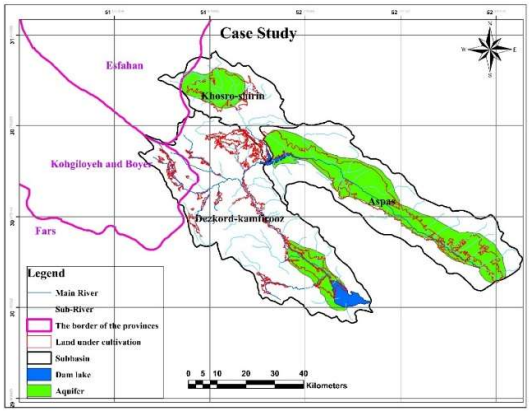


Fig. 2- Land under cultivation in the study area
شکل ۲–سطوح زیرکشت در منطقه مورد مطالعه

جدول ۲- قیمت و تولید محصولات مختلف
Table 2- Prices and production of different products

Area	Products	Crop production (tons per hectare)			Price production (million Tomans per hectare)		
		Main	By-product	Alternative	Main	By-product	Alternative
Aspas	Wheat	5.0	--------	--------	11.5	--------	--------
	Types of beans	--------	3.0	--------	----------	40.0	--------
Khosro-shirin	Wheat and Barley	4.0	--------	--------	11.05	--------	--------
	Apple	20.0	--------	--------	10.0	--------	--------
	Types of Beans	--------	3.0	--------	----------	40.0	--------
Downstream of Molla Sadra Dam	Rice	3.0	--------	--------	60.0	--------	--------
	Wheat	--------	5.0	--------	----------	11.05	--------
	Apple	--------	--------	20.0	----------	--------	10.0
	Sesame	--------	--------	1.0	----------	--------	130.0
	Sunflower	--------	--------	1.5	----------	--------	60.0
	Canola	--------	--------	5.0	----------	--------	22.0

جدول ۳-هزینه‌های مختلف برای یک هکتار زمین در طول یکسال

Table 3-Various costs for one hectare of land during one year

Costs	Different situations	Price (million Tomans per hectare per year)
The cost of seeds, fertilizers, and fertilizers	Wheat	3.0+2.0+1.0
	Rice	10.0+3.0+2.0
The cost of land preparation (land bed and plowing)	Wheat	5.0+5.0
	Rice	5.0+5.0
The cost of harvesting machinery	Wheat	1.5
	Rice	7.0
Labor cost	Wheat	5.0
	Rice	15.0
Cost per MCM unit of water	Groundwater	0.5
	From the Dam	1.0
Additional costs	Wheat	2.0
	Rice	2.0
Total costs	Wheat	25.0
	Rice	50.0

جدول ٤- نیاز آبی، زمان کاشت و برداشت محصولات کشت شده در منطقه

Table 4- Water requirement, time of planting and harvesting crops grown in the region

Product	Water requirements (m^3/year)	Planting time	Harvest time	Duration (months)
Rice	25000	July	October	4
Wheat	7000	November	June	8
Barley	6500	November	June	8
Apple	11500	April	November	8
Sunflower	6200	June	October	5
Sesame	3900	July	November	5
Beans	5400	June	October	5
Canola	4500	March	October	8

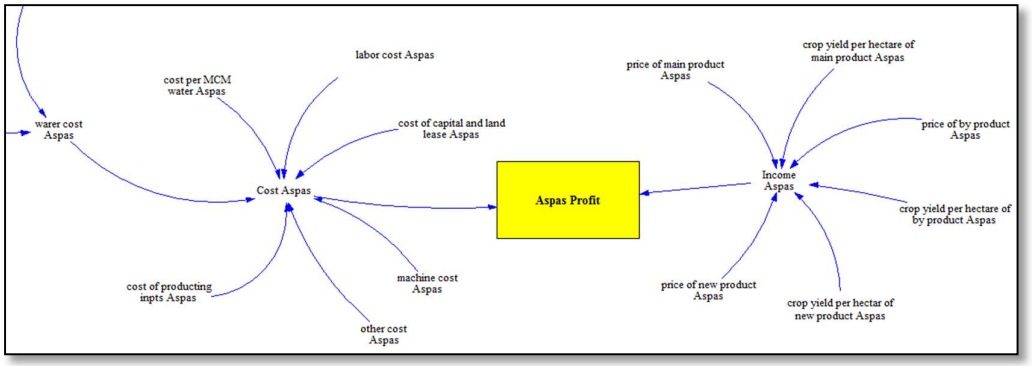


Fig. 3- Economisc ub-system for Aspas aquifer

شکل ۳- زیرسیستم اقتصادی برای آبخوان آسپاس

 DOI: 10.22055/jise.2024.43286.2062

زیرسیستم تغییرات سطح آب زیرزمینی

در شکل (۴) زیرسیستم تغییرات سطح آب زیرزمینی به‌عنوان نمونه برای آبخوان خسرو-شیرین که در بالادست سد ملاصدرا قرار دارد، ارائه شده است. زیرسیستم تغییرات سطح آب زیرزمینی برای آبخوان‌های آسپاس و خسرو-شیرین در بالادست سد ملاصدرا و زیرسیستم تغییرات سطح آب زیرزمینی دزکرد-کامفیروز که در پایین دست سد ملاصدرا واقع شده است در نظر گرفته شده است.

زیرسیستم تغییرات حجم آب زیرزمینی

زیرسیستم تغییرات حجم آب زیرزمینی آبخوان‌های بالادست سد ملاصدرا یعنی دو آبخوان آسپاس و خسروشیرین در نظر گرفته شده است. برای این زیرسیستم مؤلفه‌های مختلف بیلان آب زیرزمینی شامل، مولفه‌های نفوذی، نفوذ از بارش، نفوذ از آب سطحی، نفوذ از شرب و صنعت، نفوذ از آب کشاورزی و نفوذ از آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است. برای مؤلفه‌های تخلیه هم پارامترهای تبخیر از آب زیرزمینی، زهکشی و تخلیه آب چاه‌ها، چشمه و قنات در نظر گرفته شده است. در شکل (۵) زیرسیستم آب زیرزمینی برای آبخوان دزکرد-کامفیروز در پایین‌دست سد ملاصدرا به‌عنوان نمونه ارائه شده است.

زیرسیستم آب سطحی

در این زیرسیستم به بررسی وضعیت بیلان آب در سد ملاصدرا پرداخته می‌شود. مولفه‌های مختلفی شامل آب ورودی، تبخیر، سریز، نشت و خروجی (که شامل پارامترهای مختلف تأمین آب شرب، محیط زیست، صنعت و کشاورزی، پارامترهای تقاضای آب شامل تقاضای آب شرب، محیط زیست، صنعت و کشاورزی، مولفه کمبود آب و آب مازاد بر نیاز) با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر ظرفیت مخزن می‌باشد. در شکل (۶) زیرسیستم آب سطحی برای سدملاصدرا به همراه مولفه‌های آن ارائه شده است.

کل سیستم

در این بخش کل سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطوری‌که در شکل (۷) نشان داده شده است زیر سیستم‌های مختلف براساس روابط علت و معلولی به هم مرتبط شده‌اند تا بتوان سیستم جامعی را برای بررسی و مدیریت منابع آب در منطقه در نظر گرفت.

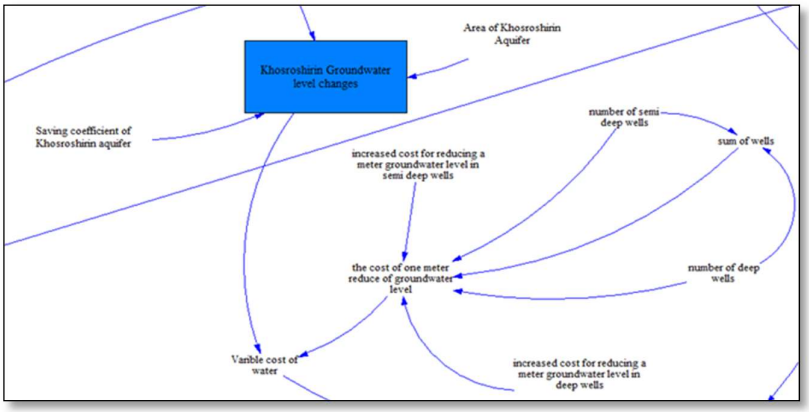


Fig. 4- Sub-system of groundwater level changes for Khosr-oshirin aquifer
شکل ٤- زیرسیستم تغییرات سطح آب زیرزمینی برای آبخوان خسرو-شیرین

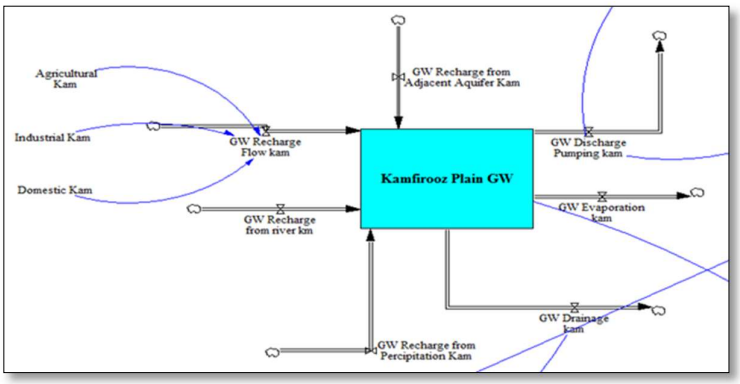


Fig. 5- Sub-system of groundwater changes for Dezkord-Kamfirouz aquifer
شکل ٥- زیرسیستم تغییرات آب زیرزمینی برای آبخوان دزکرد-کامفیروز

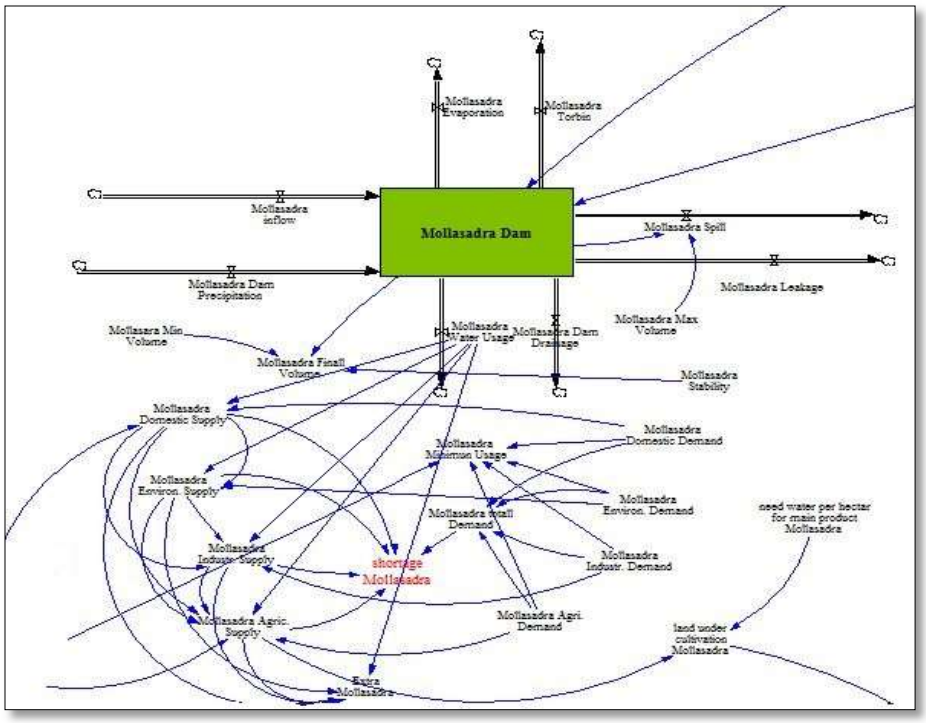


Fig. 6- Sub-system of surface water in Molla Sadra Dam
شکل ٦- زیرسیستم آب سطحی در سد ملاصدرا

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی

در این بخش به بررسی گزینه‌های مدیریتی مختلف برای بررسی وضعیت منابع آب در منطقه پرداخته می‌شود. برای این منظور ۱۲ گزینه مدیریتی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا داده‌های مورد نظر برای پارامترهای مختلف در سال‌های آبی ۸۹-۱۳۸۸ تا ۹۹-۱۳۹۸ محاسبه شد. سپس با استفاده از گزینه‌های مدیریتی مختلف به بررسی وضعیت منابع آب در منطقه برای دوره آتی ده ساله ۱۴۰۰-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۹-۱۴۰۸ پرداخته شد. در گزینه مدیریتی شماره یک، فرض شده که دوره ده ساله مطابق با شرایط فعلی باشد. در گزینه مدیریتی شماره دو، سطح زیرکشت برای همه محصولات ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند، این گزینه مدیریتی برای پایین دست سد ملاصدرا اعمال می‌شود. در گزینه مدیریتی شماره سه، مقدار آب برداشتی از آب زیرزمینی (شامل چاه، چشمه و قنات) به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. در گزینه مدیریتی شماره چهار، آب برداشتی از آب زیرزمینی به میزانی کاهش می‌یابد که تغییرات حجم آب زیرزمینی در سه آبخوان منطقه در دوره ده ساله صفر باشد. در گزینه مدیریتی شماره پنج، سطح زیرکشت محصولات پایین دست سد ملاصدرا به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند و همزمان برداشت از آب زیرزمینی به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. در گزینه مدیریتی شماره شش، سطح زیرکشت محصول برنج به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. گزینه‌های مدیریتی شماره هفت تا یازده، به‌صورت تغییر الگوی کشت می‌باشد به‌طوری‌که در گزینه مدیریتی شماره هفت، سطح زیرکشت محصول برنج به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده و به جای آن درخت سیب کاشته شود. در گزینه مدیریتی شماره هشت، سطح زیرکشت محصول برنج به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده و به جای آن محصول کنجد کاشته شود. در گزینه مدیریتی شماره نه، سطح زیرکشت محصول برنج به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده و به جای آن محصول آفتابگردان کاشته شود. در گزینه مدیریتی شماره ده، سطح زیرکشت محصول برنج به میزان ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده و به جای آن محصول کلزا کاشته شود. در گزینه مدیریتی شماره یازده، کلاً اجازه کشت برنج داده نشده و به جای آن محصول کنجد کشت شود. در گزینه مدیریتی شماره دوازده، کلاً اجازه کشت برنج داده نشود و به جای آن محصول کنجد کشت شود و به‌طور همزمان ۲۰ درصد از برداشت از آب‌های زیرزمینی در سه آبخوان منطقه کاسته شود.

DOI: 10.22055/jise.2024.43286.2062

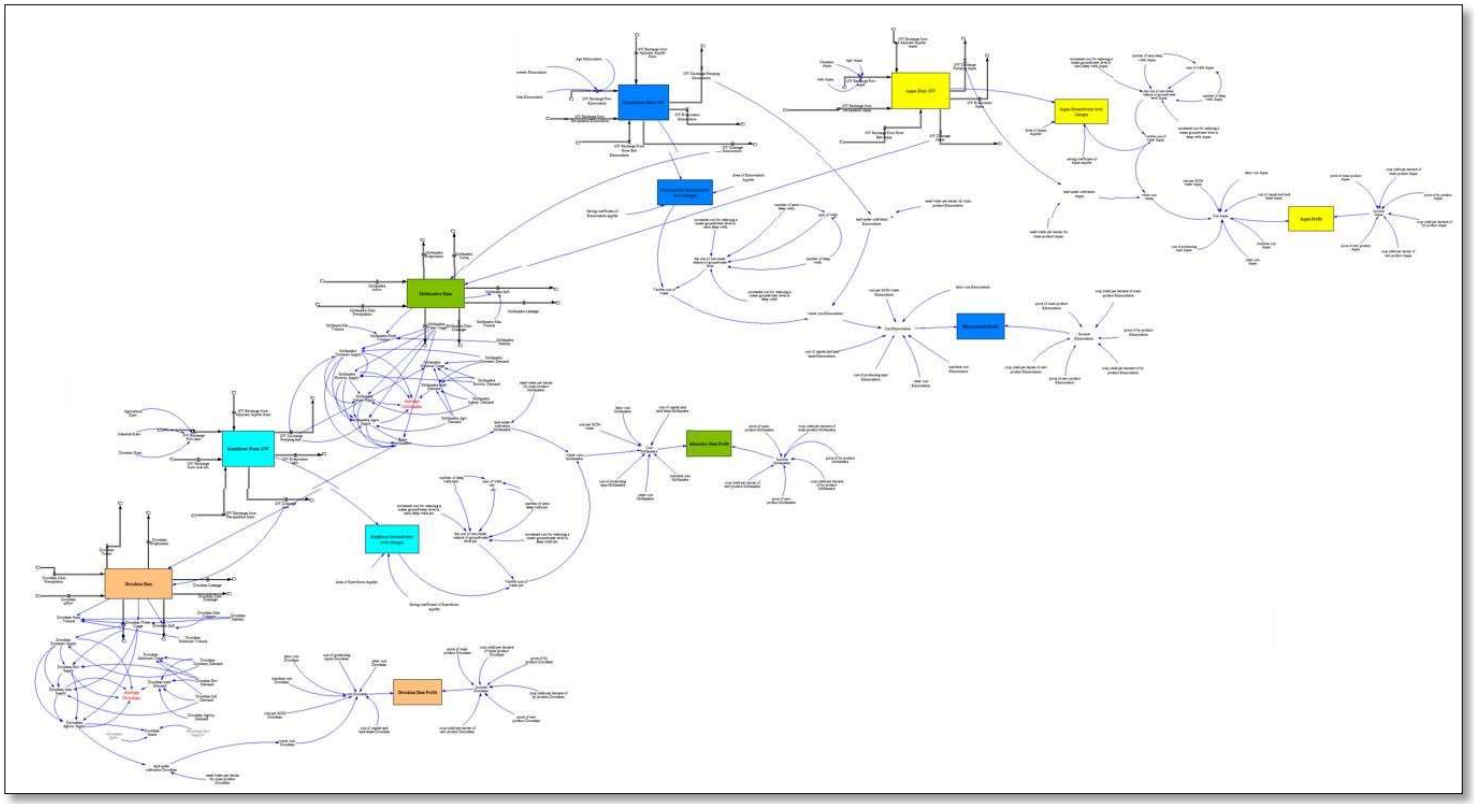


Fig. 7- The whole system
شکل ۷-کل سیستم

نتایج گزینه مدیریتی شماره یک

این گزینه مدیریتی مطابق وضع موجود می‌باشد. نتایج این گزینه مدیریتی به صورت زیر ارائه شده است. در شکل (۸) مؤلفه‌های مختلف در محاسبه مقدار آب مخزن سد ملاصدرا نشان داده شده است. مقدار آب تأمین شده برای کشاورزی در سد ملاصدرا در شکل (۹) نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که میانگین میزان درآمد سالانه حاصل از اجرای این گزینه مدیریتی برای کشاورزان منطقه آسپاس، خسروشیرین و پایین دست سد ملاصدرا در هر هکتار به ترتیب برابر با ۶۸/۴۷، ۵۷/۰۰ و ۷۴/۰۰ میلیون تومان است. تغییرات حجم ذخیره آب زیرزمینی در آبخوان آسپاس ۱۳/۳۶- میلیون مترمکعب، برای آبخوان خسروشیرین ۱/۱۵ میلیون مترمکعب و برای آبخوان دزکرد-کامفیروز ۷/۲۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. با این گزینه مدیریتی، تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان آسپاس ۰/۳۶- متر، در آبخوان خسروشیرین ۰/۱۲ متر و در آبخوان دزکرد-کامفیروز ۰/۷۷ متر می‌باشد. میانگین حداقل آب تأمین شده ماهانه برای کشاورزی در این گزینه مدیریتی برای پایین‌دست سد ملاصدرا ۲۸/۵۶ میلیون مترمکعب است. همچنین میانگین سطح زیرکشت در محدوده آسپاس، ۳۵۸۵۶ هکتار می‌باشد. میانگین سطح زیرکشت در محدوده خسروشیرین، ۴۶۳۲ هکتار است. میانگین سطح زیرکشت در پایین‌دست سد ملاصدرا ۸۰۳۹ هکتار می‌باشد. با توجه به تعداد زیاد شکل‌ها، و نتایج گزینه‌های مدیریتی مختلف، در بخش بعد به ارائه نتایج کلی از هر گزینه مدیریتی پرداخته می‌شود.

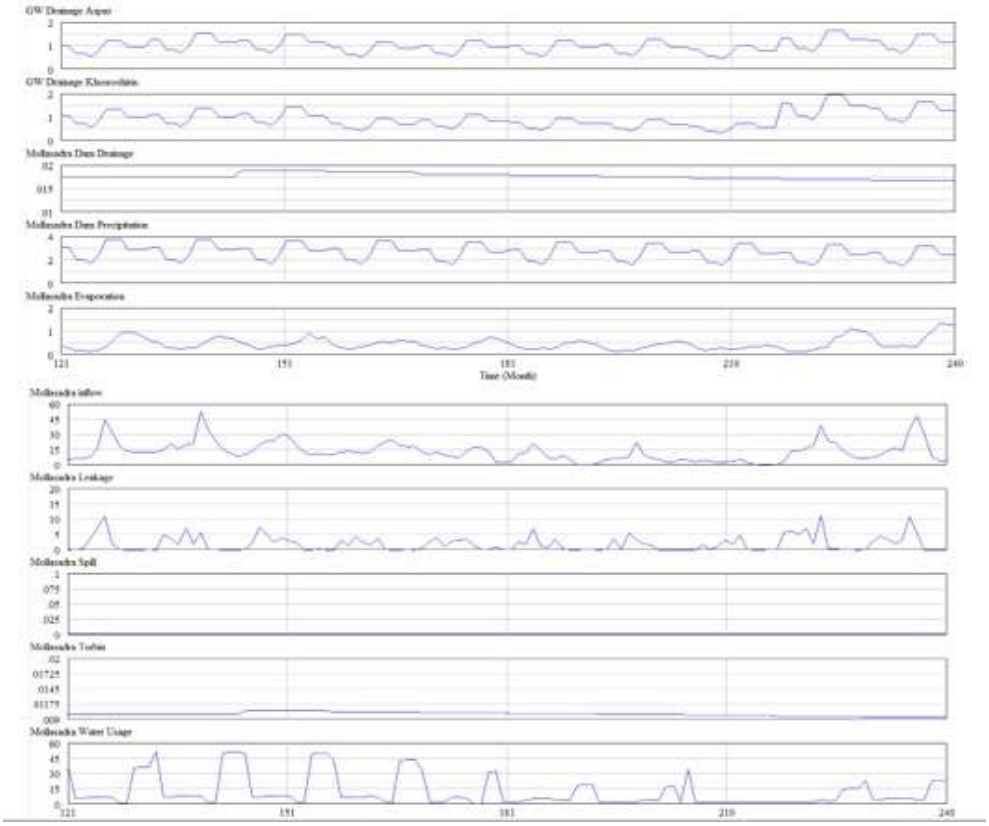


Fig. 8- Different components in the reservoir of the Molla Sadra Dam (MCM)

شکل ۸- مؤلفه‌های مختلف در مخزن سد ملاصدرا (MCM)

 DOI: 10.22055/jise.2024.43286.2062

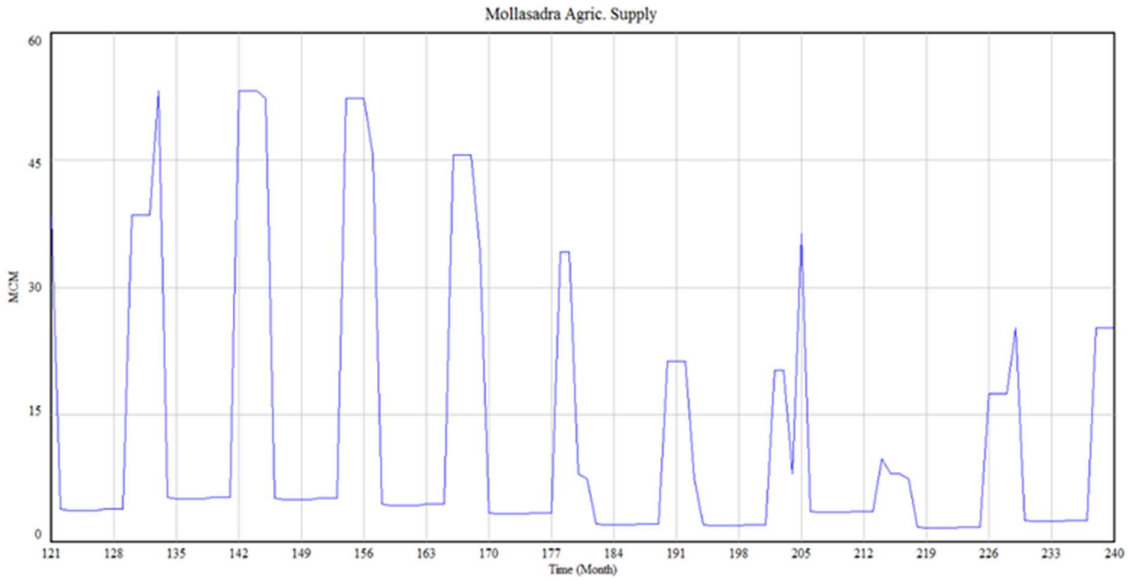


Fig. 9- Amount of water provided for agriculture in Molla Sadra Dam (MCM)

شکل ۹- مقدار آب تأمین شده برای کشاورزی در سد ملاصدرا (MCM)

مقایسه نتایج گزینه‌های مدیریتی مختلف

در جدول (۵) پارامترهای مختلف مربوط به اجرای گزینه‌های مدیریتی مختلف ارائه شده است، براساس این جدول می‌توان قضاوت مناسب‌تری بین اجرای گزینه‌های مدیریتی مختلف داشت. با توجه به نتایج این جدول، گزینه‌های مدیریتی ۱۲ و ۱۱ بهترین گزینه‌های مدیریتی هستند ولی اجرای کامل آن‌ها سخت می‌باشد و ممکن است با مخالفت کشاورزان همراه شود. با توجه به درآمد کشاورزان در پایین دست سد ملاصدرا، گزینه مدیریتی ۱۱ به‌عنوان بهترین گزینه مدیریتی شناخته می‌شود. در این گزینه مدیریتی با تغییر الگوی کشت، کنجد به جای برنج، می‌توان ضمن تأمین آب بیشتر برای پایین دست، درآمد قابل قبولی برای کشاورزان در پی داشته باشد. از بین گزینه‌های مدیریتی تغییر الگوی کشت (گزینه‌های مدیریتی هفت تا ۱۰)، گزینه مدیریتی شماره هفت دارای درآمد بیشتری می‌باشد ولی چون کاشت درخت سیب آب بیشتری مصرف می‌کند، گزینه‌های مدیریتی شماره هشت که تغییر الگوی کشت برنج با کنجد می‌باشد، به‌عنوان بهترین گزینه مدیریتی مربوط به تغییر الگوی کشت شناخته می‌شود.

نتایج نشان داد که تغییر الگو کشت با محصولات سیب، کنجد، کلزا و آفتابگردان به ترتیب دارای درآمد بیشتری هستند. به‌طوری‌که از بین آن‌ها آفتابگردان کمترین درآمد را برای کشاورزان دارد. لذا با توجه به این گزینه‌های مدیریتی، تغییر الگوی کشت کنجد به جای برنج توصیه می‌شود. علاوه بر این جدول، از نظر اقتصادی نیز گزینه‌های مدیریتی مختلف براساس درآمد همه کشاورزان در جدول (۶) ارائه شده است. براساس این جدول سناریو ۱۱ بهترین سناریو می‌باشد چون دارای درآمد بیشتری برای همه کشاورزهای پایین دست سد ملاصدرا متصور شده است. براساس نتایج دوره شبیه‌سازی می‌توان بیان نمود که با متوسط برداشت ۱۲۱/۳۷ میلیون مترمکعب در سال از آب زیرزمینی آبخوان آسپاس می‌توان در طی ده سال تغییرات حجم ذخیره این آبخوان را صفر نمود. همچنین با متوسط برداشت ۷/۶۰ میلیون مترمکعب در سال از آب زیرزمینی آبخوان خسرو-شیرین می‌توان در طی ده سال تغییرات حجم ذخیره این آبخوان را صفر نمود. با متوسط برداشت ۲۶/۵۱ میلیون مترمکعب در سال از آب زیرزمینی آبخوان دزکرد-کامفیروز می‌توان در طی ده سال تغییرات حجم ذخیره این آبخوان را صفر نمود.

جدول ۵- مقایسه نتایج گزینه‌های مدیریتی مختلف

Table 5- Comparison of the results of different scenarios

Various parameters	Area	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Farmer's annual income (million tomans)	Aspas	68.5	68.5	45.0	15.6	45.0	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	68.5	45.0
	Khosro-shirin	57.0	57.0	35.8	30.5	35.8	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	57.0	35.8
	Downstream of Molla Sadra Dam	74.0	44.5	74.0	74.0	44.5	56.0	84.5	82.0	74.0	78.0	114.0	114.0
Groundwater level changes	Aspas	-0.357	-0.357	0.183	1.077	0.183	-0.357	-0.357	-0.357	-0.357	-0.357	-0.357	0.183
	Khosro-shirin	0.121	0.121	0.395	1.196	0.395	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.121	0.395
	Dezkord-Kamfirooz	0.773	0.773	1.539	3.565	1.539	0.773	0.773	0.773	0.773	0.773	0.773	1.539
Groundwater storage changes (MCM)	Aspas	-13.36	-13.36	6.84	40.23	6.84	-13.36	-13.36	-13.36	-13.36	-13.36	-13.36	6.84
	Khosro-shirin	1.15	1.15	3.74	11.33	3.74	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	3.74
	Dezkord-Kamfirooz	7.24	7.24	14.42	33.40	14.42	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	7.24	14.42
Land under cultivation (hectares)	Aspas	35856	35856	28684	13840	28684	35856	35856	35856	35856	35856	35856	28684
	Khosro-shirin	4630	4630	3704	866	3704	4630	4630	4630	4630	4630	4630	3704
	Downstream of Molla Sadra Dam	8039	6713	7811	6569	6502	6817	8039	8039	8039	8039	8039	7811
Average minimum monthly water supply for agriculture (MCM)	Molla Sadra Dam	28.56	23.85	27.75	23.34	23.10	24.22	25.20	24.76	25.07	24.61	7.69	7.70
Average monthly minimum water shortage for agriculture (MCM)	Molla Sadra Dam	-0.88	-0.88	-0.88	-3.49	-1.69	-1.69	-1.69	-1.69	-1.69	-0.88	-2.56	-0.88

 DOI: 10.22055/jise.2024.43286.2062

جدول ٦- درآمد کشاورزان هر منطقه (بر حسب میلیارد تومان در سال) در سناریوهای مختلف
Table 6- Income of farmers of each region (in billion Tomans per year) in different scenarios

	Different scenarios											
Area	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Aspas	2455.0	2455.0	1290.7	216.2	1290.7	2455.0	2455.0	2455.0	2455.0	2455.0	2455.0	1290.7
Khosro-shirin	263.9	263.9	132.6	26.4	132.6	263.9	263.9	263.9	263.9	263.9	263.9	132.6
Downstream Molla Sadra dam	594.9	298.7	578.0	486.1	289.3	381.8	679.3	659.1	594.9	627.0	916.4	890.5

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور بررسی وضعیت منابع و مصارف آب سطحی و زیرزمینی سد ملاصدرا از اطلاعات و آمار ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری موجود در داخل و اطراف حوضه استفاده شد. با ترسیم نقشه‌های هم بارش و هم‌دمای ماهانه در سال‌های مختلف برای آبخوان‌ها و محدوده‌های مطالعاتی، مقادیر بارش و دما برای هر یک از آن‌ها، استخراج شد. در این مطالعه با بررسی وضعیت منابع و مصارف در بالادست و پایین دست سد ملاصدرا، و برقراری ارتباط بین آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم، پویایی سیستم مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور زیر سیستم‌های اقتصادی، تغییرات سطح آب زیرزمینی، تغییرات حجم آب زیرزمینی، آب سطحی و کل سیستم در محیط نرم‌افزار بررسی شد. شبیه‌سازی عملکرد آبخوان‌های بالادست و پایین دست سد ملاصدرا و مخزن سد ملاصدرا طی سال‌های ۱۳۸۸ الی ۱۳۹۹ بررسی شد. سپس مدل برای یک افق ده ساله مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور دوازده گزینه مدیریتی مختلف ارائه شد. از بین گزینه‌های مدیریتی تغییر الگوی کشت، گزینه مدیریتی شماره هفت دارای درآمد بیشتری می‌باشد ولی چون کاشت درخت سیب آب بیشتری مصرف می کند گزینه مدیریتی شماره هشت که تغییر الگوی کشت برنج با کنجد می‌باشد، به‌عنوان بهترین گزینه مدیریتی مربوط به تغییر الگوی کشت شناخته می‌شود. نتایج بررسی گزینه‌های مدیریتی مختلف نشان داد که اگر کشت برنج به طور کامل صورت نگیرد و محصول کنجد به جای آن کاشته شود، می‌توان درآمد قابل قبولی داشت (گزینه مدیریتی ۱۱). نتایج نشان داد که تغییر الگو کشت با محصولات سیب، کنجد، کلزا و آفتابگردان به‌ترتیب دارای درآمد بیشتری هستند. به‌طوری‌که از بین آن‌ها آفتابگردان کمترین درآمد را برای کشاورزان دارد. لذا با توجه به این گزینه‌های مدیریتی، تغییر الگوی کشت کنجد به جای برنج توصیه می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه SCU.WH1401.589 صورت گرفته است

دسترسی به داده‌ها

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

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت شده و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان می‌باشد.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: ابوالفضل لقب‌دوست: بررسی و تحقیق، نگارش، بازبینی و ویرایش

نویسنده دوم: حیدر زارعی: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نگارش، پیش‌نویس اولیه، نگارش، بازبینی و ویرایش.

نویسنده سوم: فریدون رادمنش: نگارش، بازبینی و ویرایش.

نویسنده چهارم: اباذر سلگی: نرم‌افزار، نگارش، تهیه پیش‌نویس اولیه.

نویسنده پنجم: مهدی ضرغامی: روش‌شناسی، نگارش، تهیه پیش‌نویس اولیه.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این تحقیق، از حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز صمیمانه قدردانی و همچنین از شرکت آب منطقه‌ای استان فارس به‌دلیل همکاری‌های لازم و در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز این مطالعه، کمال تقدیر و تشکر را به‌عمل می‌آورند.

References

1- Adeniran, A.E. and Bamiro, O.A., 2010. Application of System Dynamics Model to the Strategic Planning of a Municipal Water Supply Scheme. *Application of System Dynamics methods*, *Water Resources Engineering*, pp.1-14.

2- Ahmad, S. and Simonovic, S.P., 2004. Spatial system dynamics: a new approach for simulation of water resources systems. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), pp. 331-340. Doi: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:4(331).

3- Alizadeh, A., 2004, Principles of Applied Hydrology, *Imam Reza University Publications*, 14th edition, 816 pages.

4- Aram, P., 2014. Systematic analysis of groundwater level changes with the aim of policy making in the agricultural sector (Case study: Firozabad Plain). Master's thesis, *Shiraz University of Technology*. (In Persian).

5- Giordano, R., Brugnach, M. and Vurro, M., 2012. System dynamic modelling for conflicts analysis in groundwater management. In *9th International Congress on Environmental Modelling and Software, Leipzig, Germany*.

6- Goldani, S.R, Rajabi Mashhadi, H. and Ghazi, R., 2012. An Analytical Model for Generation Expansion Planning in Competitive Environment based on Dynamic Balance between Energy Supply and Demand. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 8 (1), pp. 57-66. (In Persian).

7- Guemouria, A., Chehbouni, A., Belaqziz, S., Epule, T., Ait Brahim, Y.A., El Khalki, E.M., Dhiba, D. and Bouchaou, L., 2023. System dynamics approach for water resources management: a case study from the Souss-Massa basin. *Water*, 15(8), pp. 1-29. Doi: 10.3390/w15081506.

8- Hedayat, S., 2016. *Assessment and optimal management of groundwater resources* (Bakhtegan-Maharlo watershed). Master's thesis, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. (In Persian).

9- Koti, J.H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N. and Johnstone, R., 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *Science of the Total Environment*, 573, pp. 444-457. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.081.

10- Luo, Y., Khan, S., Cui, Y. and Peng, S.H., 2009. Application of system dynamics approach for time varying water balance in aerobic paddy fields. *Paddy Water Environ,* 7, pp.1-9.

11- Madani, K., 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of Environmental Studies and Sciences,* 4(4), pp. 315-328.

12- Phan, T.D., Bertone, E. and Stewart, R.A., 2021. Critical review of system dynamics modelling applications for water resources planning and management. *Cleaner Environmental Systems*, 2(100031), pp. 1-15. Doi: 10.1016/j.cesys.2021.100031.

13- Sahin, O., Siems, R.S., Stewart, R.A. and Porter, M.G., 2016. Paradigm shift to enhanced water supply planning through augmented grids, scarcity pricing and adaptive factory water: A system dynamics approach. *Environmental Modelling & Software*, 75, pp. 348-361. Doi: 10.1016/j.envsoft.2014.05.018.

14- Shahrokhi Sardo, M. and Jalal Kamali, N., 2021. System Dynamic Model of Groundwater Exploitation Management and Artificial Recharging Performance (Case Study of Nessa Plain, Bam, Kerman). *Iranian Water Research Journal*, 15(2), pp.109-118. (In Persian).

15- Simonovic, S.P. and Rajasekaram, V., 2004. Integrated analyses of Canada's Water resources: A system dynamics approach. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne Des Ressources Hydriques*, 29 (4), pp. 223-250. Doi: 10.4296/cwrj223.

16- Soleimani Sardoo, F., Vakili Tajareh, F. and Rostami Khalaj, M., 2021. Water Resources Management in the South of Kerman Province Using the System Dynamics Model. *Iranian Journal of Watershed Management Science*, 15 (55), pp.11-21. Dor: 20.1001.1.20089554.1400.15.55.3.1. (In Persian).

17- Winz, I., Brierley, G. and Trowsdale, S., 2009. The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Managment*, 23(7), pp. 1301-1323.

18- Zarghami, M. and Akbariyeh, S., 2012. System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling*, 60, pp. 99-106. Doi: 10.1016/j.resconrec.2011.11.008.

19- Zhilia, C., Xuan, W., Cong, P., Yan, C. and Weichen, H., 2018. A hybrid system dynamics and optimization approach for supporting sustainable water resources planning in Zhengzhou City, China. *Journal of Hydrology*, 556, pp. 50-60. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.007.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p 33-50

Research Paper

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

EXTENDED ABSTRACT

Generation of Unstructured Grids based on Sedimentation Data Obtained from the Map of Erosion and Sedimentation (Case Study: Dez Dam Watershed)

A. Daneh-Dezfuli[1*] and S.S. Bahrainian[2]

1- Correponding Author, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran (a.danehdezfuli@scu.ac.ir).*
2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 5 June 2024
Revised: 21 August 2025
Accepted: 6 September 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Unstructured Grid, Sedemintation Data, Dez Dam Watershed.

TO CITE THIS ARTICLE:

Daneh-Dezfuli, A., Bahrainian, S. S. 2026. Generation of Unstructured Grids based on Sedimentation Data Obtained from the Map of Erosion and Sedimentation (Case Study: Dez Dam Watershed)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 33-50. doi: 10.22055/jise.2025.45666.2112

Abstract

This paper presents the generation of unstructured triangular grids based on the sediment data obtained from the erosion and sedimentation map of the Dez Dam watershed, covering an area of 17,320 km². The proposed grid generation algorithm starts the refinement process with a coarse initial grid. The grid refinement is an iterative process that simultaneously employs both point insertion and cell subdivision methods. Edge-based and cell-based connectivity matrices have been employed to accelerate the retrieval of grid information. An advantage of using these matrices is the minimal number of computations required to extract information for each grid element (vertex, edge, and cell). For instance, the database can identify the cells adjacent to an edge using only two computational operations. The improvement of the final grid quality is another aspect addressed in the proposed grid generation algorithm. The novelty of this paper lies in the use of erosion and sedimentation data for the adaptive distribution of grid vertices. In this study, erosion distribution data obtained from the PSIAC model were utilized to define edge sources. From a performance standpoint, the proposed algorithm produces unstructured grids in less than one second. More than 70% of the grid cells exhibit shapes close to equilateral triangles.

Introduction

Water resources are of fundamental importance to the socio-economic and environmental sustainability of Iran. Protecting these resources, particularly natural freshwater reservoirs such as dams, is a strategic necessity given the country's high dependence on surface water for agriculture, domestic use, and energy production. One of the most critical challenges threatening water reservoirs is sedimentation, primarily caused by soil erosion processes in upstream watersheds. Sediment transport leads to numerous environmental and operational problems: reduction in reservoir storage capacity, obstruction of irrigation networks and waterways, degradation of agricultural soils, increased river turbidity, and deterioration of water quality downstream. In addition, sediments act as carriers of nutrients and pollutants, intensifying ecological risks and drawing the attention of earth scientists and environmental engineers.

Mitigating these challenges requires implementing targeted soil conservation and watershed management strategies. A crucial prerequisite is the accurate quantification of soil erosion and sediment yield across watersheds and the identification of high-priority areas for intervention. To support effective modeling and decision-making, computational approaches such as grid

generation are widely employed. However, conventional grid generation often neglects the spatial variability of sediment distribution, which can limit its applicability in erosion and sediment transport modeling. The present study addresses this gap by developing an adaptive grid generation approach that incorporates sediment yield data as a controlling parameter. Specifically, the Dez Dam watershed, one of Iran's most important water reservoirs, is selected as a case study. The method involves generating unstructured triangular grids whose refinement is driven by sedimentation maps derived from the PSIAC model (Pourali et al., 2008). The novelty of the proposed approach lies in introducing the concept of edge sources to control both the distribution of vertices and the termination of the refinement process. By linking vertex density directly to sediment yield, the resulting grid provides an efficient and accurate foundation for hydrological and sediment transport simulations.

Methodology

The grid generation algorithm begins with an initial coarse triangular grid covering the study domain. Refinement is then carried out iteratively through point insertion and cell subdivision techniques (Bahrainian et al., 2015). To achieve computational efficiency, the algorithm employs edge-based and cell-based matrix data structures. These data structures reduce memory requirements and enable rapid access to grid elements. Once the main refinement steps are complete, a final grid quality enhancement phase is applied to improve geometric properties such as angle distribution and aspect ratio.

A central feature of the methodology is the use of grid adaptation to regulate vertex distribution across the computational domain. To implement this, edge sources are defined. These sources act as control agents that manage the desired edge lengths of cells during refinement. They also govern the continuation and automatic termination of the refinement process.

The operational procedure of edge sources can be summarized as follows. Prior to inserting a new vertex on an edge, the source measures the current edge length. If this length exceeds the target value defined for the corresponding region, vertex insertion is permitted. A critical aspect of this approach is the definition of desired edge lengths across different regions of the watershed.

As a case in point, for demonstration of the presented grid generation application, the Dez Dam watershed domain is divided into four regions with varying specific sediment yields: Region I (550 $m^3/km^2/yr$), Region II (750 $m^3/km^2/yr$), Region III (1150 $m^3/km^2/yr$), and Region IV (1550 $m^3/km^2/yr$).

To operationalize this setup, six edge sources (S1, S2, …, S6) are defined on the initial grid. Each source is represented as a vector with two spatial coordinates. For the placement of a new vertex along an edge, the vertical distance d of the midpoint of the longest edge from each edge source is calculated. The nearest source is then identified, and the orientation of vertex placement is determined by evaluating the sign of the dot product (S × r), where r is the vector from the edge midpoint to the corresponding edge source. This ensures that each new vertex is associated with one of the four sediment yield regions.

The desired edge length in each region, denoted as dl, is defined as a function of sediment yield according to the following equation: $dl=\alpha_i\times(Q_{s,\min}/Q_{s,i})$, i = I, II, III, and IV, where $0 \le \alpha_i \le 1$. Here, $Q_{s,\min}$ denotes the minimum sediment yield across all regions, while $Q_{s,i}$ represents the sediment yield in the ith region. The coefficient α_i can be uniformly applied to all regions or individually adjusted depending on model requirements. Finally, if the maximum selected edge length exceeds the desired value, the algorithm triggers the refinement process until the grid meets the specified resolution criteria.

Results and Discussion

Sediment yield data from the PSIAC model (Pourali et al., 2008) were integrated into the adaptive refinement procedure to generate the final grid for the Dez Dam watershed. The algorithm proved computationally efficient, producing refined grids in less than one second on standard computing hardware. The resulting grids exhibited several favorable characteristics. First, no skewed or degenerate cells were observed, confirming the robustness of the refinement strategy. Second, more than 70% of the triangular elements were close to equilateral in shape, reflecting

high geometric quality. Such quality is essential for ensuring numerical stability and accuracy in subsequent hydrological and sediment transport simulations. Third, the adaptive refinement successfully captured the spatial variability of sediment yield. Areas with higher sedimentation rates were represented by denser vertex distributions and smaller edge lengths, while regions with lower sedimentation rates retained coarser resolution. This adaptive representation ensures that computational resources are focused on critical regions without unnecessarily increasing grid complexity in low-priority areas.

The results highlight the effectiveness of edge sources in dynamically managing grid density. By linking vertex distribution directly to sediment yield data, the method produces grids that are both computationally efficient and hydrologically meaningful. This integration of sedimentological information into the grid generation process represents a significant improvement over traditional approaches that treat refinement as a purely geometric or uniform process.

Conclusions

This study presents a novel approach for generating unstructured triangular grids that integrate sediment yield data into the refinement process. Using the Dez Dam watershed as a case study, the method demonstrates how vertex distribution can be adaptively controlled through the concept of edge sources. These sources govern both the initiation and termination of refinement, ensuring that the resulting grid aligns with the spatial variability of sediment yield across the watershed.

In conclusion, the integration of erosion and sedimentation data into unstructured grid generation represents a promising advancement for computational watershed studies. The adaptive refinement guided by edge sources ensures that grid structures are not only computationally optimized but also environmentally relevant, thereby offering a practical pathway toward improved water resource management in sediment-sensitive regions such as the Dez Dam watershed.

Conflict of Interest

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

Funding

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

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

During the preparation of this manuscript the authors used AI-assisted tools to a small degree for language polishing, grammar correction and making some sentences clearer. No AI tools were used to create data, perform analyses, produce results, and offer interpretations or list references. Every part of the content was carefully checked, confirmed and agreed upon by the authors. The authors are fully responsible for the correctness and honesty of the manuscript

Authors' contribution

First Author: Alireza Daneh-Dezfuli, Writing, Review & Editing, Writing Original Draft, Validation, Project Administration, Methodology.

Second Author: Seyed Saied Bahrainian, Writing, Review & Editing, Project Administration.

Acknowledgment

This research has no acknowledgments.

References

1- Bahrainian, S.S., Daneh-Dezfuli, A., Noghrehabadi, A. 2015. Unstructured grid generation in porous domains for flow simulations with discrete-fracture network model, *Transport in Porous Media 109*: pp. 693-709.

2- Pourali, S.H., Matkan, A.A. and Hosseini-Asl, A. 2008. Preparing the map of erosion hazard and sedimentation in Dez watershed by remote sensing and GIS. *Environmental Sciences, 8*(1): 83-100.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۵۰-۳۳

تولید شبکه‌های بی‌سازمان بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه‌های فرسایش و رسوب (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد دز)

علیرضا دنه‌دزفولی[1*] و سیدسعید بحرینیان[2]

۱*- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. a.danehdezfuli@scu.ac.ir
۲- استاد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

دریافت:۱۴۰۳/۰۳/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۲۴

چکیده

در این مقاله به تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب حوضه آبخیز سد دز با مساحتی بالغ بر ۱۷۳۲۰ کیلومتر مربع پرداخته شده است. الگوریتم تولید شبکه ارائه شده با یک شبکه اولیه درشت شروع به فرآیند ریزسازی شبکه می‌کند. فرآیند ریزسازی شبکه یک فرآیند تکرار است و به‌طور هم‌زمان از روش‌های جاگذاری گره و تقسیم سلول استفاده می‌برد. به‌منظور افزایش سرعت فراخوانی اطلاعات شبکه از پایگاه‌های داده‌ای با ماتریس‌های مبنا-ضلع و مبنا-سلول استفاده شده است. یک مزیت به‌کارگیری این پایگاه‌های داده‌ای در اندک بودن تعداد عملیات محاسباتی برای استخراج اطلاعات هر المان شبکه (گره، ضلع و سلول) است. به‌عنوان مثال، این پایگاه داده تنها با دو عملیات محاسباتی می‌تواند سلول‌های همسایه یک ضلع را مشخص نماید. بهبود کیفیت شبکه نهایی از دیگر گزینه‌هایی است که در الگوریتم تولید شبکه ارائه شده مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری مقاله ارائه شده در استفاده اطلاعات فرسایش و رسوب به‌منظور تطبیق و توزیع گره‌های شبکه بوده است. در این تحقیق از اطلاعات توزیع فرسایش به‌دست آمده مدل پسیاک در تعریف چشمه‌های ضلعی استفاده شده است. از نظر کیفی، الگوریتم ارائه‌شده در کمتر از یک ثانیه به تولید شبکه‌های بی‌سازمان خروجی می‌پردازد. بیش از ۷۰ درصد کل سلول‌های شبکه، شبیه‌ترین به مثلث متساوی‌الاضلاع بوده‌اند.

کلید واژه‌ها: شبکه بی‌سازمان، اطلاعات رسوب، حوضه آبخیز سد دز.

مقدمه

با توجه به اهمیت منابع آبی در کشور ایران، نیاز است تا از مخازن طبیعی نگهداری آب‌های شیرین مانند سدها محافظت بیشتری شود. یکی از مهمترین روش‌های حفظ این منابع آبی، انجام مدیریت صحیح در جهت کاهش فرسایش و تولید رسوب می‌باشد. نقش فرسایش و تولید رسوب در کاهش حاصلخیزی و هدر رفت خاک، کاهش حجم موثر مخازن سدها، گرفتگی و انسداد مجاری آبیاری، آبراهه‌ها و رودخانه‌ها، گل‌آلود شدن آب رودخانه‌ها و کاهش کیفیت آب و آلودگی آب‌های مناطق پایین‌دست رسوب به‌عنوان حامل مواد آلاینده از دیر باز شناسایی شده و مورد توجه متخصصین و کارشناسان علوم زمین بوده است. برای جلوگیری و یا کاهش اثرات یاد شده، نیاز به مدیریت و اجرای اقدامات حفاظت خاک و کنترل رسوب می‌باشد. لازمه مدیریت و اتخاذ تصمیم درباره مهار فرسایش و رسوب، آگاهی از میزان فرسایش و تولید رسوب در یک حوضه آبخیز و شناسایی مناطق بحرانی و اولویت‌بندی آن‌ها برای اجرای برنامه‌ها و اقدامات آبخیزداری برای کاهش فرسایش و مهار تولید و حمل رسوب است (Pourali et al., 2008).

عدم وجود یا کمبود داده‌ها در زمان فرسایش خاک و تولید رسوب در بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور، کاربرد روش‌های تجربی به‌منظور برآورد فرسایش خاک و رسوب‌زایی را الزام می‌دارد. سالانه حجم قابل ملاحظه‌ای رسوب وارد سدهای کشور می‌شود که باعث کاهش عمر مفید سدها خواهند شد. برآورد میزان رسوب موجب می‌شود تا عوامل مهم در رسوب‌دهی حوضه آبخیز شناسایی شوند. پیش‌بینی تولید رسوب با استفاده از مدل‌های تشکیل رسوب در حوضه‌های آبخیز سدها یکی از روش‌های مدیریت صحیح است. این مدل‌ها مقدار تولید رسوب و توزیع آن را در یک حوضه آبخیز سد ارائه می‌دهند.

تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب حوضه آبخیز سد دز (مطالعه موردی) هدف از این مقاله است. حوضه آبخیز سد دز دارای مختصات جغرافیایی ´۱۰ و °۴۸ تا ´۲۱ و °۵۰ طول شرقی و ´۳۶ و °۳۲ تا ´۷ و °۳۴ عرض شمالی می‌باشد. حوضه آبخیز سد دز روی شش استان خوزستان، اصفهان، مرکزی، همدان، چهار محال و بختیاری و لرستان گسترده شده است. سهم مساحت هر یک از این استان‌ها در حوضه آبخیز سد دز و همچنین درصد مساحت هر یک در قیاس با دیگر استان‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است. بر اساس داده‌های این جدول می‌توان دریافت که این حوضه آبخیز دارای ۱۷۳۲۰ کیلومتر مربع مساحت است. جانمایی هر یک از این شش استان در حوضه آبخیز سد دز در شکل (۱) نشان داده شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

جدول ۱- مساحت استان‌های مختلف واقع در حوضه آبخیز سد دز (Pourali et al., 2008)

Table 1- Area of different provinces located in Dez dam watershed (Pourali et al., 2008)

Province name	Area (km2)	Relative Area (%)
Khozestan	2305	13.3
Esfehan	1864	10.76
Markazi	1259	7.27
Hamadan	14	0.08
Chahar-o-Bakhtiyari	735	4.24
Lorestan	11143	64.35
Whole Watershed	17320	100

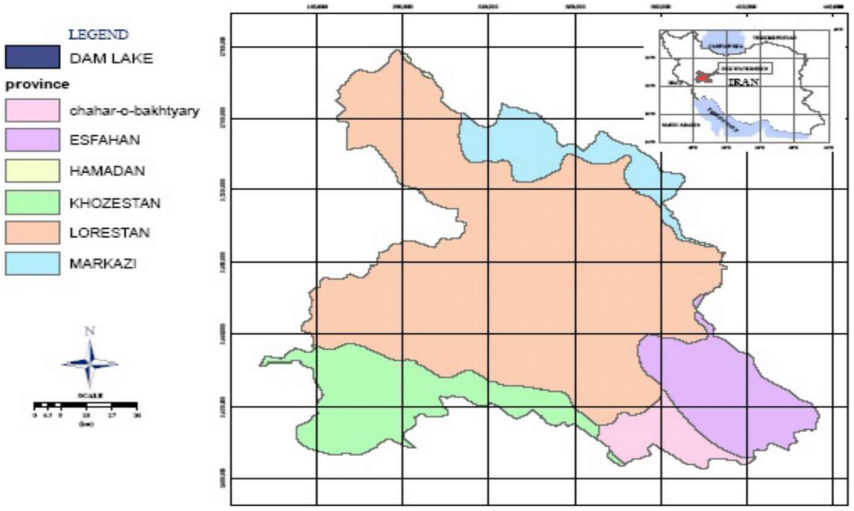


Fig 1- Location of different six provinces in Dez dam watershed (Pourali et al., 2008)

شکل ۱- موقعیت شش استان مختلف در حوضه آبخیز سد دز (Pourali et al., 2008)

تعریف مسئله

یک فرآیند تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی در حوضه آبخیز سدها نیاز دارد تا توزیع گره‌های شبکه تابعی از خصوصیات فرسایش و رسوب در آن حوضه باشد. نوآوری مقاله حاضر در استفاده از اطلاعات رسوب در فرآیند تولید شبکه است. توزیع تراکم رسوب بر حسب $m^3/km^2/Yr$ به عنوان ورودی به الگوریتم تولید شبکه داده می‌شود. از این اطلاعات در جهت تطبیق اتوماتیک تراکم گره‌های شبکه در نواحی مختلف حوضه آبخیز استفاده خواهد شد.

ساختار مقاله حاضر بدین شکل است که در بخش بعد به مطالعه تحقیقات صورت گرفته در خصوص تولید شبکه‌های بی‌سازمان پرداخته شده است. در ادامه به ارائه الگوریتم تولید شبکه‌های بی‌سازمان اختصاص داده شده است. سپس به مطالعه آماری شبکه‌های تولید شده پرداخته شده است. جمع‌بندی و تیجه‌گیری نتایج در بخش آخر ارائه شده است.

مروری بر تحقیقات پیشین

تولید شبکه‌های بی‌سازمان به‌صورت کاربردی توسط Weatherill (1988) و Baker (1989) به جامعه علمی معرفی شد. دو روش اساسی برای تولید شبکه‌های بی‌سازمان وجود دارند که بیش از دیگر روش‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها شامل معیار تولید شبکه مثلثی Delaunay (1934) و Advancing Front Technique، Löhner (1988) است. معیار Delaunay (1934) ریشه در اصول هندسه محاسباتی دارد. روش Advancing Front یک روش ابتکاری در تولید شبکه‌های بی‌سازمان است. با این وجود روش‌های نوظهوری در تولید شبکه‌های بی‌سازمان علاوه بر شیوه‌های نام‌برده وجود دارند. روش جاگذاری گره و تقسیم سلول در زمره این روش‌ها است (Bahrainian et al., 2015).

معیار Delaunay (1934) منجر به تولید الگوریتم‌های بی‌شماری برای ساخت شبکه‌های بی‌سازمان شده است. نکته قابل توجه در این الگوریتم‌ها وجود عدم همزمانی در تولید گره و تشکیل مثلث‌ها است. به عبارت دیگر در این الگوریتم‌ها پیش از تعیین مثلث‌ها نیاز به ساخت مجموعه‌ای از گره‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های تولید گره‌ها استفاده از دیاگرام‌های Voronoi است. این دیاگرام‌ها توسط Dirichlet (1850) و Voronoi (1908) ارائه شده‌اند.

Bowyer (1981) و Watson (1981) به‌صورت جداگانه ولی در یک زمان الگوریتمی برای تولید شبکه‌های مثلثی بر مبنای را ارائه کردند. این الگوریتم با یک شبکه اولیه مثلثی شروع می‌شود که با استفاده از معیار Delaunay (1934) ساخته شده است.

سپس گره‌های جدید را به‌ترتیب روی شبکه اضافه می‌کند. روش الگوریتم آن‌ها به این شرح است که ابتدا یک گره به شبکه اضافه می‌شود. سپس تمام سلول‌های موجود که شامل گره جدید هستند از شبکه حذف می‌شوند. با این عمل یک حفره در شبکه به‌وجود می‌آید. در انتها از هر گره روی مرز حفره به سوی گره جدید یک ضلع عبور داده می‌شود.

Sloan و Houlsby (1984) الگوریتم Watson (1981) را به‌صورت یک کد کامپیوتری ارائه نمودند. این کد با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FORTRAN 77 تهیه شده است. شبکه اولیه در این الگوریتم از تشکیل مثلث‌هایی روی دیاگرام Dirichlet (1850) به‌دست می‌آید. Rebay (1993) به تعمیم و بهینه‌سازی الگوریتم Bowyer (1981) و Watson (1981) در تولید شبکه‌های بی‌سازمان بر مبنای معیار Delaunay (1934) پرداخت. مثلث‌های اولیه در این تعمیم از اتصال گره‌های روی مرز خارج و سطح جسم جامد ساخته می‌شود.

الگوریتم Projection دیدگاه دیگری است که در تولید شبکه استفاده می‌شود (Imai, 2000). شبکه تولید شده با این الگوریتم، معیار Delaunay (1934) را نیز ارضا می‌سازد. الگوریتم Projection، مسئله تولید شبکه را از یک سطح دوبعدی به یک رویه سه‌بعدی با تشکیل یک پوشش محدب انتقال می‌دهد. این الگوریتم گره‌های شبکه دوبعدی را روی رویه محدب تصویر می‌کند. سپس گره‌های تصویر شده روی رویه، تشکیل یک پوشش مثلثی را خواهند داد. در انتها این گره‌ها به همراه اضلاع بین آن‌ها از فضای سه بعدی به فضای دوبعدی بازتصویر می‌شوند.

Chew (1989) به‌منظور غلبه بر مشکلات عدم حفظ مرزهای شبکه به معرفی روش تولید شبکه بر مبنای معیار Constrained Delaunay پرداخت. اندازه اضلاع سلول‌های مثلثی در این روش پیش از شروع ریزسازی شبکه تعیین می‌شود. نتیجه اصلی کار آن است که با این روش یکپارچگی مرزهای دامنه حفظ خواهد شد.

کاربردهای چشم‌گیر Advancing Front Technique در حوضه تولید شبکه‌های بی‌سازمان توسط Pirzadeh (1992)، معرفی گردیدند. این روش شامل تولید سلول در هر لحظه روی یک لبه پیش‌رو است. تولید شبکه‌های دوبعدی در این روش با گسسته‌سازی مرزهای هندسی شروع می‌شود. این اضلاع تشکیل دهنده لبه پیش‌رو هستند که قرار است به داخل میدان حرکت کنند. در هر لحظه یک ضلع انتخاب می‌شود و یک مثلث جدید توسط آن خلق می‌شود. قاعده این مثلث روی لبه قرار دارد و رأس دیگر آن که یک گره جدید است درون میدان قرار دارد. دیگر اضلاع این لبه به‌طور مشابه توسط مثلث‌های جدید پوشیده می‌شوند. پیشانی لبه با تولید هر مثلث جابه‌جا می‌شود. بنابراین لبه پیش‌رو یک صف الویت‌دار را تشکیل می‌دهد که اضلاع مدام به آن ورود و یا خروج پیدا می‌کنند. فرآیند تولید شبکه زمانی خاتمه می‌یابد که صف خالی گردد. یعنی هنگامی که تمام لبه‌ها با یکدیگر ممزوج شوند و دامنه کاملاً پوشیده شده باشد. علت اصلی این فرآیند در تولید سلول‌هایی بسیار شبیه به مثلث متساوی‌الاضلاع است.

Daneh-Dezfuli و Bahrainian (2014) به ارائه الگوریتمی جدید برای تولید شبکه‌های بی‌سازمان در هندسه مخازن هیدروکربوری تحت‌الارضی پرداختند. پیش از آن، این الگوریتم برای تولید شبکه‌های محاسباتی در مسائل زمین‌شناسی استفاده شده است. در این مقاله بناست تا به توسعه این الگوریتم برای تولید شبکه در حوضه آبریز سد دز پرداخته شود.

کنترل کیفیت شبکه شامل توانایی تولید میدان‌های گسسته‌ای است که دارای توزیع مناسب گره‌ها (انباشتگی)، شامل سلول‌هایی با نسبت ظاهری مناسب (چولیدگی) و تغییرات حجم یکنواخت (هموار) است (Spragle et al., 1991). مکانیزم کنترل کیفیت بر مبنای فرآیندهایی از ظهور سلول‌های نامناسب ممانعت می‌گردد. چرا که اثر حضور یک سلول نامناسب می‌تواند در شبکه گسترش یابد و بر کیفیت شکل دیگر سلول‌های محاسباتی تأثیر گذارد.

روش تولید شبکه‌های بی‌سازمان

در این مقاله بنا است تا با استفاده از روش تولید شبکه ارائه شده به گسسته‌سازی حوضه آبخیز سد دز بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب پرداخته شود. شبکه‌ای که با استفاده از روش ارائه شده تولید می‌شود، دامنه فیزیکی را به تعدادی از زیردامنه‌های مثلثی تقسیم می‌سازد. $i=1,...,N$ تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی را نشان می‌دهد. این تقسیم‌بندی دارای ویژگی‌های زیر است:

۱- Ω_i یک چند ضلعی محدب است.

۲- $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset$.

۳- اگر $\Omega_i \cap \Omega_j \neq \emptyset$ باشد، آنگاه :

۳-۱- اشتراک Ω_i و Ω_j در یک گره است.

۳-۲- اشتراک Ω_i و Ω_j در یک ضلع است.

در ادامه، روش تهیه شبکه اولیه، نحوه تشکیل ماتریس‌های اتصالات و همچنین فرآیند ریزسازی شبکه اولیه بیان شده است. براین اساس، تولید شبکه بی‌سازمان نهایی در دامنه حوضه آبخیز سد دز بدون در نظر گرفتن اطلاعات رسوب و سپس با تطبیق شبکه نهایی تولیدشده با استفاده از اطلاعات تولید رسوب به دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب ارائه شده است.

شبکه اولیه

روش تولید شبکه ارائه شده بر اساس یک فرآیند تکرار به ساخت شبکه‌های مثلثی می‌پردازد. هر فرآیند تکرار نیاز به یک حدس اولیه دارد. حدس اولیه این روش یک شبکه اولیه است. شبکه اولیه یک شبکه درشت در هندسه مسئله است. شکل (۲) نمایی از شبکه اولیه تهیه شده در دامنه حوضه آبخیز سد دز شکل (۱) را نشان می‌دهد.

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

شبکه اولیه شکل (۲) دارای ۵۴۱ گره، ۱۰۴۱ ضلع و ۵۲۰ سلول مثلثی است. ویژگی شبکه اولیه تهیه شده آن است که تنها توسط گره‌های مرزی ساخته شده است. به عبارت دیگر، در ساخت این شبکه نیازی به استفاده از گره‌های داخلی نیست.

ماتریس‌های اتصالات شبکه

اهمیت ساخت شبکه اولیه علاوه بر استفاده به‌عنوان حدس اولیه روش تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی، در تهیه ماتریس‌های اتصالات شبکه نیز است. ماتریس‌های اتصالات شبکه شامل ماتریس‌های مبنا–ضلع و مبنا–سلول است. از این دو ماتریس به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شود تا تعداد عملیات‌های محاسباتی در فراخوانی اطلاعات شبکه کاهش یابد. ماتریس مبنا–ضلع شامل اطلاعات سلول‌های همسایه هر ضلع به همراه گره‌های تشکیل‌دهنده آن ضلع است. ماتریس اتصالات مبنا–سلول در برگیرنده اطلاعات ضلع‌های هر سلول به علاوه گره‌های سازنده آن سلول هست.

ماتریس‌های اتصالات مبنا–ضلع و مبنا–سلول به همراه ماتریس ذخیره اطلاعات گره‌های شبکه تشکیل یک پایگاه داده را می‌دهند. نمودار بلوک دیاگرام این پایگاه داده در شکل (۳) نشان داده شده است.

از ویژگی‌های پایگاه داده ارائه شده در کاهش حافظه موردنیاز کامپیوتر به منظور ذخیره اطلاعات شبکه است. چرا که در این پایگاه نیازی به ذخیره اطلاعات ضمنی شبکه مانند طول اضلاع و یا سطح سلول‌ها وجود ندارد. ویژگی دیگر پایگاه داده ارائه شده در کاهش تعداد عملیات‌های محاسباتی در یافتن اطلاعات شبکه است. به‌عنوان مثال برای یافتن لیست گره‌های یک سلول در پایگاه داده مورد استفاده تنها نیاز به سه عملیات محاسباتی است.

روش ریزسازی شبکه

روش ریزسازی شبکه در الگوریتم ارائه شده برمبنای یک فرآیند تکرار است. هر شبکه در الگوریتم ارائه شده محصول دنباله‌ای از ریزسازی شبکه اولیه طی چند حلقه تکرار است. به‌منظور ریزسازی شبکه در هر حلقه، ابتدا سلول‌های شبکه برمبنای اندازه سطح آن‌ها در یک صف مرتب می‌شوند. سپس بلندترین ضلع بزرگ‌ترین سلول صف انتخاب شده و یک گره جدید در میانه آن ضلع جاگذاری می‌شود. در ادامه این گره به گره‌های روبه‌روی آن گره در سلول‌های مجاور (طرفین) آن ضلع متصل می‌شود تا دو سلول جدید ساخته شود. اطلاعات گره‌های روبه‌رو و سلول‌های مجاور با استفاده از ماتریس‌های اتصالات استخراج می شوند. برای نمایش بهتر اجرای روش ریزسازی شبکه ارائه شده، یک مرحله ریزسازی شبکه اولیه شکل (۲) در شکل (۴) نشان داده شده است. در شکل (۴) مشاهده می‌شود با جاگذاری یک گره جدید، سلول‌های همسایه آن ضلع، هر یک به دو سلول تقسیم شده‌اند. بدین ترتیب، دو سلول جدید به تعداد کل سلول‌های شبکه اضافه می‌شود.

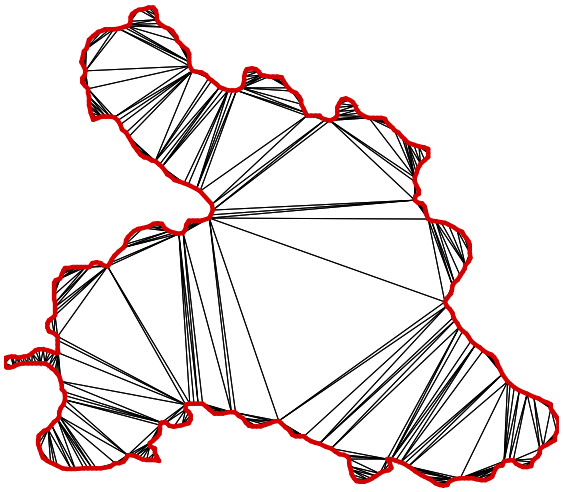


Fig. 2- Initial grid generated in Dez dam watershed
شکل۲- شبکه اولیه تولیدشده در دامنه حوضه آبخیز سد دز

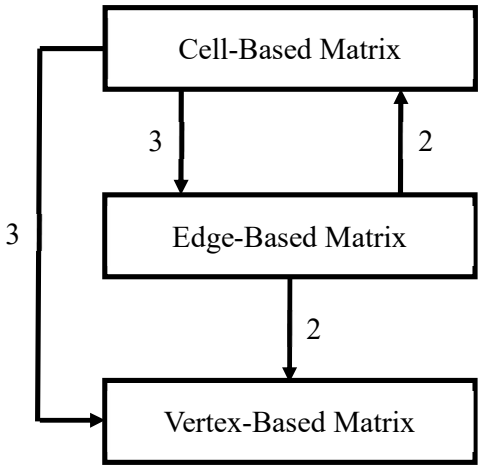


Fig. 3- Block diagram of grid data structure
شکل۳- بلوک دیاگرام پایگاه داده شبکه

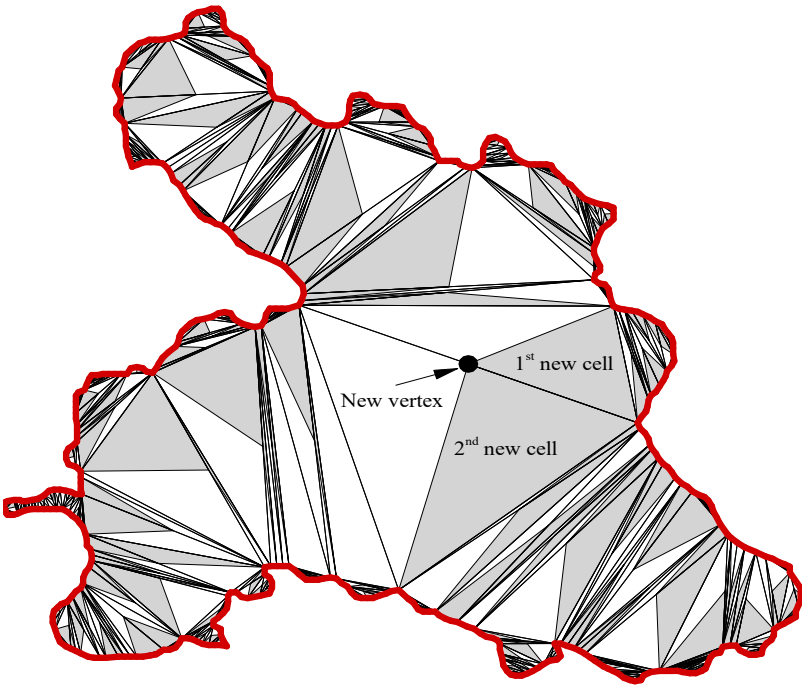


Fig. 4- One refinement stage of initial grid
شکل٤- یک مرحله ریزسازی شبکه اولیه

هاشورزدن سلول‌های جدید در شبکه شکل (۴) به‌منظور تمایز آن‌ها از سلول‌های شبکه اولیه است. با یک مرحله ریزسازی شبکه اولیه، تعداد ۴۱۳ سلول جدید به سلول‌های شبکه افزوده شده است. شبکه تولید شده در انتهای یک مرحله ریزسازی دارای ۷۴۸ گره، ۱۶۶۱ ضلع و ۹۳۳ سلول مثلثی است.

بهبود کیفیت شبکه

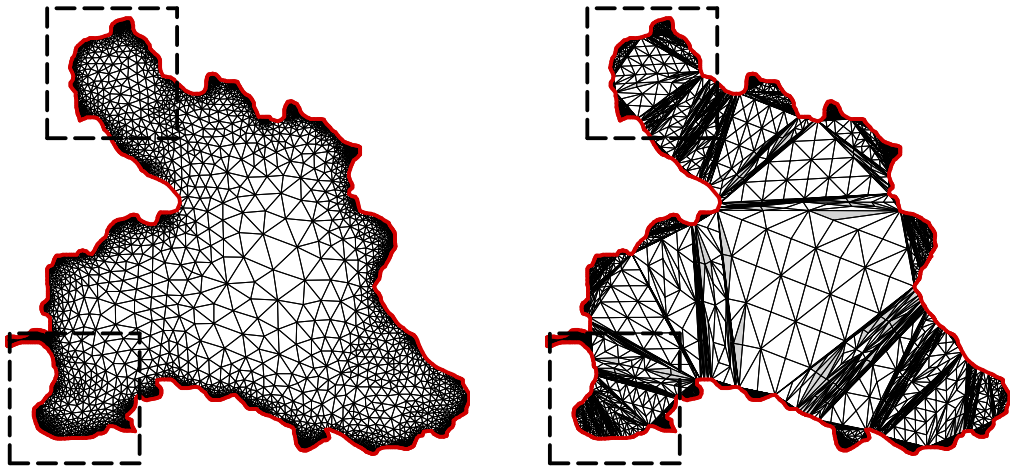
از دو الگوریتم بهبود کیفیت شبکه به‌منظور افزایش کیفیت نهایی شبکه‌های بی‌سازمان خروجی استفاده شده است (Bahrainian et al., 2015). اولین الگوریتم شامل روش تعویض ضلع است. روش تعویض ضلع دو سلول شبکه را حذف و آن‌ها را با دو سلول دیگر جایگزین می‌دارد. مجموع سطوح دو سلول جایگزین شده در این روش با مجموع دو سلول حذف شده برابر است. الگوریتم بهبود کیفیت دیگر شامل روش هموارسازی گره‌های شبکه است. روش هموارسازی بدون تغییر اتصالات (اضلاع) و تنها با جابه‌جایی موقعیت گره‌ها به بهبود کیفیت شبکه می‌پردازد. تصویری از شبکه نهایی تولید شده بدون و با استفاده از روش‌های بهبود کیفیت شبکه پس از پنج مرحله ریزسازی شبکه اولیه در شکل

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

(۵) نشان داده شده است. اطلاعات اندازه شبکه (تعداد گره‌ها، ضلع‌ها و سلول‌ها) و درصد تعداد سلول‌های با نسبت منظری (AR) کوچک‌تر از ۰/۳ در جدول (۲) خلاصه شده است. در اینجا، نسبت منظری به‌صورت طول کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین ضلع هر سلول تعریف شده است. سلول با $AR < ۰/۳$ ، چولیده نامیده می‌شود. به‌منظور سادگی در تشخیص، سلول‌های چولیده در شکل (۵) با هاشور خاکستری متمایز شده‌اند.

از مطالعه اطلاعات جدول (۲) نتیجه می‌شود که ۲۱/۵ درصد شبکه تولیدشده بدون استفاده از روش‌های بهبود کیفیت با سلول‌های چولیده پر شده است. این در حالی است که شبکه شکل (۵-ب) دارای سلول‌های مثلثی کاملا شبیه‌ترین به مثلث متساوی الاضلاع و بدون هیچ‌گونه سلول چولیده است. این ویژگی به‌واسطه استفاده از روش‌های بهبود کیفیت شبکه به‌دست آمده است. به‌منظور نمایش بهتر کیفیت سلول‌های مثلثی تولیدشده در شبکه‌های نهایی شکل (۵)، نمای بزرگ‌نمایی‌شده از سلول‌های واقع درون خط‌چین‌های گوشه‌های شمال غرب و جنوب غرب حوضه آبریز دو شبکه نهایی تولیدشده در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سلول‌های نمایش داده شده در شبکه تولیدشده شکل (۶-ب) بواسطه اعمال روش‌های بهبود کیفیت شبکه، شبیه‌ترین به مثلث‌های متساوی‌الاضلاع هستند. این در حالی است که در شبکه تولیدشده شکل (۶-الف) شامل سلول‌های چولیده می‌باشد که تأثیر منفی بر کیفیت شبکه و در نهایت کاهش دقت در محاسبه گرادیان‌های متغیرهای هیدرولیکی خواهند داشت.

به‌منظور مطالعه بیشتر کیفیت شبکه نهایی، به استخراج آماری توزیع زوایای میان اضلاع داخلی شبکه پرداخته شده است. این نتایج در شکل (۷) نشان داده شده‌اند. نتایج این شکل برای دو شبکه تولید شده بدون و با استفاده از روش‌های بهبود کیفیت نسبت به یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، زوایای داخلی میان اضلاع در شبکه نهایی تولیدشده بدون بهبود کیفیت دارای ۴۶ درصد زوایای تند کوچک‌تر از ۵۰ درجه و ۳۳/۴ درصد زوایای باز بزرگ‌تر ۷۰ درجه هستند. این مطلب بیان می‌دارد که حدود ۷۹/۴ درصد سلول‌های شبکه از نوع سلول‌های چولیده هستند. اما در شبکه نهایی تولید شده با بهبود کیفیت شبکه تعداد این زوایا بسیار کاهش یافته است. علاوه بر این، ۶۸/۴ درصد زوایای داخلی شبکه در بازه ۵۰ تا ۷۰ درجه هستند. به عبارت دیگر، حدود ۷۰ درصد سلول‌های شبکه، شبیه‌ترین به مثلث متساوی‌الاضلاع هستند.



(a) Without employing grid quality improvment (b) With employing qrid quality improvment

Fig. 5- Final grid output in Dez dam watershed without grid adaptation
شکل۵- شبکه نهایی تولید شده در حوضه آبخیز سد دز بدون تطبیق شبکه

جدول۲- اطلاعات شبکه‌های خروجی شکل (۵)

Table 2- Information of Fig. 5's output grids

Grid name	No. of Vertices	No. of Edges	No. of Cells	AR ≤ 0.3 (%)
Output grid without quality improvment	5550	15375	9845	21.5
Output grid with quality improvment	5618	15701	10103	ZERO

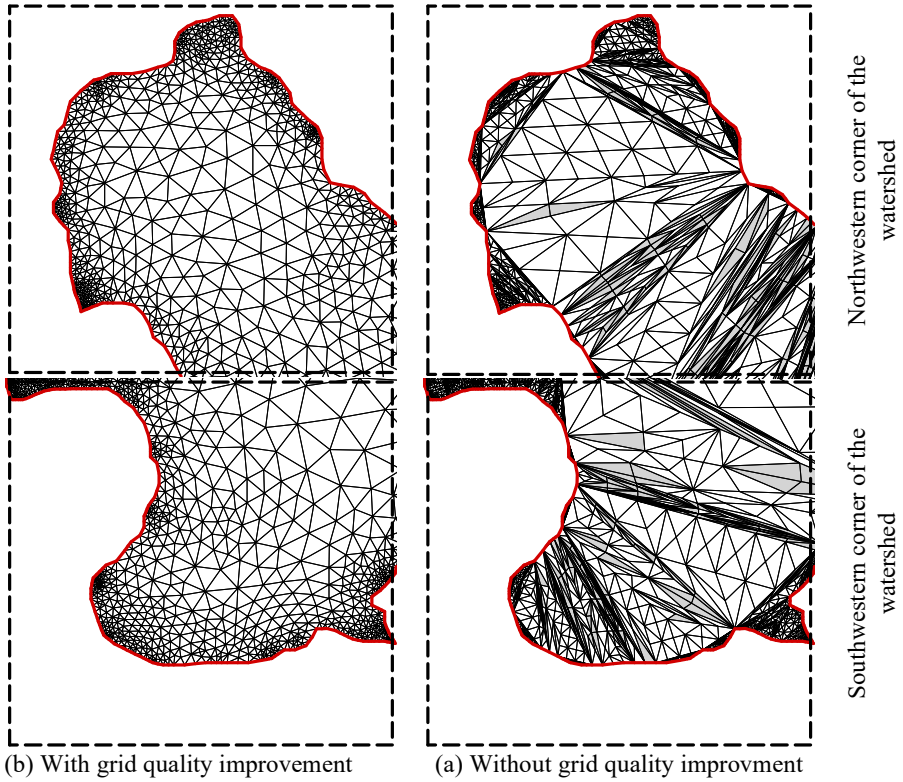


Fig. 6- Magnification view from dashed line corner of Fig. 5 final grid

شکل٦- نمای بزرگنمایی‌شده از شبکه‌های درون خط‌چین‌های شبکه‌های نهایی شکل (۵)

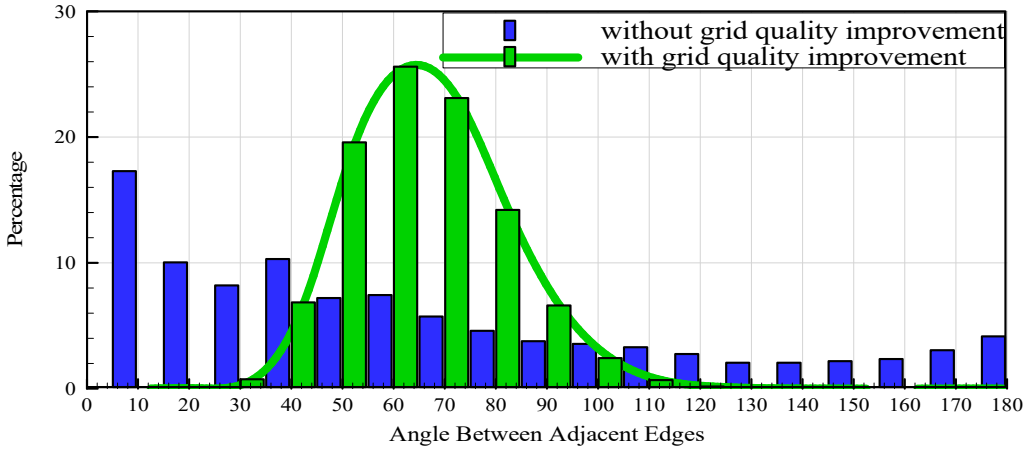


Fig 7- Distribution of interior angles between edges in the final grid

شکل۷- توزیع زوایای داخلی میان اضلاع در شبکه نهایی

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

تطبیق شبکه‌های مثلثی با استفاده از اطلاعات تولید رسوب

در این بخش روش تطبیق شبکه بر اساس اطلاعات تولید رسـوب ارائه شده است. اطلاعـات تولید رسوب توسط مدل فرسایش‌پذیری پسیاک برآورد می‌شوند. سپس از نتایج این مدل جهت توزیع گره‌های شبکه استفاده می‌شود.

مدل تولید رسوب پسیاک

در مدل پسیاک برای ارزیابی فرسایش‌پذیری و تولید رسوب سالانه یک حوضه آبریز از نه پارامتر استفاده می‌شود. این پارامترها شامل زمین‌شناسی، خاک‌شناسی، آب و هوا، رواناب، پستی و بلندی، پوشش زمین، کاربری اراضی، وضعیت فرسایش فعلی و فرسایش کانالی هستند. پارامترهای زمین‌شناسی، خاک، توپوگرافی، پوشش زمین و کاربری اراضی به عنوان پارامترهای طبیعی مرتبط با جغرافیای منطقه مطرح می‌شوند. این پارامترها به پارامتر آب و هوا یا بارندگی عکس‌العمل نشان داده و موجب توسعه فرآیند فرسایش خندقی و رودخانه‌ای می‌شوند. عکس‌العمل پارامترهای طبیعی مرتبط با جغرافیای منطقه در تقابل بارندگی با پارامترهای دیگر تحت عنوان رواناب و انتقال رسوب در کانال آبراهه بیان می‌شود.

هر یک از نه پارامتر مدل تولید رسوب پسیـاک با امتیازی بین صفـر تا ۱۵۰ امتیازدهی می‌شوند. پس از تعیین مقدار امتیاز هر یک از نه پارامتر و به دست آوردن مجموع امتیاز آن‌ها از جدول (۳) برای بـرآورد فرسایش‌پذیری و تولید رسوب در حوضـه آبخیـز استفاده می‌شود. شایان ذکر است که اندازه تولید رسوب در این مدل با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Pourali et al., 2008).

$$Q=38/77\ e(0/0353R) \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، R درجه رسوب‌دهی یعنی مجموع امتیاز نه پارامتر مدل تولید رسوب و فرسایش‌پذیری پسیاک است و Q رسوب سالانه بر حسب متر مکعب بر کیلومتر مربع می‌باشد.

اطلاعات تولید رسوب در حوضه آبخیز سد دز

نقشه نهایی اطلاعات تولید رسوب و فرسایش‌پذیری حاصل از جمع پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک در حوضه آبخیز سد دز در شکل (۸) نشان داده شده است. حداکثر مجموع امتیاز پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک در این حوضه برابر با ۱۴۷ بوده است. براساس اطلاعات این نقشه، تقریباً ۳۵ درصد حوضه آبخیز سد دز در زمره نواحی با فرسایش و تولید رسوب خیلی زیاد بوده است.

جدول۳- میزان رسوب و فرسایش در روش پسیاک (Pourali et al., 2008)

Table 3- Erosion value and sediment in PSIAC technique (Pourali et al., 2008)

Sediment Class	Intensity of Sedimentation	Sedimentation *M3/km2*	R-score of PSIAC Technique
V	Very High	1429>	100>
IV	High	1429 - 476	100 - 75
III	Average	476 - 238	75 - 50
II	Low	238 - 95	50 - 25
I	Very Low (Little)	95<	25 - 0

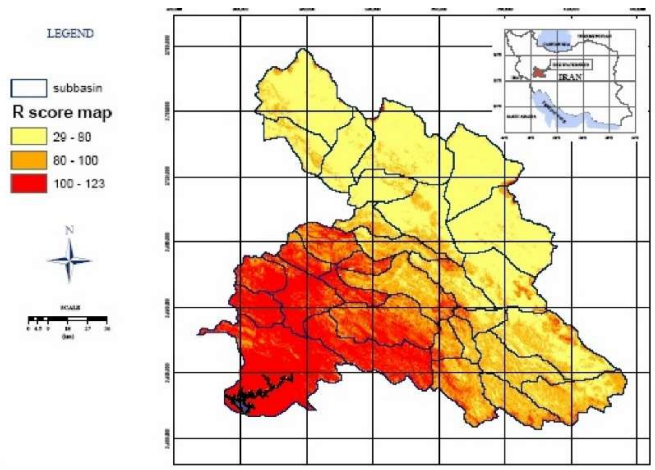


Fig 8- Final score map of erosion and sediment production from combination of PSIAC model's 9 parameters (Pourali et al., 2008)

شکل۸- نقشه امتیاز نهایی فرسایش و تولید رسوب حاصل از جمع پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک (Pourali et al., 2008)

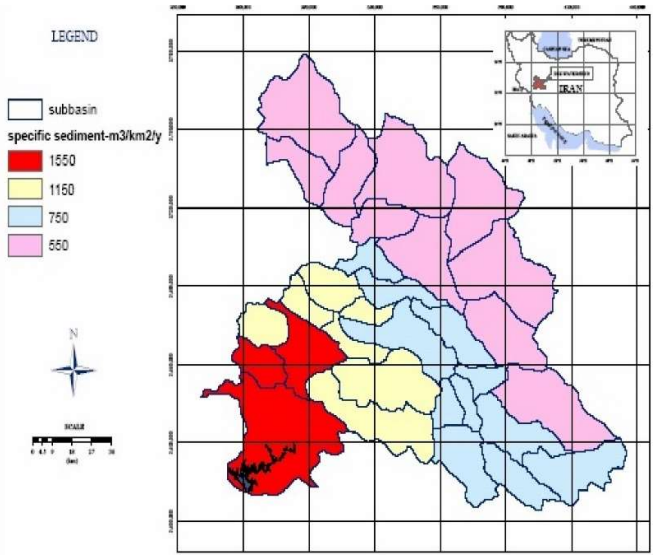


Fig 9- Final specific sediment map in Dez dam watershed (Pourali et al. 2008)

شکل۹- نقشه نهایی رسوب ویژه در حوضه آبخیز سد دز (Pourali et al., 2008)

مقدار برآورد اولیه تولید رسوب طبق رابطه (۱) حدود ۱۷۲۶۷۲۴۵ مترمکعب در سال در تمام اراضی حوضه آبخیز سد دز بوده است. این برآورد اولیه با استفاده از مقدار اندازه‌گیری شده رسوب در محل سد دز مقایسه و کالیبره شد. برای کالیبره نمودن رسوب، این مقدار برآورد اولیه بر عدد رسوب حاصل از بررسی مخزن سد دز تقسیم شد. عدد رسوب مخزن سد دز برابر با ۱۵/۳ میلیون مترمکعب در سال بوده است. نتیجه این کالیبراسیون تولید نقشه نهایی تولید رسوب ویژه، Q_s، در حوضه آبخیز سد دز بوده است. این نقشه در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، تولید رسوب ویژه در حوضه آبخیز سد دز به چهار ناحیه کلی تقسیم می‌شود. در ادامه از اطلاعات نقشه شکل فوق برای تطبیق توزیع گره‌های شبکه نهایی تولید شده در حوضه آبخیز سد دز استفاده شده است.

روش تطبیق شبکه

روش تطبیق شبکه به‌منظور مدیریت توزیع گره‌ها در سراسر شبکه است. بدین منظور از تعریف چشمه‌های ضلعی استفاده شده است. این چشمه به‌صورت خودکار حین فرآیند ریزسازی شبکه به مدیریت و کنترل طول مطلوب اضلاع سلول می‌پردازند. از طرف دیگر کنترل خودکار فرآیندریزسازی و اتمام این فرآیند توسط همین چشمه‌های ضلعی صورت می‌گیرد.

روش استفاده از چشمه‌های ضلعی بدین شکل است که این چشمه‌ها پیش از فرآیند جاگذاری گره جدید روی هر ضلع، طول آن

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

ضلع را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس چنانچه طول ضلع موردنظر بزرگتر از طول ضلع مطلوب در هر ناحیه از شبکه باشد، اجازه جاگذاری گره جدید را می‌دهند. نکته قابل توجه در تعریف طول ضلع مطلوب در هر ناحیه است. در این مقاله، شبکه بر حسب نقشه نهایی رسوب ویژه شکل (۹) دارای چهار ناحیه با طول اضلاع متفاوت باشد. نواحی موردنظر در شکل (۱۰) به‌صورت I، II، III و IV نام‌گذاری و نشان داده شده است. مقدار رسوب ویژه، Q_s، در این نواحی به‌ترتیب برابر با ۵۵۰، ۷۵۰، ۱۱۵۰ و ۱۵۵۰ مترمکعب بر کیلومترمربع در سال است. براین اساس، تعداد شش چشمه ضلعی، به‌صورت بردارهای S_1، S_2 و ... و S_6 بر شبکه اولیه شکل (۲) هر یک توسط دو مختصات مکانی تعریف می‌شود. موقعیت هندسی این چشمه‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. به‌منظور جاگذاری یک گره جدید بر روی یک ضلع شبکه، ابتدا فاصله عمودی آن گره، d، نسبت به هر یک از چشمه‌ها سنجیده می‌شود. با تعیین نزدیکترین چشمه، برای قرارگیری گره نسبت به آن چشمه با محاسبه علامت ضرب داخلی (S×r) تعیین می‌شود. براین اساس، جاگذاری هر گره جدید الزاما در یکی از چهار نواحی توزیع رسوب ویژه قرار خواهد گرفت. طول ضلع مطلوب، dl، در هر ناحیه به‌صورت ضریبی، α، از مقدار رسوب ویژه یعنی $dl = \alpha_i \times (Q_{s,\min}/Q_{si})$ به‌دست می‌آید که در آن $0 \le \alpha_i \le 1$ و i=I, II, III, IV است. قابل ذکر است که ضریب α_i می‌تواند برای هر چهار ناحیه مقدار دلخواه خود را داشته باشد و یا یک مقدار یکسان برای کلیه نواحی استفاده شود. در انتها، چنانچه طول بزرگترین ضلع انتخابی از طول ضلع مطلوب بزرگتر باشد، آنگاه الگوریتم ریزسازی شبکه اجازه اجرا پیدا خواهد کرد.

به‌منظور مطالعه اثر حساسیت ضریب طول ضلع مطلوب، نمایش چهار شبکه به ترتیب به ازای ۰/۰۹ ,۰/۰۷ ,۰/۰۵ ,۰/۰۳ = α در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، توزیع چگالی گره‌ها در سراسر شبکه به‌صورت ناهمگن در چهار ناحیه است. این ناهمگنی گره‌های شبکه به‌دلیل کنترل و مدیریت توزیع آن‌ها توسط چشمه‌های ضلعی می‌باشد. بر این اساس در شبکه نهایی تولید شده، چهار اندازه متفاوت از اضلاع شبکه قابل مشاهده است. اطلاعات اندازه شبکه‌های تولیدشده در جدول (۴) خلاصه شده است. کد تولید شبکه توسط نرم‌افزار FORTRAN برنامه‌نویسی شده است. سخت‌افزار مورد استفاده شامل یک پردازنده دوهسته‌ای ۲/۸ گیگاهرتزی و حافظه کوتاه مدت دو گیگابایتی بوده است.

به‌منظور مطالعه بیشتر شبکه‌های شکل (۱۱)، فرآیند ریزسازی شبکه به ازای هر یک از ضرایب مورداستفاده در تعریف چشمه‌های ضلعی در شکل (۱۲) نمودار شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، فرآیند تولید سلول (ریزسازی شبکه) در مراحل ۱۲، ۱۱، ۹ و ۷ به‌ترتیب به ازای α برابر با ۰/۰۳، ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۹ خاتمه پیدا کرده است. این موضوع به دلیل محدودیتی است که توسط چشمه‌های ضلعی ایجاد می‌شود و خاتمه فرآیند ریزسازی شبکه به‌صورت خودکار شکل می‌گیرد.

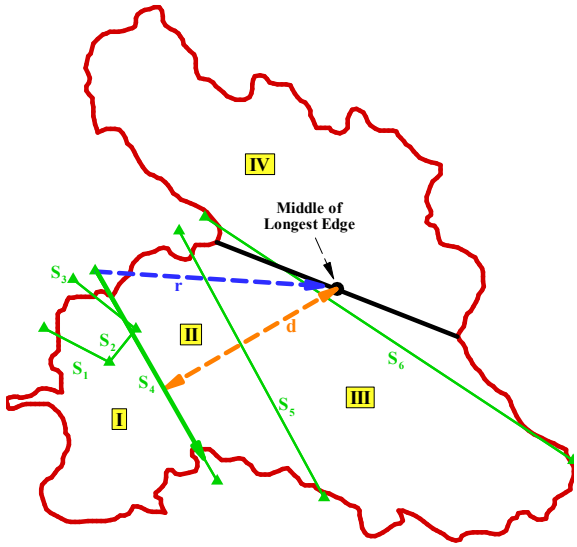
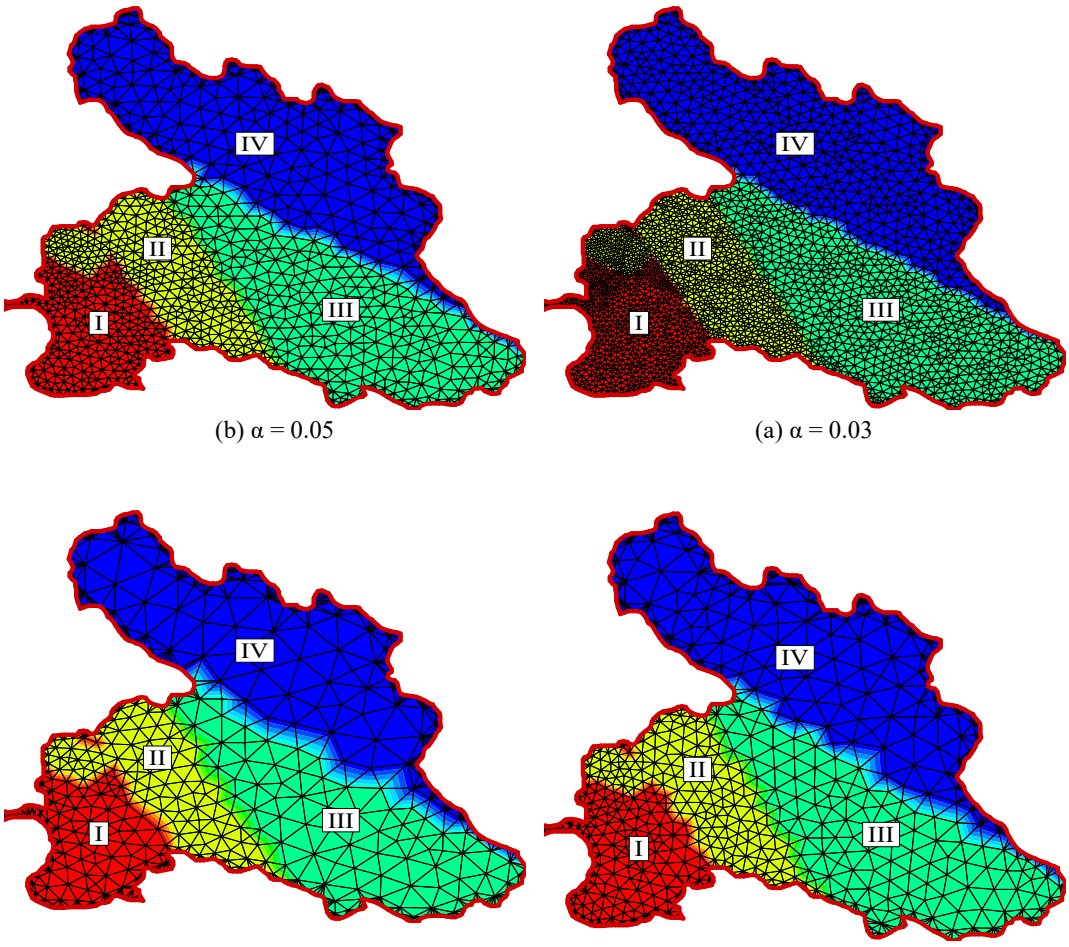


Fig. 10- Location of the edge sources defined on the map of Dez dam watershed
شکل ۱۰- جانمایی چشمه‌های ضلعی تعریف‌شده بر نقشه حوضه آبخیز سد دز



(b) α = 0.05 (a) α = 0.03

(d) α = 0.09 (c) α = 0.07

Fig. 11- Output adaptive grids in Dez dam watershed based on the Fig. 9 sediment information

شکل۱۱- شبکه‌های تطبیقی خروجی در حوضه آبخیز سد دز براساس اطلاعات رسوب شکل (۹)

جدول٤- اطلاعات شبکه‌های خروجی شکل (۱۱)

Table 4- Information of Fig. 11's output grids

α	No. of Vertices	No. of Edges	No. of Cells	CPU Time (s)
0.03	2963	8305	5362	0.93
0.05	1445	3753	2328	0.88
0.07	1022	2484	1482	0.81
0.09	856	1986	1150	0.74

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

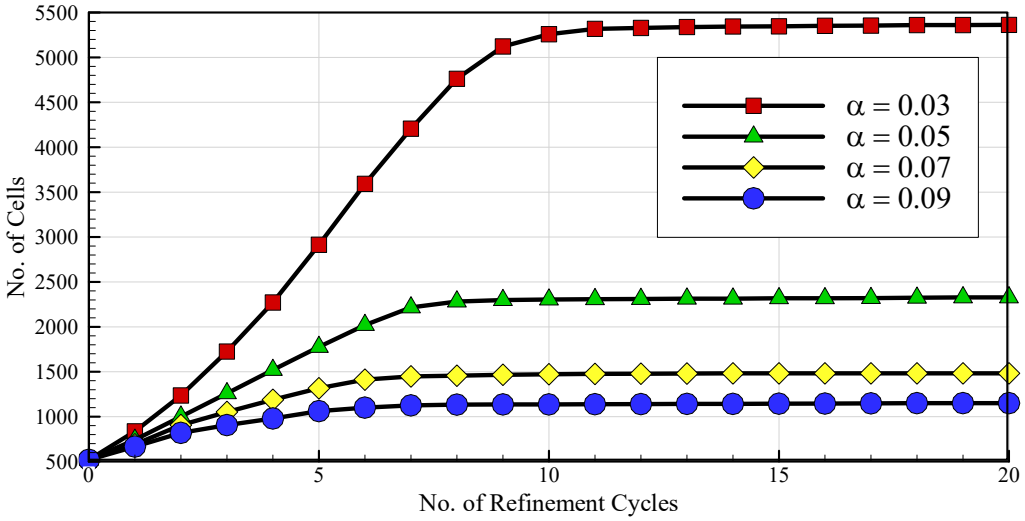


Fig. 12- Refinement procedure of the Fig. 11's adaptive grids
شکل۱۲- فرآیند ریزسازی شبکه‌های تطبیقی شکل (۱۱)

نتیجه‌گیری

لزوم اهمیت دادن به منابع آبی کشور ایجاب می‌کند تا از مخازن طبیعی نگهداری آب‌های شیرین مانند سدها محافظت بیشتری شود. در این مقاله، به تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی بر اساس اطلاعات رسوب به‌دست آمده از نقشه فرسایش و رسوب حوضه آبخیز سد دز پرداخته شده است. الگوریتم تولید شبکه ارائه شده براساس یک شبکه اولیه درشت شروع به ریزسازی شبکه می‌کند. شبکه اولیه مورد استفاده در هندسه حوضه آبخیز سد دز دارای ۵۴۱ گره، ۱۰۴۱ ضلع و ۵۲۰ سلول مثلثی است. لازم به اشاره است که در ساخت این شبکه تنها از گره‌های مرزی هندسه استفاده شده است.

فرآیند ریزسازی شبکه به‌صورت تکرار بوده است. در ریزسازی سلول‌های شبکه به‌طور همزمان از روش‌های جاگذاری گره و تقسیم سلول استفاده شده است. به‌منظور افزایش سرعت فراخوانی اطلاعات شبکه حین ریزسازی شبکه از پایگاه داده‌ای با ماتریس‌های مبنا- ضلع و مبنا- سلول استفاده شده است. مزیت به‌کارگیری این پایگاه داده در پایین بودن تعداد عملیات‌های محاسباتی برای استخراج اطلاعات هر المان (گره، ضلع و سلول) شبکه است.

افزایش کیفیت شبکه نهایی تولید شده از دیگر گزینه‌هایی است که در الگوریتم تولید شبکه ارائه شده مورد توجه قرار گرفته است. دو روش تعویض ضلع و هموارسازی گره‌های شبکه به‌منظور بهبود کیفیت شبکه در این الگوریتم انتخاب شده‌اند. اثر استفاده از روش‌های بهبود کیفیت شبکه طی یک مطالعه آماری میان دو شبکه نهایی تولید شده بدون بهبود کیفیت و با بهبود کیفیت شبکه مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقایسه نشان داده شد که در شبکه تولید شده بدون بهبود کیفیت بیش از نیمی از سلول‌های شبکه از نوع سلول‌های چولیده و با کیفیت ظاهری بسیار پایین بوده‌اند. این در حالی است که در شبکه نهایی تولید شده با بهبود کیفیت شبکه، حدود ۷۰ درصد سلول‌های شبکه شبیه‌ترین به مثلث متساوی‌الاضلاع بوده‌اند. علاوه براین به طور کامل از تولید و خلق سلول‌های چولیده در شبکه نهایی جلوگیری به عمل آورده شده است.

در فرآیند تولید شبکه‌های بی‌سازمان مثلثی در حوضه آبخیز سد دز به تطبیق توزیع گره‌های شبکه بر اساس خصوصیات فرسایش و رسوب در آن حوضه نیز پرداخته شده است. بدین منظور از تعریف چشمه‌های ضلعی استفاده شده است. این چشمه‌ها به‌صورت خودکار به کنترل ادامه و یا توقف فرآیند ریزسازی می‌پردازند. علاوه‌براین به مدیریت توزیع گره‌های شبکه در نواحی مختلف شبکه براساس اطلاعات توزیع فرسایش نیز می‌پردازند. در این تحقیق از اطلاعات توزیع فرسایش به‌دست آمده از مدل پسیاک استفاده شده است. سپس این اطلاعات به الگوریتم تولید شبکه داده شد تا برمبنای آن‌ها به محاسبه اندازه طول اضلاع شبکه در نواحی مختلف آن پرداخته شود. الگوریتم تولید شبکه ارائه شده در کمتر از یک ثانیه به تولید شبکه خروجی می‌پردازد.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

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

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

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.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در طول تهیه این مقاله، تا حد کمی از ابزارهای هوش مصنوعی برای اصلاح زبان، اصلاح دستور زبان و واضح‌تر کردن برخی جملات استفاده کردند. هیچ ابزار هوش مصنوعی برای ایجاد داده‌ها، انجام تجزیه و تحلیل‌ها، تولید نتایج و ارائه تفسیرها یا فهرست منابع استفاده نشده است. هر بخش از محتوا با دقت توسط نویسندگان بررسی، تأیید و مورد توافق قرار گرفت. نویسندگان کاملاً مسئول صحت و صداقت مقاله هستند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: علیرضا دنه‌دزفولی، نگارش، بررسی و ویرایش، نگارش پیش‌نویس اصلی، اعتبارسنجی، مدیریت پروژه، روش‌شناسی.

نویسنده دوم: سیدسعید بحرینیان، نگارش، بررسی و ویرایش، مدیریت پروژه.

تقدیر و تشکر

این مقاله فاقد تقدیر و تشکر است.

References

1- Bahrainian, S.S., Daneh-Dezfuli, A., Noghrehabadi, A. 2015. Unstructured grid generation in porous domains for flow simulations with discrete-fracture network model, *Transport in Porous Media 109*: pp. 693-709.

2- Baker, T.J. 1989. Automatic mesh generation for complex three-dimensional regions using a constrained delaunay triangulation. *Engineering with Computers, 5*(3-4). pp. 161-175. Doi: 10.1007/BF02274210

3- Bowyer, A. 1981. Computing Dirichlet tessellations. *Computer Journal, 24*(2). pp.162-166. Doi: 10.1093/comjnl/24.2.162

4- Chew, L.P. 1989. Constrained Delaunay triangulation. *Algorithmica, 4*(1). pp. 97-108. Doi: 10.1145/41958.41981

5- Daneh-Dezfuli, A. and Bahrainian, S.S. 2014. A grid generation algorithm for reservoir domains with discrete fracture networks. *International Journal of Oil, Gas & Coal Technology, 8*(4). pp. 417-431. Doi: 10.1504/IJOGCT.2014.066303

6- Delaunay, B. 1934. Sur la Sphère Vide, A la Mémoire de Georges Voronoi. Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des sciences mathématiques et na, issue 6, pp. 793–800 (In French).

7- Dirichlet, G.L. 1850. Über die Reduktion der positiven quadratischen Formen mid drei unbestimmten ganzen Zahlen. *Journal für die reine und angewandte Mathematik, 40*. 209-227 (In French). Doi: 10.1515/crll.1850.40.209

8- Imai, K. 2000. Structures of triangulations of points. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E83-D(3). 428-437.

9- Löhner, R. 1988. Some useful data structures for the generation of unstructured grids. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 4*(1). 123-135. Doi: 10.1002/cnm.1630040116

10- Pirzadeh, S. 1992. Recent progree in unstructured grid generation. *30th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 92-0445, Reno, NV*. Doi: 10.2514/6.1992-445

11- Pourali, S.H., Matkan, A.A. and Hosseini-Asl, A. 2008. Preparing the map of erosion hazard and sedimentation in Dez watershed by remote sensing and GIS. *Environmental Sciences, 8*(1). 83-100.

DOI: 10.22055/jise.2025.45666.2112

12- Rebay, S. 1993. Efficient Unstructured Mesh Generation by Mean of Delaunay Triangulation and Bowyer-Watson Algorithm, *Journal of Computational Physics 106*(1). pp. 125-138.

13- Sloan, S.W. and Houlsby, G.T. 1984. An implemenstation of Watson's algorithm for computing 2-dimensional Delaunay triangulations. *Advances in Engineering Software, 6*(4). 192-197.

14- Spragle, G.S., McGrory, W.R., and Fang, J. 1991. Comparison of 2D unstructured grid generation techniques. 20th AIAA Aerospace Sciences Meeting, *AIAA Paper 91-0726, Reno, NV*. Doi: 10.2514/6.1991-726

15- Voronoi, G.F. 1908. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. *Journal für die reine und angewandte Mathematik, 134*. 198-287 (In French). Doi: 10.1515/crll.1908.134.198

16- Watson, D.F. 1981. Computing the n-dimensional tessellation with application to voronoi polytopes. *Computer Journal, 24*(2). 167-172. Doi: 10.1093/comjnl/24.2.167

17- Weatherill, N.P. 1988. A method for generating irrigular computational grids in multiply connected planar domains. *International Journal for Numerical Methods in Fluids, 8*(2). 181-197. Doi: 10.1002/fld.1650080206

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 51-72

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

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of the accuracy of LarsWG models and precipitation forecasting in the Karkheh Basin

M. AryaSadr[1] and D. Rahimi[2]*

1- Ph.D. Graduate of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Corresponding Author, Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran (d.rahimi@geo.ui.ac.ir)*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 18 January 2025
Revised: 2 June 2025
Accepted: 30 June 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Estimator Converter, Validation, Karkheh catchment, Global Warming.

TO CITE THIS ARTICLE:

Aryasadr, M., Rahimi, D. 2026. 'Evaluation of the accuracy of LarsWG models and precipitation forecasting in the Karkheh Basin', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 51-72. doi: 10.22055/jise.2025.48808.2153.

Abstract

Recent droughts have significantly reduced river discharge and increased the vulnerability of water resources, making reliable precipitation projections under climate change essential for sustainable water resources management. However, climate simulations are inherently uncertain, and evaluating model performance is a prerequisite for producing reliable future projections. This study aimed to identify the most accurate climate models for simulating precipitation and to assess future precipitation changes in the Karkheh River Basin, Iran. Daily precipitation records from three representative weather stations located in the upstream (Kermanshah), middle (Khorramabad), and downstream (Bostan) sections of the basin were analyzed for the baseline period (1991–2021) using the LARS-WG8 weather generator and outputs from multiple CMIP6 global climate models. Model performance was evaluated using the correlation coefficient (r), Root Mean Square Error (RMSE), and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), and precipitation was projected for the period 2021–2100 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. The results showed that ACCESS-ESM1 consistently achieved the highest performance across all stations, while CNRM-CM6-1, GFDL-ESM4, and MRI-ESM2-0 also demonstrated high predictive accuracy. Future projections indicate considerable spatial and temporal variability in precipitation, with generally increasing precipitation in parts of the central basin but declining trends in the upstream and downstream regions under most scenarios. The observed north-to-south precipitation gradient is expected to persist, while drought frequency and severity are projected to increase, particularly in the northwestern and southern parts of the basin. These findings provide valuable information for climate adaptation planning and sustainable water resources management in the Karkheh River Basin.

Introduction

The Karkheh catchment, which includes more than half of the provinces of Lorestan and Kermanshah and parts of the provinces of Kurdistan, Hamadan, Ilam, and Khuzestan, Its area is 50,768 square

kilometers, of which 17,094 square kilometers are occupied by plains and foothills, and the rest by highlands. In this catchment, precipitation is one of the climatic parameters whose spatial and temporal variability is noteworthy. The average rainfall in the northern part is 300 to 650 millimeters, while the southern part has an average rainfall of 180 to 300 millimeters; precipitation directly affects water resources. Under the influence of global warming, two-thirds of the world's population will face water stress by 2025 (Mahato et al., 2022). Therefore, predicting precipitation changes for future water resource management in light of climate change is a challenge. The aim of the present study is to evaluate the accuracy of the best model in estimating precipitation and predicting changes in precipitation in the Karkheh River catchment. The accuracy of models is one of the most important stages in predicting random data and the uncertainty of models.The results of the studies indicated that in Sari, the ACCESS-CM2 model has high accuracy in predicting precipitation and temperature. According to this model, temperature and precipitation will increase (Roshani and Hamidi, 2021). At the Tangab station in Fars Province, the NCARCCSM3, GFDLCM2.1, and INMCM3 models have the highest accuracy and weight in modeling precipitation and temperature (Ajam Zadeh and Mollaeinia, 2016). The results of the studies by Jahangir et al. (2020) indicated that precipitation in the Hamdideh stations of Islamabad-e Gharb, Bastan, Ravansar, and Malayer will increase, while in Kangavar it will decrease, and in Khorramabad, it will increase in the A2 scenario (realistic) and decrease in the A1B (pessimistic) and A1 scenarios. The results of researchers' studies showed that in different regions, a specific GCM model cannot be used uniformly. Furthermore, climate data simulations always have uncertainties, and ignoring them negatively affects the accuracy of the results; therefore, the use of models that can accurately forecast the effects of climate change is essential, as it is experiencing significant changes in precipitation patterns due to climate change. The study aims to evaluate the accuracy of different models in predicting rainfall changes, which is crucial for effective water resource management in the region.

Methodology

For the research, daily precipitation data from 1991-2021 was used as the observational period, and the output of the LARSWG8 estimator based on the scenarios of the Sixth Assessment Report in the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios for the years 2021-2040 was used as the future period. Based on observational data from 1991-2021, at each station representing the upstream, midstream, and downstream of the catchment, precipitation changes on monthly, seasonal, and annual scales were projected for the future period of 2021-2040. Finally, the frequency and probability of drought occurrence in the future were calculated based on the Standardized Precipitation Index (SPI). To determine the uncertainty and accuracy of the models, the indices R, RMSE, and NRMSE were used.

LARS-WG8

A micro-scale weather generator known for its high resolution and ability to simulate daily precipitation and temperature. LARS-WG8 is designed to generate weather data at a local scale, making it suitable for regional climate studies. The specifications of the models of this converter are listed in Table (1).

Table 1- Specifications of the models LarsWG8

Model name	Separation	Institute	Country
ACCESS-ESM1-5	1.875×1.25	Simulator of the Australian Community Climate and Earth System	Australia
CNRM-CM6-1	2.8 × 2.8	National Center for Meteorological Research	France
GFDL-ESM4	1.25 × 1.00	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	America
HadGEM3-GC31-LL	1.88 × 1.25	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, Devon, United Kingdom	England
MRI-ESM2-0	1.13 × 1.12	Institute of Meteorological Research for Earth System Models	Japan
MPI-ESM1-2-LR	~1.8 × 1.8	Max Planck Institute for Meteor	Japan, Germany, and South Korea

Source: (Nguyen-Duy et al., 2023)

Results and Discussion

1. The models predict varying trends in rainfall for the period 2021-2040:

1-1- Kermanshah: Expected to see a decrease in rainfall under optimistic and pessimistic scenarios, with an increase in the realistic scenario.

1-2- Khorramabad: Predicted increases in rainfall under optimistic and realistic scenarios, with a decrease in the pessimistic scenario.

1-3- Bostan: Forecasts indicate a decrease in rainfall across all scenarios, highlighting the potential for increased drought conditions.

According to the findings, the probability of drought occurrence during the observational period in Kermanshah was 54.8%, in Khorramabad 64.5%, and in Bastan 48.4%. The probability of drought occurrence during the 2021-2040 period in Kermanshah will be 55-60%, in Khorramabad 35-40%, and in Bastan 35-45%. The probability of drought occurring is higher at Kermanshah station.

2. Assessing the accuracy of the best model:

2-1- ACCESS-ESM1: This model demonstrated high accuracy in predicting future rainfall at Kermanshah and Bostan stations. It achieved excellent RMSE values (less than 10) in various scenarios, indicating its reliability for future rainfall predictions.

2-2- GFDL-ESM4: GFDL-ESM4 was particularly effective at Khorramabad, showing good predictive capabilities across different scenarios. The model's RMSE values were categorized as good (10-20) in realistic and pessimistic scenarios, making it a viable option for rainfall forecasting.

2-3- CNRM-CM6-1: Best for Bostan: This model was identified as the most accurate for predicting rainfall at Bostan station, with strong correlations to observed data.

2-4- HadGEM3-GC31-LL: Generally performed poorly across all stations, often overestimating rainfall. The accuracy of this model is poor with RMSE (16-22).

The results of this research are in line with the findings of the studies by Roshani and Hamidi (2021), Ajam Zadeh and Mollaeinia (2024), and Jahangir et al. (2020).

Conclusions

The evaluation of rainfall forecasting models in the Karkheh catchment reveals that in the observational period, the northern part of the Karkheh catchment is rainy, while the southern part is less rainy. In the future period, the occurrence of drought in the northwestern and southern regions of the catchment will increase and ACCESS-ESM1, CNRM-CM6-1, and GFDL-ESM4 are the most reliable for predicting future rainfall at the Kermanshah, Khorramabad, and Bostan stations. Based on the realistic scenario (SSP2-4.5) and according to the RMSE index, the accuracy of the models at the Kermanshah station is 8.5, 11.7, and 13.3, respectively; at the Khorramabad station, 12.5, 10.2, and 12, respectively; and at the Bastan station, 5.9, 4.6, and 5.6, respectively. Each model exhibits unique strengths, with LARS-WG8 being particularly effective in local-scale predictions. The findings underscore the importance of using multiple models to account for uncertainties in climate data and improve the accuracy of future rainfall forecasts.
There is no long-term, common statistical data to select a larger number of stations, faced with site access restrictions.

This literature review highlights the critical role of model selection in climate studies, particularly in regions vulnerable to climate change impacts. Further research is recommended to enhance model accuracy and adapt water resource management strategies accordingly.

Conflict of Interest

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

Funding

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

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Author Contributions

First Author: Maryam Arya Sadr, She contributed to data collection, questionnaire administration, and field investigations. She also prepared the initial draft of the manuscript and incorporated the revisions and corrections suggested by the academic supervisor.

Second Author: Dariush Rahimi, The initial research idea and formulation of the research problem were developed by the corresponding author. She/he also contributed to the calculations, analysis and interpretation of the results, as well as the scientific editing and revision of the manuscript and incorporation of the final revisions.

Acknowledgment

Appreciates are extended to the Ministry of Energy (Iran) for data providing and the Vice Chancellor for Research and Technology at the University of Isfahan for the financial support.

Reference

1- Ajam Zadeh, A., Mollaeinia, M. 2016. 'Assessment of Impact of Climate Change on Firoozabad River Runoff with Downscaling of Atmospheric Circulation Models Output by SDSM and LARS-WG Softwares', Iran-Water Resources Research, 12(1), pp. 95-109. SID. https://sid.ir/paper/100449/fa (In Persian).

2- Jahangir, M. H., Asadi, A., Noroozi, E., Talei, M. 2020. 'Forecasting of Precipitation in Karkheh Catchment Area through LARS-WG Model', *Journal of Ecohydrology*, 7(4), pp. 981-992. doi: 10.22059/IJE.2020.302480.1328.

3- Mahato, A., Upadhyay, S. and Sharma, D., 2022. Global water scarcity due to climate change and its conservation strategies with special reference to India: a review. Plant Archives (09725210), 22(1). http://dx.doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2022.v22.no1.009.

4- Nguyen-Duy, T., Ngo-Duc, T. and Desmet, Q., 2023. Performance evaluation and ranking of CMIP6 global climate models over Vietnam. Journal of Water and Climate Change, 14(6), pp.1831-1846. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.454.

5- Roshani, A., and Mehdi, H., 2021. Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature and precipitation based on CMIP6 models (case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), pp. 781-795. 10.22059/JWIM.2022.330603.920 (In Persian)

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۷۲-۵۱

ارزیابی دقت مدل‌های مولد LarsWG و پیش بینی بارش در حوضه آبریز کرخه

مریم آریاصدر[۱] و داریوش رحیمی[۲*]

۱-دانش آموخته دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران (d.rahimi@geo.ui.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

از پیامدهای خشکسالی‌های اخیر، کاهش جریان رودخانه و افزایش آسیب‌پذیری منابع آب بوده است. از این رو، پیش‌بینی تغییرات بارش به‌منظور مدیریت منابع آب در آینده با توجه به تغییراقلیم یک چالش است؛ ارزیابی دقت مدل‌ها، از مهم‌ترین مراحل پیش‌بینی داده‌های تصادفی است. مدل‌سازی داده‌های اقلیمی همواره دارای عدم قطعیت هستند و نادیده گرفتن آن، بر صحت نتایج اثر منفی دارد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی دقت بهترین مدل در برآورد بارش و پیش‌بینی تغییرات بارش در حوضه آبریز کرخه است. از این رو، از داده‌های روزانه‌ی بارش ایستگاه‌های همدید در سراب (کرمانشاه)، میان آب (خرم آباد) و پایاب (بستان) در دوره‌ی پایه ۲۰۲۱-۱۹۹۱ بر اساس خروجی مولد ریزمقیاس LarsWG8 استفاده شد. برای تعیین میزان عدم قطعیت مدل‌ها نیز از شاخص‌های r, RMSE, NRMSE استفاده و میزان بارش در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ پیش‌نگری شد. نتایج نشان داد علاوه بر مدل ACCESS-ESM1 در هر سه ایستگاه، مدل‌های CNRM-CM6-1، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 بالاترین دقت را در پیش‌بینی بارش دارند. بر اساس سناریوی واقع‌بینانه (SSP2-4.5) و بر اساس شاخص RMSE دقت مدل‌ها در کرمانشاه به‌ترتیب ۸.۵، ۱۱.۷، ۱۳.۳ و ۹.۷، در خرم آباد ۱۲/۵، ۱۰/۲، ۱۲ و ۹/٤ و در بستان ۵/۹، ٤/٦، ٥/٦و ۷ است. بررسی دوره‌ی آتی در قالب چهار دوره‌ی ۲۰ ساله انجام شد. تغییرات بارش دوره نخست (۲۰٤۰-۲۰۲۱)، در ایستگاه کرمانشاه کاهش ۳٤/۹ میلی‌متری در سناریوی SSP1-2.6، افزایش ٤/۱ میلی‌متری در سناریوی SSP2-4.5 و کاهش ٦/٥ میلی‌متری در سناریوی SSP5-8.5 خواهد داشت، در ایستگاه خرم آباد در سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 به‌ترتیب ۳/۸ و ٤۲/٥ میلی‌متر افزایشی و در سناریوی SSP5-8.5 35.5 میلی‌متر کاهشی و در ایستگاه بستان در سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ۱۷/۰۷، ٤/۰٤و ۰/۳ میلی‌متر کاهشی خواهد بود، در دوره مشاهداتی بخش شمالی حوضه کرخه، پر بارش و بخش جنوبی کم بارش است. در دوره آتی وقوع خشکسالی در نواحی شمال غرب و جنوب حوضه افزایش خواهد یافت.

کلید واژه‌ها: حوضه آبریز کرخه، مبدل برآوردگر، صحت‌سنجی، گرمایش جهانی، پیش نگری.

مقدمه

طبق گزارش IPCC (2022) گرمایش زمین و افزایش تبخیر به‌دلیل افزایش مصرف CO_2 است. گرمایش جهانی به‌عنوان یک بازخورد اقلیمی باعث ذوب تدریجی یخچال قطبی شده است. همچنین افزایش دما با تغییر ضخامت جو، تغییر میزان رطوبت، و الگوی گردش عمومی جو باعث تغییر زمانی- مکانی بارش شده است. نتایج مطالعه Eskani (2017) نشان داد میانگین دمای زمین تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۱/۱ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و با کاهش ۲۰ درصدی در بارش منطقه خاورمیانه، تنش آبی ایجاد می‌شود (Khosravi et al., 2010). در جهت پیشبرد اهداف مدیریت ریسک، پیش‌بینی وضعیت اقلیمی در آینده حائز اهمیت است. برای انجام پیش‌نگری از مدل‌های CMIP6 و مولد ریزمقیاس LarsWG به‌دلیل وضوح بالا در مقیاس منطقه‌ای استفاده می‌شود. اغلب این مدل‌ها، دقت ضعیفی برای شبیه‌سازی بارش، به‌ویژه در مقیاس فصلی دارند در صورتی که در شبیه‌سازی دما نسبت به بارش بهتر عمل می کنند. ریز مقیاس‌نمایی منطقه‌ای خروجی‌های GCM اغلب با استفاده از مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای (RCMs) برای دست‌یابی به وضوح فضایی بالاتر انجام می‌شود، که برای ثبت ویژگی‌ها و تنوع آب و هوای محلی ضروری است (Xie et al., 2024; Bucchignani et al., 2016). این فرآیند کاهش مقیاس، دقت شبیه‌سازی آب و هوا را به‌ویژه در نمایش رویدادهای آب و هوایی شدید و پدیده‌های اقلیمی منطقه‌ای بهبود می‌بخشد (Almazroui et al., 2016). مطالعه‌های بسیاری در خصوص کارایی مدل های CMIP6 و مولد ریزمقیاس LarsWG در جهان و ایران انجام شده است: یافته‌های صحت

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

سنجی مدل‌های جفت شده‌ی مرحله شش (CMIP6) نشان داد عملکرد شاخص‌ها متفاوت بوده و بارش در حوضه رودخانه پیرل چین افزایش خواهد یافت (He et al., 2023). این شرایط در حوضه رودخانه ایشیکاری ژاپن نشان داد مدل‌هایMIROC6 و MRI-ESM-2.0ارتباط معنی داری با دما و عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی بارش دارند به‌طوری که بارندگی کاهش بیشتری در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP1-1.9 خواهد داشت (Peng et al., 2023). پیش‌بینی خشکسالی جنوب آسیا در دوره‌های آتی با روش متوسط مجموع چند مدلی ازCMIP6 نشان داد بخش شمال غرب محدوده مطالعاتی آسیب‌پذیرترین بخش در مقابل خشکسالی است (Zhai et al., 2020). شبیه‌سازی داده‌های بارش شدید در همه مدل‌های CMIP6 به‌طور یکسان انجام نمی‌شود از لحاظ فضایی در شبیه‌سازی بارندگی شدید حوضه رودخانه آواش، مدل GFDL-ESM4 مقادیر مدل‌سازی بارش را بسیار زیاد، مدل ACCESS-ESM1-5 مقادیر برآوردی را بسیار کم و مدل MIDROC6 شبیه‌سازی بارش شدید را به خوبی نشان داده است (Sime and Dibaba, 2023). در شبیه‌سازی الگوهای فضایی میانگین حداکثر و حداقل دما و بارش موسمی و سالانه در پاکستان مدل‌های NORESM1-M، MIROC5، BCC-CSM1-1 و ACCESS1-3 بهترین مدل GCM بوده و نسبت به بارش، مدل‌سازی دما بالاترین شباهت را با داده‌های مشاهداتی داشته است (Ahmed et al., 2019). نتایج مدل‌سازی بارش حوضه رودخانه بار نشان داد، مدل‌های GFDL-CM4, INM-CM5-0 و INM-CM4-8 بهترین مدل‌ها از خروجی مدل CMIP6 بوده و بارش سالانه افزایش شش درصد تحت سناریوی SSP2-4.5 و ۱۶/۴۶ درصد تحت سناریوی-SSP5 8.5خواهد داشت (Gebisa et al., 2023). نتایج مدل‌سازی بارش در کوه‌های قلیان چین، نشان داد همه‌ی ۲۱ مدل از سری مدل‌های CMIP6 می‌توانند روند تغییر بارش آینده را همانند مجموعه داده‌های مشاهداتی، مدل‌سازی کنند (Yang et al., 2023). یافته‌ها نشان داد CMCC-CMS بهترین مدل برای مدل‌سازی دما و مدل MRI-CGCM3 عالی‌ترین برای پیش‌بینی بارش ایران هستند (Abbasian et al., 2019). بارش حوضه‌های آبریز ایران با استفاده از شش مدل MIROC6، BCC-CSM2-MR، CNRM-CM6-1، CESM2، MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL با عملکرد بالا، ارزیابی شده است تغییر بارش بین ۱۹+ تا ۱۲− خواهد بود و بیشترین کاهش بارش در نواحی غربی کشور پیش بینی شده است (Ansari et al., 2022). نتایج ارزیابی مدل ها در مناطق مختلف ایران نشان داد؛ در استان یزد مدل CanEsMs و-BCC CSM2-MR عملکرد بالایی در مدل‌سازی بارش و دما دارند. دما بین ۰/۲ ° c تا ۰/۶ ° c افزایش و بارش بین ۲/۹ تا ۱۳/۷ mm کاهش خواهد یافت (Zareian, 2022). در ساری، مدل ACCESS-CM2 دقت بالایی در پیش نگری بارش و دما داشته، طبق این مدل، دما ۰/۷°c تا ۱/۸°c و بارش ۲–۱۲ درصد افزایش خواهد یافت (Roshani and Mehdi, 2021). در دریاچه ارومیه، مدل‌های MPI-ESM1-2-HR، CMCC-ESM2، INM-CM5-0، MRI-ESM2-0 دقت بالایی در مدل‌سازی دما و عملکرد ضعیفی در مدل‌سازی بارش دارند (Abdolalizadeh et al., 2022). در ایستگاه تنگاب استان فارس، مدل‌هایNCARCCSM3 ، GFDLCM2.1، INMCM3 بالاترین دقت و وزن را در مدل‌سازی بارش و دما دارند.(Ajam Zadeh and Mollaeinia, 2016)

Jahangir et al., (2020) با مدل داده‌های CMIP4 و مولد LarsWG به پیش‌بینی بارش حوضه آبریز کرخه تحت سناریوی A1B ، A2 و B1 پرداختند نتایج نشان داد بارش در ایستگاه‌های همدید اسلام آباد غرب، بستان، روانسر و ملایر افزایشی، در کنگاور کاهشی و خرم آباد در سناریوی A2 (واقع‌بینانه) افزایشی و در سناریوی A1B (بدبینانه) و A1 کاهشی خواهد بود. روند تغییرات بارش در اغلب ایستگاه‌های حوضه کرخه کاهشی است در ایستگاه خرم‌آباد و سنندج روند کاهشی معنادار است (Rahimiani Iranshahi et al., 2022). در بخش‌های غربی و جنوبی حوضه کرخه تغییرات بارش کاهشی و معنی‌دارتر است (Zohrabi et al., 2016). در این حوضه تغییرات زمانی بارش مشهود است، فصل زمستان دریافت بارش کاهش یافته در حالی‌که فصول پاییز و بهار بیشتر است (Khorshiddoust et al., 2016). تداوم خشکسالی هواشناسی در حوضه کرخه باعث خشکسالی هیدرولوژی شده است. خشکسالی کوتاه مدت در برخی زیرحوضه‌ها (زیرحوضه کشکان) سریع‌تر بهبود می یابند اما در برخی دیگر از زیرحوضه (زیرحوضه سیمره) بارندگی باید بیشتر از متوسط بلندمدت رخ دهد تا جریان رودخانه را بهبود بخشد (Shafiei et al., 2018).

Mesgari et al., (2022) با استفاده از ۱۱ مدل گردش عمومی جو (GCMs) از CMIP6 با تمرکز بر شبیه‌سازی بارش در خاورمیانه را ارزیابی کردند، نتایج نشان داد، مدل MPI-ESM1-2-HR بهترین عملکرد را داشت ($R^2 = 0.6$، RMSE = 18.9)، مدل‌های دیگر، مانند ACCESS-CM2 و GISS-E2-1-G، به‌دلیل مناسب بودن در مناطق خاصی مانند عراق مورد توجه قرار گرفتند (Salman et al., 2022). پیش‌بینی بارش حاکی از کاهش قابل توجهی در بارندگی، به‌ویژه در کشورهای خاورمیانه، با تغییرات بین ۷۷/۳− و ۵۱/۱+ میلی‌متر است، در حالی که مناطقی مانند دریای سیاه و مدیترانه ممکن است شاهد افزایش باشند (Mesgari et al., 2022). انتظار می‌رود شبه جزیره عربستان با شرایط خشکسالی تشدید شده مواجه شود، با پیش‌بینی می‌شود که خشکسالی‌های آینده تحت سناریوهای بالاتر SSP به‌طور قابل توجهی افزایش یابد (Saharwardi et al., 2025). طبق مدل‌های ACCESS-CM2، BCC-CSM2-MR، MIROC6 در میانه و غرب عراق برای دوره آتی (۲۰۲۳–۲۰۵۰)

در سناریوی SSP2-4.5، بارش سالانه ممکن است ۳/۵۶-۳/۸۷ درصد افزایش یابد، در حالی که در سناریوی SSP5-8.5، ممکن است از ۷/۲۲ درصد به ۱۲/۶۱ درصد افزایش یابد (Mukheef et al., 2024). با استفاده از هشت مدل GCMs پیش بینی می شود که لیبی، الجزایر، تونس، سوریه، اردن، مراکش و موریتانی با کاهش ۲۵ درصدی بارندگی و افزایش پنج درصدی PET مواجه شوند که منجر به آب و هوای خشک‌تر می‌شود و در مقابل تفاوت‌های منطقه‌ای در کشورهایی مانند سودان، عربستان سعودی، اردن، امارات، عراق، سوریه، یمن و عمان ممکن است تا ۵۰ درصد افزایش بارندگی را تجربه کنند. در تضاد با روندهای خشک‌تر در کشورهای دیگر پیش‌بینی می‌شود که منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) از شرایط خشک به نیمه خشک تبدیل شود و زمین‌های کشاورزی قابل توجهی در معرض خطر به‌دلیل این تغییرات باشد (Hamed et al., 2024).

بارش از جمله پارامترهای اقلیمی است که تغییرپذیری مکانی و زمانی آن قابل توجه بوده و به‌طور مستقیم بر منابع آب اثرگذار است. تحت تأثیر گرمایش جهانی تا سال ۲۰۲۵ دو سوم جمعیت جهان با تنش آبی مواجه خواهند بود (Mahato et al., 2022). یافته‌ها حاکی از آن است تا سال ۲۰۲۵ حوضه آبریز کرخه به‌دلیل انجام فعالیت های کشاورزی، در معرض خطر خشکسالی قرار خواهد گرفت. کاهش ۴۴ درصد دسترسی به آب شیرین و افزایش ۲۵ درصد دوره خشکی در بخش جنوبی و افزایش سیل در بخش شمالی و غربی حوضه کرخه پیش بینی شده است (Ashraf Vaghefi et al. 2014). نتایج مطالعه‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP6 و مولد LarsWG ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی تغییر اقلیمی هستند، اما دقت آن‌ها در شبیه‌سازی بارش (به‌ویژه در مقیاس فصلی) کمتر از دما است. همچنین در مناطق مختلف جهان، مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی دما و بارش مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عملکرد آن‌ها بسته به منطقه متفاوت است. در مناطق مختلف نمی‌توان از یک مدل خاص GCMs به‌طور یکسان استفاده کرد و نیاز به صحت‌سنجی دقیق و تنظیم منطقه‌ای دارند. مقایسه‌ی پژوهش‌ها نشان داد مدل‌های ACCESS-CM2، MRI-ESM2-0، BCC-CSM2-MR، MIROC6 و MPI-ESM1-2-HR در ایران و خاورمیانه بهترین عملکرد را در پیش‌بینی بارش دارند. همچنین بررسی مطالعه‌ها نشان داد که تغییر اقلیمی در آینده تجزیه و تحلیل نشان‌دهنده روند کلی کاهش بارندگی در اکثر مناطق، به‌ویژه در خاورمیانه است، در حالی که برخی از مناطق مثل مدیترانه ممکن است افزایش و در ایران در نواحی غربی کشور کاهش و در نواحی شمالی کشور افزایش را تجربه کنند. که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت منابع آب و کاهش خطرات اقلیمی است.

حوضه آبریز کرخه نیز در معرض خطر تغییر اقلیمی و خشکسالی قرار دارد. این پژوهش بر آن است، دقت عملکرد مدل‌های ریزمقیاس LarsWG8 را برای پیش‌نگری بارش و خشکسالی در حوضه مذکور ارزیابی و برآورد کند. مدل‌ها در پیش‌بینی بارش عملکرد متفاوتی دارند و همواره دارای عدم قطعیت هستند، نادیده گرفتن عدم قطعیت در داده‌های اقلیمی، بر صحت نتایج اثر منفی دارد. از این رو، استفاده از مدلی که بتواند اثر تغییر اقلیم را با دقت مناسب آینده نگری کنند، الزامی است.

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز کرخه در محدوده جغرافیایی ۲۵′ ۳۳° و ۳۴′ ۵۶° عرض شمالی و ۰۷′ ۴۶° و ۱۱′ ۴۹° طول شرقی قرار دارد و شامل بیش از نیمی از استان‌های لرستان و کرمانشاه و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان است. آبراهه‌ی اصلی حوضه، رود کرخه است که به‌عنوان یکی از رودهای بزرگ ایران، از ارتفاعات الوند و ملایر و همدان توسط یکی از سرشاخه‌های مهم خود یعنی گاماسیاب سرچشمه گرفته و از به هم پیوستن رودهای سیمره و زال در جنوب پلدختر تشکیل شده است. بخش وسیعی از زاگرس میانی را زهکش نموده، وارد هورالهویزه و از آن‌جا وارد خلیج فارس می‌شود. وسعت حوضه آبریز ۵۰۷۶۸ کیلومتر مربع است که ۱۷۰۹۴ کیلومتر مربع آن را دشت و مناطق کوهپایه‌ای و بقیه را ارتفاعات اشغال می‌کند، موقعیت ایستگاه‌های همدید در حوضه آبریز کرخه و موقعیت این حوضه در ایران در شکل (۱) نشان داده شده است. حوضه آبی کرخه با رژیم هیدرولوژیکی و بارش خاص(بارش غالب مایع) به‌دلیل نوسان‌های شدید بارش و خشکسالی‌ها متوالی و افزایش دما یکی از حوضه‌های آسیب‌پذیر در مقابل تغییر اقلیم است که سیاست‌های توسعه‌ی مدیریت منابع آب و آسیب‌پذیری منابع آب در مقابل تغییر اقلیم افزایش داده است. حداکثر دریافت بارش با سه پهنه‌ی پربارش در شرق، غرب و شمال غرب و حداقل بارش در جنوب حوضه دریافت می‌شود. به‌طور کلی دریافت بارش بخش شمالی حوضه دارای متوسط بارش ۳۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر و بخش جنوبی دارای متوسط بارش ۱۸۰-۳۰۰ میلی‌متر است.

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

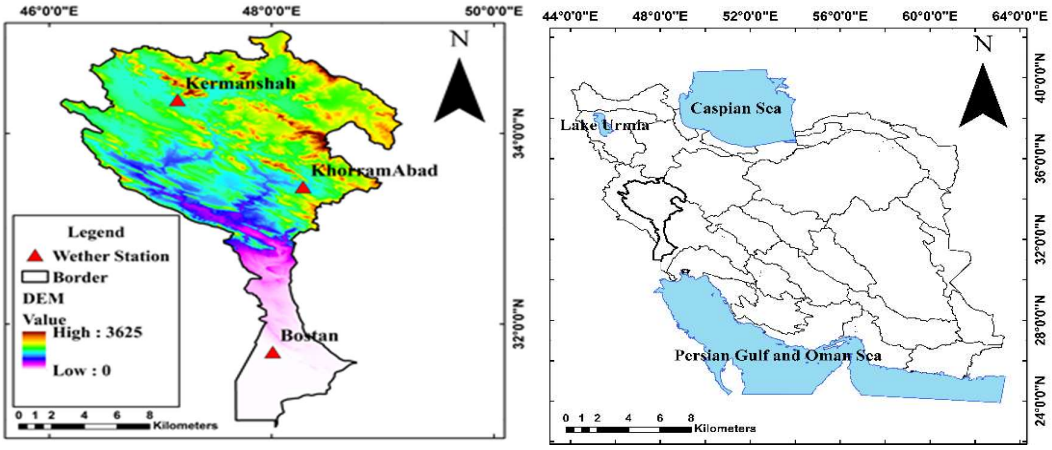


Fig. 1- Geographical location of the Karkheh watershed in Iran

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کرخه در ایران(نگارنده)

مواد و روش‌ها

برای ارزیابی دقت بهترین مدل و پیش‌بینی تغییر اقلیم در حوضه کرخه از متغیر بارش روزانه‌ی ایستگاه های همدید کرمانشاه، خرم‌آباد و بستان که دارای دوره آماری مشترک حداقل ۳۰ سال در دوره مشاهداتی (۲۰۲۱- ۱۹۹۱) بوده‌اند استفاده شد (جدول ۱). پیش نگری مبتنی بر سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم با مدل آماری LarsWG8 در دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) و بر اساس سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است. بر اساس داده‌های مشاهداتی ۲۰۲۱-۱۹۹۱، در هر ایستگاه که نماینده سراب، میان آب و پایاب حوضه بوده‌اند، تغییرات سری زمانی بارش در مقیاس سالانه برای دوره‌ی آتی در سال‌های ۲۱۰۰-۲۰۲۱ (با تقسیم این دوره به چهار دوره‌ی ۲۰ ساله) پیش نگری شده و ضریب تغییرات بارش اندازه گیری شد.

همچنین، فراوانی و احتمال رخداد خشکسالی در آینده بر اساس شاخص استاندارد شده بارش (SPI) محاسبه شد.

با شاخص‌های ضریب همبستگی (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های واقعی (مشاهداتی) آنالیز حساسیت و عدم قطعیت انجام شد (روابط ۱ و ۲ و ۳).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x}).(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2 . \sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}} \qquad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=n}^{n}(xi - yi)^2}{n}} \qquad (۲)$$

$$NRMS = \frac{RMSE}{\max(\mathrm{Xi}) - \min(\mathrm{Yi})} \qquad (۳)$$

که X_i مقادیر مشاهداتی، Y_i مقادیر برآورد شده می‌باشد. بر اساس رابطه ضریب همبستگی (رابطه ۱)، هر چه عدد محاسبه شده نزدیک به یک باشد، نشان دهنده‌ی شبیه‌سازی بهتر مدل می‌باشد. چنانچه شاخص‌های راست آزمایی رابطه (۲) مقادیر کمتر از ۱۰ درصد باشند برآورد مدل عالی؛ بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب؛ بین ۲۰ تا ۳۰ درصد ضعیف؛ و چنانچه بیش از ۳۰ درصد باشد داده‌های مدل غیر قابل اعتماد می‌باشند (Habibi and Kolahi, 2022؛ Hasheminasab et al., 2022).

مولد LARS-WG

LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌ها تصادفی وضع هوا و یکی از مدل‌های گردش عمومی‌جو (GCM) است. کاربرد بسیاری در پیش‌آگاهی تغییرات اقلیمی آینده دارد برای شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را به‌کار می‌برد. در حقیقت ابزار واسطی است که برای حرکت از پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ مقیاس به پیش‌بینی‌شونده‌ها در مقیاس محلی به‌کار می‌رود. مبنای آن طول دوره‌ی خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش؛ توزیع نیمه تجربی می‌باشد (Semenov, 2008). جهت کاهش مقیاس داده‌های اقلیمی در مقیاس کلان (AOGCM, GCM)، پیش‌بینی مناسبی از داده‌ها در مقیاس منطقه‌ای ارائه می‌دهد (Semenov and Stratonovitch, 2015).

LARS-WG8 از شش مدل GCM و سه سناریوی انتشار خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، واقع‌بینانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) برای دوره‌های ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بهره می‌گیرد. این مدل ریزمقیاس، نیاز به داده های مشاهداتی زیاد به‌منظور راستی آزمایی دارد. مشخصات مدل‌های برآوردگر LARS-WG8 در جدول (۲) مندرج شده است.

جدول۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه های همدید در حوضه آبریز کرخه

Table 1- Geographical location of synoptic stations in the Karkheh watershed

Name of the synoptic stations	latitude	Longitude	Height above the sea	study period
Kermanshah	34.352	47.15	1318.5	1991-2021
Khorram Abad	33.438	47.28	1147.8	1991-2021
Bostan	31.707	48.01	7.8	1991-2021

جدول ۲- مشخصات مدل های LarsWG8

Table 2- Specifications of LarsWG8 models

Model name	Separation	Institute	Country
ACCESS-ESM1-5	1.875×1.25	Simulator of the Australian Community Climate and Earth System	Australia
CNRM-CM6-1	2.8 × 2.8	National Center for Meteorological Research	France
GFDL-ESM4	1.25 × 1.00	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	America
HadGEM3-GC31-LL	1.88 × 1.25	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, Devon, United Kingdom	England
MRI-ESM2-0	1.13 × 1.12	Institute of Meteorological Research for Earth System Models	Japan
MPI-ESM1-2-LR	~1.8 × 1.8	Max Planck Institute for Meteor	Japan, Germany, and South Korea

Ref: (Nguyen-Duy et al., 2023)

نتایج و بحث

آینده نگری بارش سالانه: سری زمانی بلندمدت سالانه داده‌های بارش در دوره پایه ۲۰۲۱-۱۹۹۱ و در دوره‌ی آتی ۲۱۰۰-۲۰۲۱ برای ایستگاه‌های سراب، میان آب و پایاب حوضه‌ی آبریز کرخه در شکل‌های (۲) تا (۴) ترسیم شده است. متوسط بارش بلندمدت سالانه‌ی ایستگاه های نماینده در دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۱۹) و دوره آینده به تفکیک چهار دوره‌ی ۲۰ ساله (با کسر دوره‌ی آتی از دوره‌ی پایه) مقایسه و در جدول (۳) مندرج شده است، روند تغییرات بارش بلندمدت سالانه در دوره مشاهداتی نسبت به دوره پایه نشان داد که طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ ایستگاه کرمانشاه در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بارش کمتر دریافت خواهد کرد. کاهش ۳۴/۹ میلی‌متری در سناریوی خوش بینانه (SSP1-2.6)، افزایش ۴/۱ میلی‌متری در سناریوی واقع‌بینانه (SSP2-4.5) و کاهش ۶/۵ میلی‌متری در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) پیش‌نگری شده است. در دوره‌ی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در سناریوی SSP1-2.6 کاهش ۳۳/۵ میلی‌متری، در سناریوی SSP2-4.5 افزایش ۵۹/۳ میلی‌متری و در سناریوی SSP5-8.5 افزایش ۶۷/۳ میلی‌متری را خواهد داشت. تغییرات در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۶۰ در تمام سناریوها افزایشی پیش‌نگری شده است، تغییرات بارش در دوره‌ی ۲۰۸۰-۲۰۶۱، به‌میزان ۳۰/۳ (در سناریوی SSP1-2.6)، ۳۷/۸ (در سناریوی SSP2-4.5) و ۴۷/۹۶ (در سناریوی SSP5-8.5) میلی‌متر و در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میزان ۴۷/۴ (در سناریوی SSP1-2.6)، ۵۱/۳ (در سناریوی SSP2-4.5) و ۳۲/۳ (در سناریوی SSP5-8.5) میلی‌متر افزایشی خواهد بود (شکل ۲ و جدول ۳).

تغییرات بارش در ایستگاه همدید خرم آباد در دوره‌ی آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱) در سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 افزایشی پیش‌بینی شده است. در سناریوی خوشبینانه ۳/۸ و در سناریوی واقع‌بینانه ۴۲/۵ میلی‌متر افزایش و در سناریوی بدبینانه ۳۵/۵ میلی‌متر کاهش دریافت بارش، برآورد شده است. این تغییرات در دوره‌ی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در سناریوی SSP1-2.6 ۷۲/۹ میلی‌متری و در سناریوی SSP2-4.5 ۳۵/۲ میلی‌متری افزایش و در سناریوی SSP5-8.5 ۲۵/۹ میلی‌متری کاهش خواهد یافت. در دوره‌ی ۲۰۸۰-۲۰۶۱ در سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه ۳/۵ میلی‌متر کاهش، ۱۶/۴ و ۳۹/۵ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. تغییرات پیش‌نمایی شده طی دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ کاهشی بوده و در سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۴/۰۱، ۳۵/۲ و ۲/۳ میلی‌متر در میزان بارش دریافتی کاهش رخ خواهد داد (شکل ۳ و جدول ۳).

تغییرات بارش متوسط بلندمدت سالانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱) روند بارش در ایستگاه همدید بستان، کاهشی خواهد بود. سناریوی خوشبینانه ۱۷/۰۷میلی‌متر، واقع بینانه ۴/۰۴و سناریوی بدبینانه ۰/۳کاهش خواهد یافت. در دوره ۲۰۶۰- ۲۰۴۱ افزایش بارش پیش‌بینی‌شده است (به ترتیب ۹/۷، ۴۸/۹۶ و ۲۶/۵ میلی‌متر). در دوره ۲۰۸۱-۲۰۶۱ میزان بارش در سناریو خوش‌بینانه کاهشی (۵/۹) و در سناریوهای واقع‌بینانه و بدبینانه (۱۴/۳ و ۲۵/۶ میلی‌متر) افزایشی پیش‌بینی شده است. میزان بارش در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ افزایشی خواهد بود (به ترتیب در سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه ۲۹/۲، ۳۸/۶۵ و ۱۲/۳ میلی‌متر خواهد بود) (شکل ۳ و جدول ۳).

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

ضریب تغییرات بارش در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) و دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریزکرخه در جدول (۴) مندرج است. طبق این جدول، ضریب تغییرات بارش در ایستگاه کرمانشاه طی دوره‌ی مشاهداتی (۲۰۲۰-۱۹۹۱) ۲۶/۳ درصد است و میزان تغییرات بارش دریافتی طبق مدل ACCESS-ESM1 برای دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ۲۷/۷ درصد، ۲۶/۴ درصد و ۲۶/۹۸ درصد برآورد شده است. تغییر بارش در ایستگاه خرم‌آباد طی دوره‌ی مشاهداتی ۳۰/۳ درصد و طبق مدل GFDL-ESM4 در دوره آتی در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ضریب تغییر بارش به‌ترتیب ۲۷/۰۳ درصد، ۲۸/۳ درصد و ۲۷/۲ درصد خواهد بود. تغییر در ایستگاه بستان در دوره مشاهداتی ۴۱/۶ درصد است و این تغییرات برای دوره آتی طبق مدل ACCESS-ESM1 در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب ۴۱/۹، ۴۱/۰۵ و ۳۸/۷ پیش‌بینی شده است (جدول ۴). مقادیر کاهشی ضریب تغییر بارش در ایستگاه‌های خرم آباد و بستان در دوره آتی نشان می‌دهد این دو ایستگاه نسبت به دوره‌ی مشاهداتی بارش کمتری دریافت خواهند کرد. درصد تغییر بارش ایستگاه کرمانشاه در آینده در سناریوهای خوشبینانه و واقع بینانه جزئی ولی در سناریوی بدبینانه افزایشی خواهد بود؛ علاوه بر این، بررسی ضریب تغییرات بارش در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه نشان می دهد در دوره مشاهداتی، میزان بارش دریافتی در ایستگاه کرمانشاه یکنواخت و میزان بارش دریافتی در ایستگاه بستان نامنظم است.

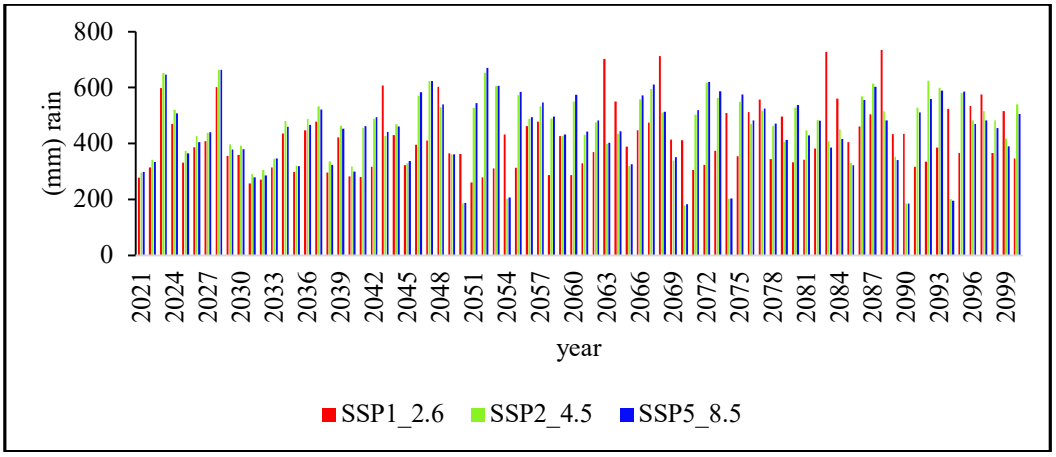


Fig. 2- Forecast of long-term yearly changes in precipitation in the Kermanshah station in the future period (2021-2100), based on the ACCESS-ESM1 model

شکل ۲- پیش‌نگری تغییرات بلندمدت سالانه بارش ایستگاه کرمانشاه، در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بر اساس مدل ACCESS-ESM1

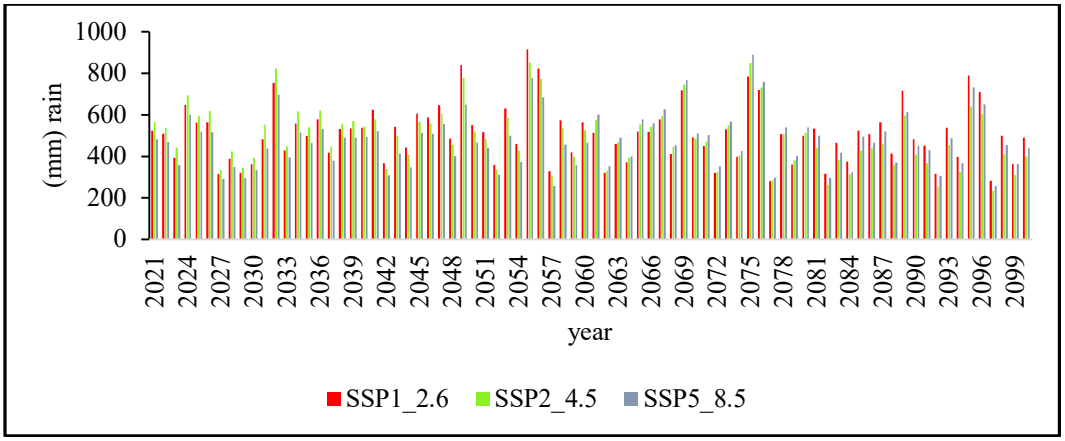


Fig. 3- Forecast of long-term yearly changes in precipitation in the Khorramabad station in the future period (2021-2100), based on the GFDL-ESM4 model

شکل ۳- پیش‌نگری تغییرات بلندمدت سالانه بارش ایستگاه خرم‌آباد، در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بر اساس مدل GFDL-ESM4

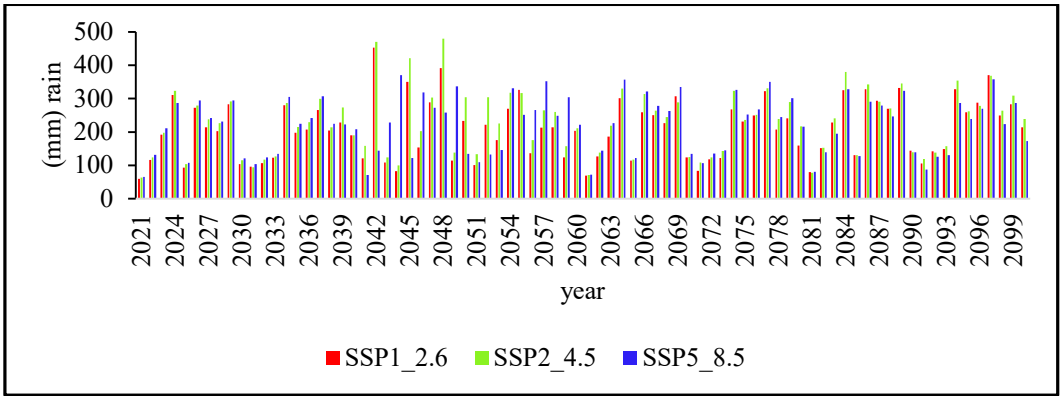


Fig. 4- Forecast of long-term yearly changes in precipitation in the Bostan station in the future period (2021-2100), based on the ACCESS-ESM1 model

شکل ٤- پیش‌نگری تغییرات بلندمدت سالانه بارش ایستگاه بستان، در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بر اساس مدل ACCESS-ESM1

جدول۳- پیش‌نگری تغییرات بارش در حوضه کرخه در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در مولد اقلیمی LarsWG8

Table 3- Forecast of changes in precipitation in the Karkheh Basin in the future period (2021-2100) in the LarsWG8 climate generator

future period	Kermanshah (ACCESS-ESM1)			Khorramabad (GFDL-ESM4)			ACCESS-ESM1 (Bostan)		
	SSP1_2.6	SSP2_4.5	SSP5_8.5	SSP1_2.6	SSP2_4.5	SSP5_8.5	SSP1_2.6	SSP2_4.5	SSP5_8.5
2021-2040	-34.9	4.1	-6.5	3.8	42.5	-35.5	-17.07	-4.04	0.3
2041-2060	-33.5	59.3	67.3	72.9	35.2	-25.9	9.7	48.96	-26.5
2061-2080	30.3	37.8	47.96	-3.5	16.4	39.5	-5.9	14.3	-25.6
2081-2100	47.4	51.3	32.2	-4.0	-35.2	-2.3	29.2	38.65	-12.3

جدول ٤- ضریب تغییرات بارش در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) و دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه

Table 4- Precipitation change coefficient in the observation period (1991-2021) and the future period (2021-2100) at selected stations in the Karkheh watershed

Station	observation period (%)	future period		
		SSP1-2.6 (%)	SSP2-4.5 (%)	SSP5-8.5 (%)
Kermanshah	26.3	27.7	26.4	26.98
Khorramabad	30.3	27.03	28.3	27.2
Bostan	41.6	41.9	41.05	38.7

مقایسه خروجی لارس و اطلاعات بانک جهانی: نتایج حاصل از پیش بینی آب و هوا با خروجی داده های CMIP6 بانک جهانی با مدل multi-model و با وضوح ۲/۵ × ۲/۵ درجه، نشان داد: میزان بارش در حوضه آبریز کرخه، در دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۵۰) افزایش خواهد یافت. افزایش ۸/۴ میلی‌متری، کاهش ۴ میلی‌متری و ۴/۵ میلی‌متری به ترتیب در سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6 ، واقع بینانه SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5 پیش بینی شده است (جدول۵).

شاخص بارش استاندارد شده (SPI): نمودار SPI بیان‌گر وضعیت ترسالی و خشکسالی در ایستگاه های منتخب است (شکل ۷). نتایج ارزیابی شاخص SPI نشان داد فراوانی رخداد سال‌های خشک طی دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در سناریوی SSP1-2.6، SPP2-4.5 و SSP5-8.5، ایستگاه‌های کرمانشاه ۴۵، ۳۵ و ۳۵ بار، خرم آباد ۳۴ ، ۳۴ و ۳۸ بار و بستان، ۳۷، ۳۹ و ۳۲ بار در ۱۰۰ سال آتی خواهد بود.

طبق سناریو واقع‌بینانه تا سال ۲۱۰۰، احتمال رخداد خشکسالی در کرمانشاه ۴۳/۷درصد، در خرم آباد ۴۲/۵درصد و در بستان ۴۸/۷درصد خواهد بود (شکل ۷).

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

جدول۵- پیش‌نگری متوسط بلندمدت بارش سالانه حوضه آبریز کرخه با مدلmulti-model طی ۲۱۰۰-۲۰۲۱ (بانک جهانی)

Table 5- Long-term average annual precipitation forecast for the Karkheh watershed using the multi-model model in 2021-2100 (World Bank, 2022)

observation	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
506.59	515	502.6	502.1

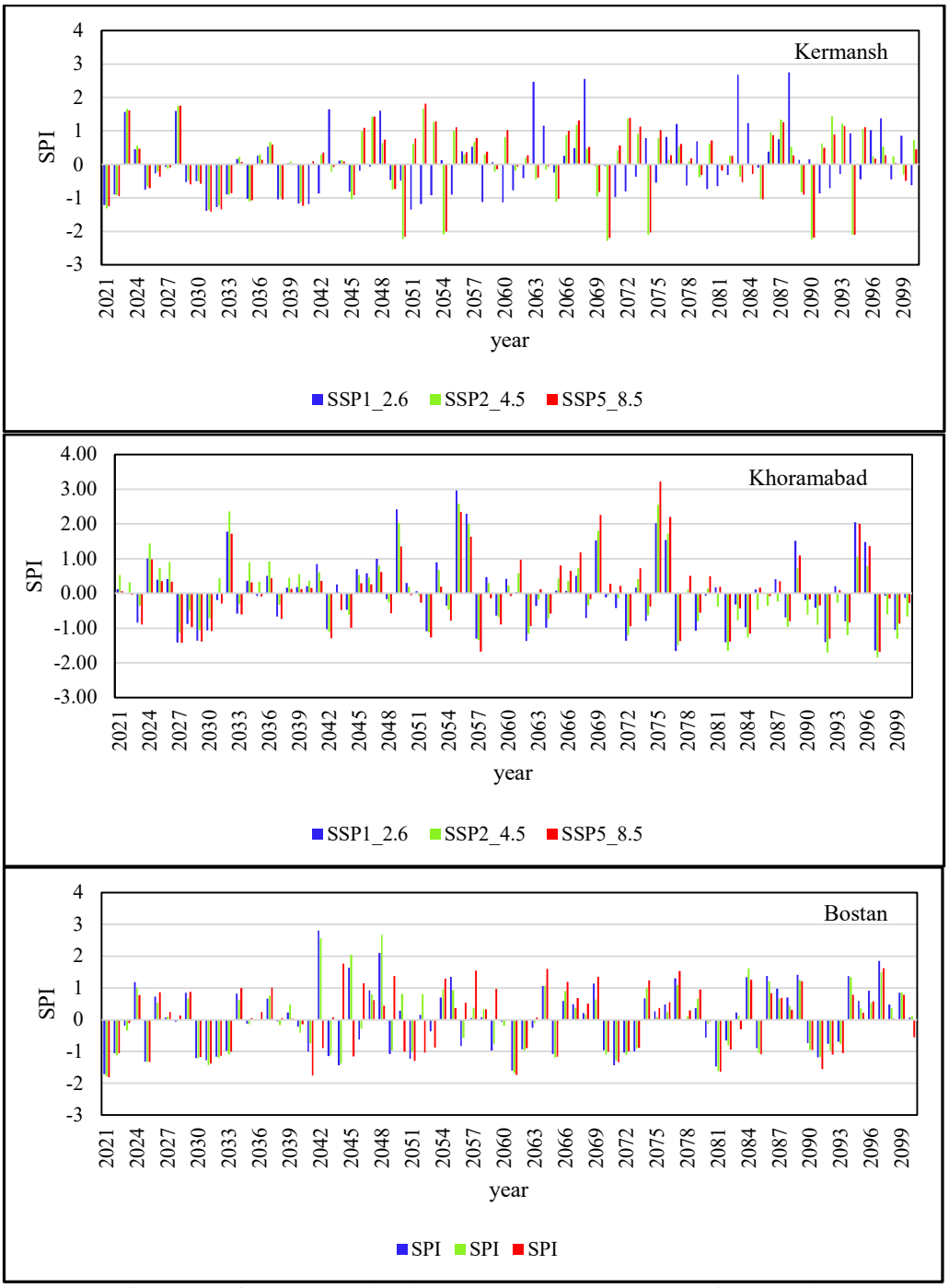


Fig. 7- SPI chart of selected stations in the Karkheh watershed the future period

شکل۷- نمودار SPI ایستگاه های منتخب حوضه آبریز کرخه در دوره آتی

صحت سنجی

میزان دقت (Accurancy) مدل‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل پیش بینی داده‌های تصادفی و عدم قطعیت مدل‌ها است. برای تعیین میزان عدم قطعیت و دقت مدل‌ها از شاخص‌های r, RMSE, NRMSE در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) استفاده شد. نتایج آزمون‌های صحت‌سنجی برآورد بارش ایستگاه کرمانشاه نشان داد در سه سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 همبستگی قوی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده وجود دارد (مقادیر ضریب همبستگی به تفکیک هر مدل در جدول (۶) مندرج است). مقادیر RMSE در سه سناریوی در مدل‌های، ACCESS-ESM1، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR عالی (کمتر از ۱۰) صحت‌سنجی شده است. دقت مدل HadGEM3-GC31-LL در سه سناریو با مقادیر RMSE ضعیف (۳۰-۲۰) برآورد شده است. دقت مدل GFDL-ESM طبق مقادیر RMSE در سناریو خوش‌بینانه عالی (۰ تا ۱۰) و سناریوهای واقع‌بینانه و بدبینانه خوب (۱۰ تا ۲۰) و دقت مدل CNRM-CM6-1 در سناریوهای خوش بینانه و واقع‌بینانه خوب و در سناریو بدبینانه عالی است. در بین مدل‌های مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید کرمانشاه بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل ACCESS-ESM1 و کم‌ترین دقت را مدل HadGEM3-GC31-LL دارد (جدول ۶).

جدول ٦- صحت سنجی بارش کرمانشاه در سناریوهای انتشار در دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

Table 6- Kermanshah precipitation validation in 2021-2100 emission scenarios

model	year	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	R
ACCESS-ESM1	2021-2040	12	8.3	0.96	12	8.5	0.95	9	6.7	0.97
	2041-2060	10.7	14	0.94	9	6.9	0.98	10	7.5	0.98
	2061-2080	10	7.5	0.96	8	6	0.98	9	6.7	0.98
	2081-2100	9	6.9	0.97	10	7.3	0.97	14	10.6	0.94
CNRM-CM6-1	2021-2040	14	10.2	0.94	16	11.7	0.91	14	9.7	0.94
	2041-2060	13	9.4	0.94	9	6.3	0.97	11	8.4	0.95
	2061-2080	14	10.4	0.92	13	9.76	0.95	13	9.9	0.93
	2081-2100	11	8.3	0.95	12	8.5	0.95	15	10.9	0.92
GFDL-ESM4	2021-2040	12	8.7	0.95	19	13.3	0.89	14	10.2	0.93
	2041-2060	12	9.05	0.94	10	7.6	0.96	15	10.9	0.94
	2061-2080	14	10.1	0.95	12	8.8	0.95	10	7.6	0.96
	2081-2100	14	9.97	0.96	17	12.7	0.94	16	11.6	0.92
HadGEM3-GC31-LL	2021-2040	24	16.9	0.88	30	21.1	0.86	30	21.1	0.90
	2041-2060	26	19.3	0.93	21	15.5	0.90	23	16.95	0.94
	2061-2080	27	19.6	0.89	19	13.96	0.92	35	25.4	0.86
	2081-2100	28	20.2	0.96	21	15.2	0.95	34	24.8	0.95
MPI-ESM1-2-LR	2021-2040	13	9.2	0.94	14	9.7	0.94	14	9.8	0.94
	2041-2060	14	9.96	0.95	18	13.3	0.93	14	10.4	0.97
	2061-2080	12	8.7	0.95	11	8.03	0.96	21	15.1	0.94
	2081-2100	15	11.4	0.96	17	12.3	0.94	18	13.06	0.92
MRI-ESM2-0	2021-2040	13	9.4	0.93	14	9.7	0.93	9	6.3	0.97
	2041-2060	9	6.8	0.97	8	5.8	0.98	10	7.2	0.97
	2061-2080	10	7.7	0.96	12	8.6	0.95	10	7.7	0.96
	2081-2100	16	11.4	0.91	11	8.4	0.96	11	8.4	0.97

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

نتایج آزمون‌های میزان صحت سنجی در برآورد بارش ایستگاه خرم آباد نشان داد که بر اساس مقادیر r در سه سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 همبستگی قوی جدول (۷) بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده وجود دارد. مقادیر RMSE در سناریوی SSP1-2.6، در مدل های GFDL-ESM4، ACCESS-ESM1 و MRI-ESM2-0 عالی (کمتر از ۱۰) و سایر مدل‌ها صحت‌سنجی مدل خوب (۲۰-۱۰) است. مقادیر RMSE در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل های GFDL-ESM4 و ACCESS-ESM1 و CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR خوب (۲۰-۱۰) ارزیابی شده است. دقت مدل HadGEM3-GC31-LL در سناریوی SSP1-4.6 و SSP2-4.5 با مقادیر RMSE خوب (۲۰-۱۰) و در سناریوی SSP5-8.5 ضعیف (۳۰-۲۰) است. در بین مدل‌های مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید خرم آباد بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل GFDL-ESM4 و ACCESS-ESM1 و کم ترین دقت مدل HadGEM3-GC31-LL دارند (جدول ۷).

نتایج آزمون‌های دقت سنجی مدل‌ها در برآورد بارش ایستگاه همدید بستان نشان داد مقادیر R در سه سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 همبستگی قوی جدول (۸) بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده وجود دارد. مقادیر RMSE در سه سناریوی انتشار، همه‌ی شش مدل مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید بستان دقت عالی (کمتر از ۱۰) برای آینده نگری بارش دارند. در مقابل مدل CNRM-CM6-1 و ACCESS-ESM1 بالاترین میزان دقت و مدل HadGEM3-GC31-LL کم‌ترین دقت را در پیش‌بینی بارش بستان دارد (جدول ۸).

جدول۷- صحت سنجی بارش خرم آباد در سناریوهای انتشار در دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

Table 7- Validation of Khorramabad precipitation in 2021-2100 emission scenarios

model	year	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	R
ACCESS-ESM1	2021-2040	12	9.7	0.96	15	12.5	0.95	14	11.4	0.95
	2041-2060	11	9.3	0.96	21	18.05	0.96	18	15.5	0.96
	2061-2080	17	14.5	0.96	17	14.6	0.96	19	16.4	0.96
	2081-2100	23	19.4	0.95	20	17.2	0.96	23	19.5	0.92
CNRM-CM6-1	2021-2040	17	13.9	0.95	12	10.2	0.96	14	11.7	0.96
	2041-2060	15	12.9	0.95	16	13.5	0.95	18	15.1	0.94
	2061-2080	18	15.03	0.93	17	14.3	0.95	22	18.8	0.92
	2081-2100	16	13.5	0.95	17	14.2	0.94	16	13.5	0.94
GFDL-ESM4	2021-2040	12	9.6	0.96	14	12	0.95	12	10.3	0.96
	2041-2060	18	15.4	0.93	16	13.8	0.93	19	16.09	0.89
	2061-2080	17	15	0.91	17	14.6	0.92	18	15.3	0.91
	2081-2100	15	13.3	0.93	19	16.1	0.93	17	14.2	0.92
HadGEM3-GC31-LL	2021-2040	19	16	0.96	28	24	0.95	31	26	0.96
	2041-2060	25	21.3	0.92	24	20.5	0.89	34	28.9	0.90
	2061-2080	27	23.5	0.91	29	24.6	0.90	42	35.8	0.86
	2081-2100	34	29.07	0.95	26	21.97	0.93	45	38.6	0.94
MPI-ESM1-2-LR	2021-2040	13	11.2	0.95	12	10.1	0.96	15	12.5	0.94
	2041-2060	15	12.9	0.95	17	14.8	0.93	17	14.6	0.93
	2061-2080	15	12.9	0.93	16	13.5	0.93	22	18.5	0.92
	2081-2100	17	14.2	0.94	18	15.1	0.92	22	19.05	0.86
MRI-ESM2-0	2021-2040	12	9.9	0.96	11	9.4	0.96	17	14.3	0.96
	2041-2060	14	11.7	0.95	11	9.2	0.96	13	11.03	0.95
	2061-2080	13	11	0.95	13	10.8	0.95	13	10.9	0.95
	2081-2100	13	11.3	0.95	17	14.3	0.92	16	13.3	0.93

جدول۸- صحت سنجی بارش بستان در سناریوهای انتشار در دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

Table 8- Validation of Bostan precipitation in 2021-2100 emission scenarios

model	year	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	R
ACCESS-ESM1	2021-2040	14	5.8	0.94	14	5.9	0.93	13	5.2	0.94
	2041-2060	13	5.8	0.93	15	6.4	0.96	17	7.3	0.94
	2061-2080	20	8.6	0.85	16	6.9	0.91	16	6.7	0.92
	2081-2100	19	8.1	0.90	18	7.8	0.91	23	10.2	0.81
CNRM-CM6-1	2021-2040	13	5.7	0.94	11	4.6	0.96	12	4.9	0.95
	2041-2060	14	6.2	0.93	14	6.04	0.93	12	5.3	0.95
	2061-2080	13	5.8	0.94	11	4.8	0.96	16	7.03	0.92
	2081-2100	12	4.99	0.95	16	6.8	0.93	18	7.7	0.93
GFDL-ESM4	2021-2040	15	6.4	0.92	13	5.6	0.94	17	7	0.92
	2041-2060	16	6.8	0.91	18	7.6	0.88	17	7.3	0.91
	2061-2080	16	7.01	0.91	16	7.001	0.92	14	5.9	0.93
	2081-2100	18	7.8	0.90	16	7.1	0.94	19	8.03	0.88
HadGEM3-GC31-LL	2021-2040	14	5.8	0.94	19	7.8	0.93	19	7.8	0.95
	2041-2060	17	7.2	0.93	14	6.3	0.94	22	9.4	0.95
	2061-2080	15	6.5	0.92	18	8.02	0.95	25	10.8	0.96
	2081-2100	24	10.5	0.92	19	8.3	0.95	29	12.6	0.95
MPI-ESM1-2-LR	2021-2040	16	6.7	0.92	18	7.5	0.92	20	8.3	0.88
	2041-2060	21	9.21	0.86	17	7.2	0.92	19	8.05	0.94
	2061-2080	17	7.4	0.91	20	8.5	0.92	22	9.6	0.89
	2081-2100	19	8.3	0.91	17	7.2	0.92	16	7.03	0.92
MRI-ESM2-0	2021-2040	14	5.8	0.93	17	7	0.91	13	5.4	0.94
	2041-2060	13	5.7	0.95	12	5.4	0.95	18	7.8	0.90
	2061-2080	15	6.7	0.92	12	5.3	0.96	13	5.8	0.94
	2081-2100	17	7.3	0.95	14	5.96	0.95	13	5.6	0.95

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

بعد از انجام صحت‌سنجی، نمودار متوسط بلند مدت بارش مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) و دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) ترسیم و مقایسه شدند. بر اساس اعتبارسنجی انجام شده برای شبیه‌سازی بارش، دقیق‌ترین مدل جهت آینده‌نگری بارش در ایستگاه همدید کرمانشاه ACCESS-ESM1، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR شکل (۸)، دقیق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی بارش ایستگاه همدید خرم‌آباد GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0 و ACCESS-ESM1 شکل (۹)، و عالی‌ترین آن برای پیش‌نگری بارش در ایستگاه همدید بستان CNRM-CM6-1 و ACCESS-ESM1 هستند شکل (۱۰). مقایسه مدل‌ها نشان می‌دهد در ایستگاه‌های خرم‌آباد و کرمانشاه مدل HadGEM3-GC31-LL دارای بیش برآوردی در مدل‌سازی بارش بوده و در ایستگاه بستان هر چند این مدل اعتبار عالی دارد ولی مقدار RMSE آن نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بوده و برای آینده‌نگری مناسب نیست.

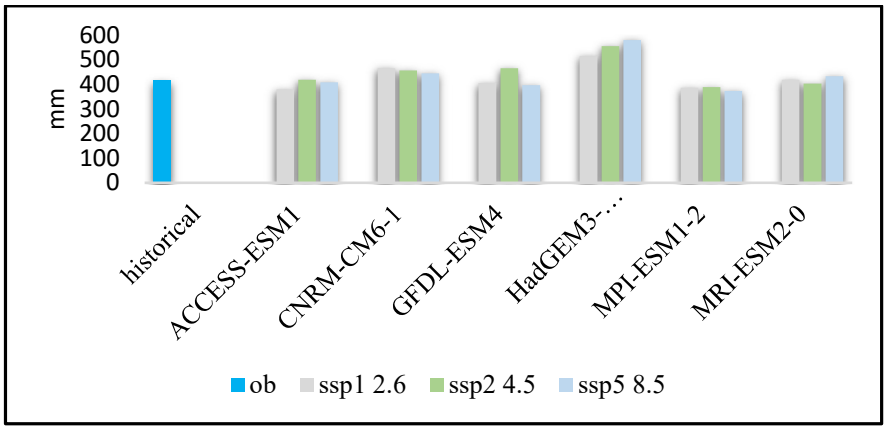


Fig. 8- Comparison of LarsWG8 models in the observation period and the future period in the long-term mean annual precipitation estimate of the Kermanshah synoptic station

شکل ۸- مقایسه‌ی مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه و دوره آتی در برآورد متوسط بلندمدت بارش سالانه ایستگاه همدید کرمانشاه

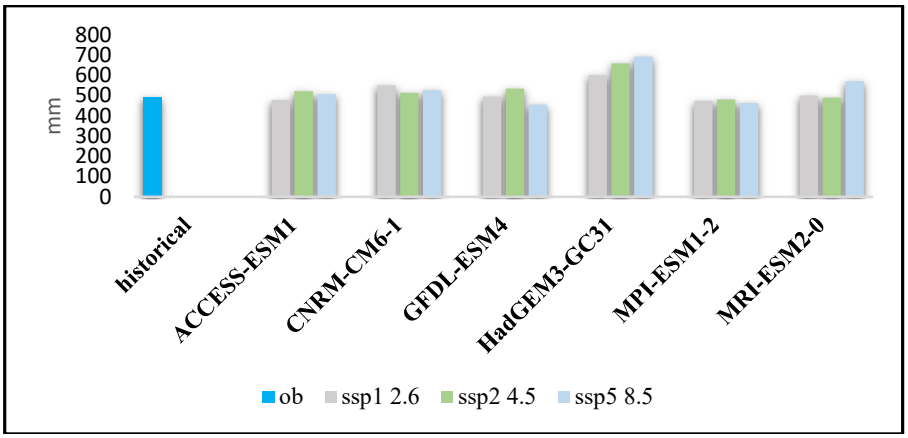


Fig. 9- Comparison of LarsWG8 models in the observation period and the future period in the long-term mean annual precipitation estimate of the Khorramabad synoptic station

شکل۹- مقایسه‌ی مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه و دوره آتی در برآورد متوسط بلندمدت بارش سالانه ایستگاه همدید خرم‌آباد

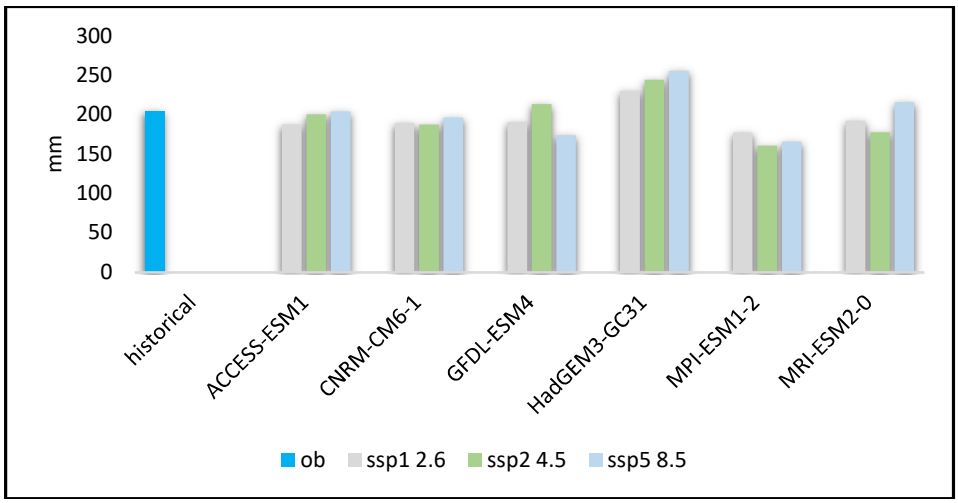


Fig. 10- Comparison of LarsWG8 models in the observation period and the future period in the long-term mean annual precipitation estimate of the Bostan synoptic station

شکل ۱۰- مقایسه‌ی مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه و دوره آتی در برآورد متوسط بلندمدت بارش سالانه ایستگاه همدید بستان

نتایج و بحث

بررسی نمودارهای تغییرات بلندمدت فصلی بارش بیانگر جا به جایی فصلی دریافت بارش در حوضه کرخه طی دوره آتی است. به‌طوری‌که، فصول کم بارش در دوره‌ی مشاهداتی، برای سال‌های آینده افزایشی برآورد شده است. تغییرات بارش متوسط بلندمدت سالانه در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی نشان داد که در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) میزان بارش در ایستگاه کرمانشاه در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه کاهشی و در سناریوی واقع بینانه افزایشی خواهد بود. در ایستگاه همدید خرم‌آباد در سناریوی بدبینانه کاهشی و در سناریوهای خوش‌بینانه و واقع بینانه افزایشی برآورد شده است. این تغییرات در ایستگاه همدید بستان در سه سناریوی انتشار کاهشی خواهد بود. یافته های حاصل از پژوهش با نتایج Jahangir et al. (2020) همسو است. نتایج نشان داد احتمال رخداد خشکسالی طی سال‌های آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) در ایستگاه کرمانشاه زیاد خواهد بود با توجه به همبستگی قوی بین بارش و دبی، کاهش بارش از سراب حوضه کرخه به معنای کاهش رواناب در پایاب حوضه کرخه خواهد بود که در صورت همراه بودن با تغییر اقلیم در پایاب، منجر به تشدید تنش دسترسی به منابع آب در پایین دست حوضه خواهد شد؛ بنابراین، مدیریت ریسک و تحقق اهداف توسعه پایدار از اقدامات حائز اهمیت، برای کاهش خسارات است. نتایج مطالعه Zhai et al. (2020) بیان‌گر قابلیت بسیار بالا روش چند مدلی گزارش CMIP6 در شبیه‌سازی ویژگی‌های خشکسالی است.

میزان دقت مدل‌ها یکی از مهمترین مراحل پیش‌بینی داده‌های تصادفی است. نتایج نشان داد در سه سناریوی انتشار و با توجه به بررسی شش مدل از مدل‌های مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید کرمانشاه بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل ACCESS-ESM1 ، در ایستگاه همدید خرم‌آباد بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل GFDL-ESM4 و ACCESS-ESM1 در مقابل در ایستگاه بستان، مدل CNRM-CM6-1 و ACCESS-ESM1بالاترین میزان دقت و مدل HadGEM3-GC31-LL کم‌ترین دقت را در پیش بینی بارش در ایستگاه‌های نماینده حوضه کرخه دارد.

Roshani و Mehdi (2021)؛ Ajam Zadeh و Mollaeinia (2016) ؛ Gebisa et al. (2023)؛ Mukheef et al. (2024) نیز دقت و اعتبار بالای این مدل‌ها را در پیش‌بینی بارش تایید می‌کنند.

نتیجه گیری

در مناطق مختلف نمی‌توان از یک مدل خاص GCMs به‌طور یکسان استفاده کرد علاوه بر این، شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی همواره دارای عدم قطعیت هستند. در پژوهش حاضر، پس از صحت سنجی و ارزیابی دقت مدل‌های مولد ریزمقیاس LarsWG8، عالی‌ترین مدل انتخاب شده و تغییرات بارش در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ آینده‌نگری شد. یافته‌ها نشان داد علاوه بر مدل ACCESS-ESM1 در هر سه ایستگاه همدید نماینده حوضه کرخه، مدل CNRM-CM6-1 در ایستگاه بستان، مدل GFDL-ESM4 در ایستگاه خرم آباد و مدل MRI-ESM2-0 در ایستگاه کرمانشاه بالاترین اعتبار و دقت را برای آینده‌نگری پارامتر بارش دارند. مدل HadGEM3-GC31-LL با پایین‌ترین RMSE در میزان بارش حوضه کرخه، بیش برآوردی داشته و مدل مناسبی

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

برای آینده نگری نیست. یافته‌های این بخش از پژوهش، با یافته‌های Roshani و Mehdi (2021)، Gebisa et al (2023) و Mollaienia et al (2024) مطابقت دارد. یافته‌های این محققین نشان داد مدل‌های MIROC5 و ACCESS1-3 بهترین مدل GCM در شبیه‌سازی بارش پاکستان و مدل GFDL-CM4 بهترین مدل‌ها از خروجی مدل CMIP6 در مدل‌سازی بارش رودخانه بار و مدل‌های MRI-ESM2-0، ACCESS-CM2، GFDLCM2.1 بالاترین دقت مدل‌سازی بارش در حوضه‌های آبریز ایران، ساری و در ایستگاه تنگاب استان فارس و مدل‌های ACCESS-CM2، BCC-CSM2-MR، MIROC6 در میانه و غرب عراق برای دوره آتی (۲۰۲۳–۲۰۵۰) در سناریو SSP2-4.5، بارش سالانه ممکن است ۳/۵۶–۳/۸۷ درصد افزایش یابد، در حالی که در سناریو SSP5-8.5، ممکن است از ۷/۲۲ درصد به ۱۲/۶۱ درصد افزایش یابد (Mukheef et al., 2024). مدل MPI-ESM1-2-HR در شبیه‌سازی بارش خاورمیانه بهترین عملکرد را دارا بوده‌اند (Mesgari et al., 2022). نتایج مطالعه‌های سایر پژوهشگران در پیش‌نگری بارش خاورمیانه روند کاهشی، در مدیترانه روند افزایشی، در غرب ایران کاهشی و در شمال کشور افزایش بارش پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج پژوهش حاضر، نشان داد طی سال‌های آتی (۲۰۴۰–۲۰۲۱) جابه‌جایی فصل بارش در حوضه کرخه رخ خواهد داد که از شواهد بارز تغییر اقلیم است Khorshiddoust et al. (2016) در تحقیق خود به نتیجه مشابه دست یافته‌اند. همچنین نتایج پیش‌نگری بارش در سه ایستگاه نماینده سراب و میاناب و پایاب حوضه آبریز کرخه تا سال ۲۱۰۰ (با تقسیم چهار دوره ۲۰ ساله) نشان داد: ایستگاه کرمانشاه طبق سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در دوره ۲۰۴۰–۲۰۲۱ کاهش بارش و در سناریوی واقع‌بینانه افزایش بارش، در دوره ۲۰۶۰–۲۰۴۱ در سناریوی واقع بینانه و بدبینانه افزایشی و در سناریو خوش‌بینانه کاهشی و از سال ۲۱۰۰–۲۰۶۰ در سناریوهای مذکور افزایش بارش رخ خواهد داد. بارش در ایستگاه خرم‌آباد طبق سناریوهای خوش‌بینانه و واقع بینانه از سال ۲۰۲۱–۲۰۶۰ افزایشی و طبق سناریوی بدبینانه کاهشی، طبق سناریو خوش‌بینانه در سال ۲۰۸۰–۲۰۶۱ کاهشی و طبق سناریوهای بدبینانه و واقع بینانه افزایشی، طبق سناریوهای مورد بررسی در طی سال‌های ۲۰۸۱–۲۱۰۰ کاهشی خواهد بود. بارش در ایستگاه بستان برای دوره اول (۲۰۴۰–۲۰۲۱) کاهشی، برای دوره دوم (۲۰۶۰–۲۰۴۱) افزایشی، برای دوره سوم (۲۰۸۰–۲۰۶۱) طبق سناریوی خوشبینانه کاهشی و طبق سناریوی واقع‌بینانه و بدبینانه افزایشی، در دوره چهارم (۲۱۰۰–۲۰۸۱) افزایشی خواهد بود. یافته‌های این بخش با یافته‌های Jahangir et al. (2020) هم جهت است.

نتایج نشان داد در دوره آتی، بخش‌های شمال غرب و جنوبی کرخه در معرض خطر خشکسالی قرار خواهند گرفت یافته‌های این بخش با یافته‌های Zohrabi et al. (2016) و Ashraf Vaghefi et al (2014) هم جهت است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی صحت سنجی مبدل لارس نشان داد دقت این مبدل در برآورد بارش قابل اعتماد است. علاوه بر خروجی مدل CMIP6 می‌توان از این مبدل جهت مدل‌سازی استفاده کرد. همانگونه که Jahangir et al (2020) نیز جت برآورد بارش کرخه از آن مبدل استفاده کرده است.

محدودیت تحقیق: داده‌های اقلیمی با دوره آماری مشترک و طولانی مدت، برای انتخاب تعداد بیشتر ایستگاه‌هایی که نماینده حوضه کرخه باشند، وجود ندارد و محقق برای بررسی حوضه کرخه به سه ایستگاه اکتفا نموده است. محدودیت دیگر، برای مقایسه مدل‌های آماری LarsWG8 با مدل‌های پایگاه داده‌ی CORDEX محقق با محدودیت‌های دسترسی به سایت مواجه بوده است؛ بنابراین، مدل‌های خروجی مبدل لارس با مدل‌های بانک جهانی مقایسه شده‌اند که این نوع از داده‌ها خود، در مقیاس حوضه و استان در دسترس هستند.

پیشنهاد تحقیق: طی آزمون و خطا در انجام پژوهش، یافته‌ها نشان داد با کاهش دوره مشاهداتی، دقت و صحت‌سنجی مدل‌ها کاهش می‌یابد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌گردد به‌منظور آینده‌نگری با مولد لارس، دوره‌ی پایه افزایش یابد. با توجه به عملکرد ضعیف مدل‌ها در مدل‌سازی بارش، بهتر است دقت تمام مدل های آینده‌نگر صحت‌سنجی شده و سپس پیش‌بینی انجام شود. افزایش اقدامات مطالعاتی و اجرایی مدیریت منابع آب برای کاهش چالش دسترسی به منابع آب و افزایش ظرفیت تاب آوری ذی‌نفعان با خشکسالی پیشنهاد می‌شود. از مدل‌های LarsWG8 مورد بررسی در حوضه آبریز کرخه، مدل ACCESS-ESM1 و GFDL-ESM4 دارای دقت بالا برای پیش‌بینی خشکسالی در حوضه آبریز کرخه است و از مدل‌های پیشنهادی محقق برای مطالعه‌های بیشتر در این زمینه است.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

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

دسترسی به داده‌ها

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

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.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مریم آریا صدر، در جمع‌آوری داده‌ها، تکمیل پرسشنامه‌ها و انجام مطالعات میدانی مشارکت داشت. همچنین، تهیه نسخه اولیه مقاله و اعمال اصلاحات و بازنگری‌های پیشنهادی استاد راهنما توسط ایشان انجام شد.

نویسنده دوم: داریوش رحیمی، ایده و طرح اولیه پژوهش و تبیین مسئله تحقیق توسط ایشان ارائه شد. همچنین، در انجام محاسبات، تحلیل و بررسی نتایج، ویرایش و بازنگری علمی متن مقاله و اعمال اصلاحات نهایی مشارکت داشت.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اصفهان، سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو برای در اختیار قرار دادن داده‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

1- Abbasian, M., Moghim, S. and Abrishamchi, A., 2019. Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, pp.1465-1483. Doi: https://doi.org/10.1007/s00704-018-2456-y.

2- Abdolalizadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., Jahanbakhsh, S., 2022. 'Assessment of the performance of CMIP6 model for analysis of temperature and precipitation in Urmia Lake basin', *Climate Change Research*, 3(11), pp. 17-30. Doi: 10.30488/CCR.2022.361233.1093 (In Persian)

3- Ahmed, K., Sachindra, D.A., Shahid, S., Demirel, M.C. and Chung, E.S., 2019. Selection of multi-model ensemble of GCMs for the simulation of precipitation based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, pp.4803-4824. Doi: https://doi.org/10.5194/hess-2018-585

4- Ajam Zadeh, A., Mollaeinia, M., 2016. 'Assessment of Impact of Climate Change on Firoozabad River Runoff with Downscaling of Atmospheric Circulation Models Output by SDSM and LARS-WG Softwares', *Iran-Water Resources Research*, 12(1), pp. 95-109. SID. Doi: https://sid.ir/paper/100449/fa (In Persian)

5- Almazroui, M., Islam, M. N., Alkhalaf, A. K., Saeed, F., Dambul, R., & Rahman, M. A. 2016. Simulation of temperature and precipitation climatology for the CORDEX-MENA/Arab domain using RegCM4. *Arabian Journal of Geosciences*, *9*, 1-14. Doi: https://doi.org/10.1007/s12517-015-2045-7.

6- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., Farokhnia, A., 2022. 'Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model', *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), pp. 11-24. Doi: https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204 (In Persian).

7- Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S.J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R. and Yang, H., 2014. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *hydrological processes*, 28(4), pp.2018-2032. https://doi.org/10.1002/hyp.9747.

8- Bucchignani, E., Mercogliano, P., Rianna, G., & Panitz, H. J. 2016. Analysis of ERA-Interim-driven COSMO-CLM simulations over Middle East–North Africa domain at different spatial resolutions. *International Journal of Climatology*, *36*(9), 3346-3369. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.4559.

9- Eskani Kazzazi, G. H., 2017. 'Tghyyraqlym simulated effects on water on resources and disaster management of large Karun Basin (The case study: Ahwaz)', *Geography (Regional Planning)*, 6(25), pp. 235-242. Doi: 20.1001.1.22286462.1395.7.1.35.1 (In Persian).

10- Gebisa, B.T., Dibaba, W.T. and Kabeta, A., 2023. Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future climate change projections in the Baro River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 14(8), pp.2680-2705. Doi: https://doi.org/10.2166/wcc.2023.032.

11- Habibi, A., and Kolahi, B., 2022. *Structural equation modeling and factor analysis*, Academic Jihad. (In Persian).

12- Hasheminasab, S., Rahimi, D., Zakerinejad, R., & Kropáček, J., 2022. Assessment of climate change impact on surface water: A case study—Karoun river Basin Iran. *Arabian Journal Of Geosciences*, 15(9), 904. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09969-5.

13- Hamed, M. M., Sobh, M. T., Ali, Z., Nashwan, M. S., & Shahid, S., 2024. Aridity shifts in the MENA region under the Paris Agreement climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, *238*, 104483. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104483.]

14- He, M., Chen, Y., Sun, H. and Liu, J., 2023. Projected Changes in Precipitation Based on the CMIP6 Optimal Multi-Model Ensemble in the Pearl River Basin, China. *Remote Sensing*, 15(18), p.4608. Doi: https://doi.org/10.3390/rs15184608.

15- IPCC, 2022, Change, I.P.O.C., 2001. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Genebra, Suíça..

16- Jahangir, M. H., Asadi, A., Noroozi, E., Talei, M., 2020. 'Forecasting of Precipitation in Karkheh Catchment Area through LARS-WG Model', *Journal of Ecohydrology*, 7(4), pp. 981-992. Doi: 10.22059/IJE.2020.302480.1328 (In Persian).

17- Khorshiddoust, A. M., Banafsheh, M. R., Mirhashemi, H., & Kakolvand, Y., 2016. Studying the trend of changes in precipitation-discharge the Karkhe Rive Sub-Basin using non-parametric methods, case study: Kashkan Basin. *Irrigation Sciences and Engineering*, *38*(4), 177-188. (In Persian).

18- Khosravi, M., Ismailnejad, M., and Nazaripour, H., 2010. Climate change and its impact on water resources in the Middle East. *International Congress of Geographers of the Islamic World*, -(4), pp. 0-0. SID. Doi: https://sid.ir/paper/484264/fa (In Persian).

19- Mahato, A., Upadhyay, S. and Sharma, D., 2022. Global water scarcity due to climate change and its conservation strategies with special reference to India: a review. *Plant Archives (09725210),* 22(1). http://dx.doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2022.v22.no1.009.

20- Mesgari, E., Hosseini, S. A., Hemmesy, M. S., Houshyar, M., & Partoo, L. G., 2022. Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change*, *13*(10), 3607-3619. https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195.

21- Mollaienia, M.R., Mousavi, Z.A. and Mohammadi, M., 2024. Flood modeling in the Qarasu River catchment using four-dimensional vine copulas. *Journal of Climate Research*, *1403*(57), pp.101-118. DOI: 10.22034/jcr.2024.190468.

22- Mukheef, R. A., Hassan, W. H., & Alquzweeni, S. J. A. R., 2024. Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: A case study of Iraq's Middle and West. *Atmospheric Research*, *306*, 107470. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107470.

23- Nguyen-Duy, T., Ngo-Duc, T. and Desmet, Q., 2023. Performance evaluation and ranking of CMIP6 global climate models over Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 14(6), pp.1831-1846. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.454.

24- Peng, S., Wang, C., Li, Z., Mihara, K., Kuramochi, K., Toma, Y. and Hatano, R., 2023. Climate change multi-model projections in CMIP6 scenarios in Central Hokkaido, Japan. *Scientific Reports*, 13(1), p.230. Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-022-27357-7.

25- Rahimiani Iranshahi, H. , Moradi, H. R. and Jalili, K., 2022. Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, *2*(2), 1-12. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9520.1048 (In Persian).

26- Roshani, A., and Mehdi, H., 2021. Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature and precipitation based on CMIP6 models (case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), pp. 781-795. Doi: 10.22059/JWIM.2022.330603.920 (In Persian).

27- Saharwardi, M. S., Dasari, H. P., Hassan, W. U., Gandham, H., Pathak, R., Zampieri, M., ... & Hoteit, I. (2025). Projected increase in droughts over the Arabian Peninsula and associated uncertainties. *Scientific Reports*, *15*(1), 1711. https://doi.org/10.1038/s41598-025-85863-w.

28- Salman, S. A., Hamed, M. M., Shahid, S., Ahmed, K., Sharafati, A., Asaduzzaman, M., ... & Dewan, A., 2022). Projecting spatiotemporal changes of precipitation and temperature in Iraq for different shared socioeconomic pathways with selected Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. *International Journal of Climatology*. http://dx.doi.org/10.1002/joc.7794.

29- Semenov, M.A., 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, 35(3), pp.203-212. DOI: https://doi.org/10.3354/cr00731.

29- Semenov, M.A. and Stratonovitch, P., 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*, 65, pp.123-139. DOI: https://doi.org/10.3354/cr01297.

30- Sime, C.H. and Dibaba, W.T., 2023. Evaluation of CMIP6 model performance and extreme precipitation prediction in the Awash basin. Heliyon, 9(11). Doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21578.

31- Shafiei, M., Bazrafshan, J. and Irannejad, P., 2018. Assessment of the role of rainfall in river flow drought retrieval in the Karkheh basin. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *1*(1), pp.39-52. (In Persian).

32- Xie, F., Chandan, D., & Peltier, W. R., 2024. Dynamical Downscaling of the Mid-Holocene Climate Using a Coupled Atmosphere-Ocean Model Over the Mediterranean, North Africa and Middle East Regions. *North Africa and Middle East Regions*. Doi: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4723699.

33- Yang, X., Sun, W., Wu, J., Che, J., Liu, M., Zhang, Q., Wang, Y., Huai, B., Wang, Y. and Wang, L., 2023. Evaluation and projection of precipitation in CMIP6 models over the Qilian Mountains, China. Remote Sensing, 15(17), p.4350. Doi: https://doi.org/10.3390/rs15174350.

34- Zareian M., 2022. Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation in Yazd Province Based on Combined Output of CMIP6 Models. *jwss 2022*; 26 (2), pp. 91-105. Doi: 10.47176/jwss.26.2.31501 (In Persian).

35- Zohrabi N, Massah Bavani A, Goodarzi E, Heidarnejad M., 2016. Identify Trend in the Annual Temperature and Precipitation in Karkheh River Basin. *Wetland Ecobiology*, 8 (2) :5-22 URL: http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-434-fa.html (In Persian).

36- Zhai, J., Mondal, S.K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., Tao, H., Wang, G., Ullah, W. and Uddin, M.J., 2020. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, *246*, pp.105111. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 73-88

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

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Studying the effect of different fertilization strategies on the output nitrate of irrigation network using SWAT model (Case study: Dez irrigation and drainage network)

A. Bakhtiarifar[1], M. Albaji[2*], M. Golabi[3], S. Boroomandnasb[4] and A. Shahnazari[5]

1- PhD. Student of irrigation and drainage, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz , Ahvaz, Iran
2- Corresponding Author, Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, (m.albaji@scu.ac.ir)*
3- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
4- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
5- Professor of Water Engineering Department, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 11 July 2024
Revised: 1 October 2024
Accepted: 27 October 2024
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Simulation, SWAT, Fertilization Scenario, Agriculture, Water Resources Pollution.

TO CITE THIS ARTICLE:

Bakhtiarifar, A., Albaji, M., Golabi, M., Boroomandnasab, S., Shahnazari, A. 2026. 'Studying the effect of different fertilization strategies on the output nitrate of irrigation network using SWAT model (Case study: Dez irrigation and drainage network)', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 73-88. doi: 10.22055/jise.2024.43688.2075.

Abstract

Increasing population and demand require increasing production per unit area. Competition for increased yield has led to excessive use of chemical fertilizers. Excessive use of chemical fertilizers and discharge of agricultural land drainage containing these compounds leads to pollution of water resources. Therefore, in the present study, the effect of different fertilization strategies on the amount of nitrate output in the irrigation and drainage network of the Dez River was investigated using the SWAT model. The calibration and validation of the model to simulate the amount of nitrate was carried out using statistical data from 1995 to 2017 at the network outlet (Bamdej station). To achieve the objectives of the present study, information related to the agricultural management of the region, including cropping pattern and planting and harvesting dates, irrigation rate and time, and fertilization rate, were entered into the model based on the information received for the study basin level. In order to evaluate the effect of fertilization rate on surface water quality, scenarios for reducing fertilization rate were introduced into the model. The results of model evaluation using R^2 and NSE coefficients indicate the appropriate performance of the model in simulating the mentioned parameters. The results of applying fertilizer reduction scenarios showed that by applying 10, 20, 30, 40, 50, 60 and 70 percent reduction in fertilizer, nitrate was reduced by 2.74, 9.31, 11.25, 14.83, 17.95, 21.23 and 26.62, respectively. According to the findings of this study, it can be said that due to the high impact of fertilization, by controlling the amount of fertilizer used, pollution of surface water resources can be controlled to a large extent.

Introduction

The use of chemical fertilizers to increase crop production has caused the agricultural sector to be considered the main polluter of water resources. Because the chemical fertilizers used contain various compounds such as nitrate, phosphate and ammonium, which are the most dangerous polluting compounds in water resources. Pollution of water resources may cause the loss and

limitation of drinking water, livestock drinking water, irrigation, aquatic life and recreational activities. Loss of nitrogen and phosphorus nutrients from agricultural fields to surface waters reduces water quality and leads to environmental damage (Zhang and Zhang2011). Currently, the use of chemical fertilizers has become an inseparable part of the agricultural production process, and its consumption is increasing. (Qiang and YuSchilling, 2021).

Today, with the development of science and technology, the use of mathematical models to assess the quality of water resources and develop various management scenarios to improve conditions has become widespread. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a hydrological model that is widely used internationally and in the United States for water quality and natural resource management. (Giri et al., 2016).

Materials and Methods

The Dez irrigation and drainage network, located in the north of Khuzestan province, with an area of 125,000 hectares, is one of the largest networks in Iran, in which advanced methods are used for irrigation and drainage of lands. The water required for this project is supplied from the Dez River, and in order to control, contain, and regulate its water flow, reservoir, regulating, and diversion dams have been constructed on this river (KWPA Technical Rep., 2016.).

In the present study, the SWAT hydrological model, version 2012, was used to evaluate the effect of fertilization on the nitrate level of the irrigation and drainage network of Dez.

In order to achieve the objectives of the present study, the required information was collected in six sections including: climatic, hydrometric, physiographic, soil data, land use map and agricultural activities. Data related to temperature, rainfall, relative humidity and evaporation were prepared daily from synoptic and meteorological stations during the statistical period from 1993 to 2017 and introduced into the model. In order to prepare hydrological response units (HRU), a Digital Elevation Model (DEM) with a resolution of 50 meters, FAO global soil map and a land use map of the region in eight classes were used. Also, the cropping pattern, yield and fertilization of products were prepared based on data received from the Agricultural Jahad Organization of Khuzestan Province and introduced into the model. On the other hand, daily data from five hydrometric stations of Bamdej, Harmaleh, Pol-e Shavour, Shushtar and Arab-e Asad were used to calibrate and validate the SWAT model. Finally, to investigate the effect of fertilization on the amount of nitrate output in the study area, scenarios of 10, 20, 40, 30, 50, 60, and 70 percent reduction in fertilization were implemented in the model, respectively.

Results and discussion

According to the results obtained, June has the highest nitrate load and March has the lowest load. One of the reasons for the increase in nitrate in June could be the increase in fertilizer consumption in order to prepare the land for the second crop. The application of scenarios also had the greatest impact in this month. In March, due to the final stages of plant growth, fertilizer consumption and consequently nitrate load also decreased. According to the results presented, during the statistical period, especially in low nitrate amounts, the scenarios do not differ much in reducing nitrate levels. This could be due to the stability of nitrate compounds in soil and water resources. On the other hand, the least impact on the amount of nitrate pollution load in the evaluated statistical period is related to scenario 10 and the greatest impact is related to scenario 70**.**

Conclusion

The results of applying fertilization scenarios to the pollution level show that the highest average reduction in nitrate by 26.62 was achieved in the 70% reduction in fertilization scenario, and a 10% reduction in fertilization led to a 74.2% reduction in nitrate output.

According to the results obtained, various factors such as fertilization time, irrigation rate, irrigation method, and the amount of fertilizer required by crop patterns can affect the level of surface water pollution. According to the results obtained, for the qualitative protection of water resources, an important step can be taken in the control of chemical fertilizers by spending money and making appropriate policies. Optimal use of fertilizers, replacing organic fertilizers with

chemical fertilizers, providing banking education to farmers to use modern fertilization and irrigation equipment and methods at the farm level, and also increasing the purchase price of agricultural products can, in addition to reducing water resource pollution, lead to improved plant performance in conditions of reduced fertilizer consumption and preventing a decrease in farmer's profits. In this direction, the use of models such as SWAT, which has the ability to evaluate different management scenarios at the watershed level, can be an effective solution for developing water and soil management programs.

It is necessary to examine the impact of applying fertilizer reduction scenarios on plant performance and its economic impact simultaneously so that a logical and comprehensive analysis can be carried out in the field and then the appropriate decision can be made.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number (GN: SCU.WI98.280)

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Abbas Bakhtiarifar, data analysis.
Second Author: Mihammad Albaji, data analysis, writing the article.
Third Author: Mona Golabi, results analysis.
Fourth author: Saeed Boroumandnasb, results analysis.
Fifth author: Ali Shahnazari, writing the article.

Acknowledgements

We are grateful to the Research Council of Shahid Chamran University of Ahvaz for financial support. The authors also express their sincere gratitude for the cooperation of the Khuzestan Water and Power Authority in providing periodic statistics and information related to the irrigation and drainage network of Dez and hydrometric stations of the study area.

References

1- Annual report of Khuzestan Water and Electricity Organization, 2016. Exploitation of irrigation networks in North Khuzestan region, KWPA Technical Rep, p13

2- Giri, S., Qiu, Z., Prato, T. and Luo, B., 2016. An integrated approach for targeting critical source areas to control nonpoint source pollution in watersheds. *Water Resour Management.* Volume 30, 5087–5100. DOI: 10.1007/s11269-016-1470-z

3- Qiang, W and YuSchilling, H., 2021. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution in a watershed with SWAT–ECM and AHP methods. *Hydrology Research* Vol 52 No 6, 1184 DOI: 10.2166/nh.2021.010.

4- Zhang, X. and Zhang, M., 2011. Modeling effectiveness of agricultural BMPs to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff. *Journal of Science of the Total Environment*, 409(10):1949-1958. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.02.012

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۸۸-۷۳

بررسی تأثیر استراتژی‌های مختلف کوددهی بر روی میزان نیترات خروجی شبکه آبیاری با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی دز)

عباس بختیاری‌فر[۱]، محمد الباجی[۲*]، منا گلابی[۳]، سعید برومندنسب[۴] و علی شاهنظری[۵]

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ،ایران.

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه آبیاری وزهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران(m.albaji@scu.ac.ir)

۳- دانشیار ، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۴- استاد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست ، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۵- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری ساری ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۱ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

افزایش جمعیت و تقاضا مستلزم بالا بردن میزان تولید در واحد سطح است. رقابت برای افزایش عملکرد موجب استفاده‌ی بیش‌ازحد از کودهای شیمیایی شده است. مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی و تخلیه زهاب اراضی کشاورزی حاوی این ترکیبات منجر به آلودگی منابع آب می‌شود. لذا در پژوهش حاضر تأثیر استراتژی‌های مختلف کوددهی بر میزان نیترات خروجی در شبکه آبیاری و زهکشی رودخانه دز با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفت. واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای شبیه‌سازی میزان نیترات با استفاده از داده‌های آماری سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷ در خروجی شبکه (ایستگاه بامدژ) صورت گرفت. برای دست‌یابی به اهداف مطالعه حاضر اطلاعات مربوط به مدیریت کشاورزی منطقه شامل الگوی کشت و تاریخ کاشت و برداشت، میزان و زمان آبیاری و میزان کود دهی براساس اطلاعات دریافتی برای سطح حوضه مورد مطالعه وارد مدل شد. به‌منظور ارزیابی تأثیر میزان کود دهی بر کیفیت آب‌های سطحی سناریوهای کاهش میزان کود دهی به مدل معرفی شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل با استفاده از ضرایب R^2 و NSE نشان دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور می‌باشد. نتایج حاصل از اعمال سناریوهای کاهش کوددهی نشان داد با اعمال ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصد کاهش کوددهی، نیترات به‌ترتیب به میزان ۲/۷۴، ۹/۳۱، ۱۱/۲۵، ۱۴/۸۳، ۱۷/۹۵، ۲۱/۲۳ و ۲۶/۶۲ کاهش یافت. مطابق یافته های این تحقیق می توان گفت با توجه به تأثیر بالای کود دهی، با کنترل میزان کود مصرفی می‌توان تا حدود زیادی آلودگی منابع آب سطحی را کنترل نمود.

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی، SWAT، سناریو کوددهی، کشاورزی، آلودگی منابع آب.

مقدمه

بعد از دسترسی به آب آشامیدنی، دسترسی و تأمین غذا اصلی ترین و مقدم ترین نیاز انسان‌هاست. از این رو کشاورزی یک عامل اساسی و بخش غالب اقتصاد جهانی است. کشاورزی همواره به‌عنوان بزرگترین مصرف کننده منابع آب شیرین، یعنی حدود ۶۹ درصد کل منابع آب استحصالی در جهان است (UN World Water Development Report 2021,Albaji.,2010,).

از میان بخش‌های مختلف تولیدی، بخش کشاورزی بیش‌ترین و نزدیک‌ترین ارتباط را با محیطزیست دارد. این ارتباط یک رابطه متقابل دو سویه است، از یک طرف فرسایش و تخریب محیطزیست، تولید و عملکرد محصولات کشاورزی را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد و از جانب دیگر مواد آلاینده بخش کشاورزی و مصرف بی‌رویه کودها و سایر مواد شیمیایی در این بخش، صدمات جبران‌ناپذیری به محیطزیست وارد می‌کند. افزایش جمعیت نیاز به آب و محصولات کشاورزی را تشدید نموده و در نتیجه به منظور افزایش تولید مواد غذایی فعالیت‌های کشاورزی نیز به همان اندازه افزایش یافته است (Bindra et al.,2014, Naseri et al.,2009 ,).

مصرف کودهای شیمیایی به‌منظور افزایش تولید محصولات سبب شده است که بخش کشاورزی اصلی‌ترین آلوده‌کننده منابع آب محسوب شود. چرا که کودهای شیمیایی مصرفی دارای ترکیبات مختلفی نظیر نیترات، فسفات و آمونیوم هستند که خطرناک‌ترین ترکیبات آلوده‌کننده در منابع آبی می‌باشند. آلودگی منابع آب ممکن است باعث از بین رفتن و محدود شدن آب‌های آشامیدنی، آب شرب دام‌ها، آبیاری، حیات آبزیان و فعالیت‌های تفریحی شود. تلفات مواد مغذی نیتروژن و فسفر از مزارع کشاورزی به آب‌های سطحی کیفیت آب را کاهش داده و منجر به خسارات زیست‌محیطی می‌گردد (Zhang and Zhang2011). امروزه استفاده از کودهای شیمیایی بخش جدایی‌ناپذیر از فرایند تولید محصولات

DOI: 10.22055/jise.2024.43688.2075

کشاورزی گردیده است و روند مصرف آن در حال افزایش است. (Qiang and YuSchilling, 2021)

تأثیر فعالیت‌های کشاورزی بر کمیت و کیفیت منابع آب سبب شده است که در دهه‌های اخیر رویکردها و استراتژی‌های مدیریت کشاورزی بر روی روش‌های کاهش مصرف آب و کاهش میزان آلاینده‌ها متمرکز شود. در همین راستا استفاده از روش‌هایی نظیر کاهش مصرف کود به‌منظور بهبود وضعیت کمی و کیفی منابع آب گسترش یافته است. بنابراین به‌کارگیری استراتژی‌های مدیریتی زمانی مؤثر واقع می‌شود که مورد ارزیابی قرار گرفته و تمامی جوانب مثبت و منفی آن‌ها مشخص شود. عدم ارزیابی این استراتژی‌ها ممکن است منجر به تشدید شرایط بحرانی منابع آب موجود در یک منطقه شود. لذا بررسی میزان تأثیر این استراتژی‌ها بر وضعیت منابع آب به‌خصوص در زمینه کیفی حائز اهمیت فراوانی می‌باشد. امروزه با گسترش علم و فناوری، استفاده از مدل‌های ریاضی به‌منظور ارزیابی کیفیت منابع آب و تدوین سناریوهای مختلف مدیریتی برای بهبود شرایط گسترش فراوانی یافته است. ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) یک مدل هیدرولوژیکی است که به‌طور گسترده در سطح بین‌المللی و در ایالات متحده برای کیفیت آب و مدیریت منابع طبیعی مورد استفاده قرار می گیرد. مدل SWAT مدلی انعطاف‌پذیر است که قادر به شبیه‌سازی پاسخ حوضه‌ها از حوضه‌های کوچک تا حوضه رودخانه‌های بزرگ به‌عنوان تابعی از کاربری اراضی ، مدیریت و سیستم‌های برداشت محصول ، ویژگی‌های شکل اراضی و شرایط آب و هوا است. این مدل می‌تواند از مدیریت دقیق کشاورزی استفاده کند، و آن را به‌صورت ویژه‌ای برای شبیه‌سازی پاسخ حوضه‌های آبخیز کشاورزی مناسب می‌کند (Ababei, and Sohrabi. 2009; Arnold et al., 1998; Giri et al., 2016 and Neitsch et al,. 2011).

مطالعه‌های مختلفی در سراسر دنیا برای ارزیابی توانایی مدل SWAT در ارائه راهکارهای مدیریتی به‌منظور بهبود کیفیت منابع آب‌وخاک صورت گرفته است. Schilling و Wolter (2009)، میزان بار آلودگی مواد مغذی در رودخانه Des Moines را با استفاده از مدل SWAT مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که منابع غیرنقطه‌ای ۹۵ درصد از کل بار نیترات خروجی از حوضه را شامل می‌شوند و کاهش میزان مصرف کود از ۱۰۰ به ۵۰ کیلوگرم در هکتار می‌تواند کاهش ۳۸ درصدی در بار مواد مغذی را سبب شود و بیش‌ترین کاهش بار آلودگی هنگامی رخ داد که کاهش کود دهی در مناطق نزدیک خروجی زیرحوضه‌ها انجام گرفت. Jingyuan et al (2014)، در مطالعه‌ای به ارزیابی منابع آلودگی غیرنقطه‌ای حوضه رودخانه Liuxi با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تغییر شیوه‌های خاک‌ورزی مرسوم و میزان کود دهی در کاهش آلودگی‌های NPS مؤثر می‌باشد. Nazari-Sharabian et al (2019) در پژوهشی به مدل‌سازی کیفیت آب سیستم حوضه – مخزن سد مهاباد در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از SWAT و دینامیک سیستم پرداختند. نتایج نشان داد که سناریوهای تغییر در مدیریت فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و دام‌پروری می‌تواند موجب حفظ منابع آب و کنترل آلودگی مخزن سد مهاباد شود.

Zarei Gorkhodi et al (2022) به شبیه‌سازی پارامترهای رواناب، رسوب در حوضه آبریز رودخانه تجن با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که مدل توانایی مناسبی در ارزیابی پارامترهای کمی و کیفی، فرایندهای هیدرودینامیکی و سناریوهای مدیریتی به‌منظور استفاده مجدد از پساب برای مصارف کشاورزی ارائه نموده است. Wu و Yu (2021) برای شناسایی مناطق منبع بحرانی (CSAs) برای مدیریت آلودگی منابع غیر نقطه ای (NPS) حوضه‌های آبخیز DRW، واقع در بخش شمالی استان هنان و بخش جنوبی استان شانشی از مدل ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) استفاده نمودند. و روش ضریب صادرات (ECM)برای تعیین کمیت فاکتورهای S نیتروژن آمونیاکی (NH4-N)و فسفر کل (TP) به‌عنوان آلودگی NPS ترکیب شدند. نتایج نشان داد که این CSA ها ۲۳/۸۶ درصد از کل مساحت را به خود اختصاص دادند و ۵۴/۹۴ درصد از NH4-N و ۴۲/۵۹ درصد از بارهای TP را ایجاد کردند. Li et al (2021) برای ارزیابی اثرات شیوه‌های مدیریت اراضی در کاهش بارهای آلودگی NPS بااستفاده از مدل SWAT مطالعه‌ای را در حوضه رودخانه Bah در شمال غربی چین، انجام دادند. نتایج نشان داد که توزیع مکانی شدت تلفات نیتروژن و فسفر با بارندگی و رواناب همبستگی مشخصی دارد و همبستگی بین شدت تلفات فسفر و شدت هدررفت رسوب معنی‌دارتر است. همچنین بار آلودگی NPS ارتباط نزدیکی با الگوی کشت اراضی حوضه رودخانه دارد.

Akhavan و Jodi Hameze Abad (2015) در مطالعه خود با استفاده از مدل SWAT به شبیه سازی آبشویی نیترات در فرآیند یک تناوب زراعی در حوضه آبریز همدان- بهار پرداختند. برای این منظور با استفاده از داده‌های روزانه دبی از هفت ایستگاه SWAT مدل هیدرومتری، عملکرد گندم و سیب زمینی و نیترات روزانه اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه، با استفاده از مدل SWAT_CUP واسنجی و اعتبارسنجی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که کشت سیب زمینی منجر به آبشویی نیترات به میزان ۳۶۱-۲۵۴ کیلوگرم در هکتار در سال (حدود ۴۲ -۳۰ درصد نیتروژن به کار برده شده) می شود.

Sheikhi Grakoui et al (2017) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی بار شوری حاصل از کشت برنج در اراضی شالیزاری و ورود املاح آن به رودخانه تحت دو چرخه فلزات سنگین و نیتروژن در حوضه آبریز ناورود (حوضه معرف غرب استان گیلان)، استفاده و دقت مدل در شبیه‌سازی شوری به دو روش مذکور مقایسه نمود. برای بررسی کارایی مدل از دو شاخص آماری R2 و NS استفاده گردید. مقادیر این دو شاخص در شبیه‌سازی دبی رودخانه ناورود به‌ترتیب ۰/۸۲ و ۰/ ۵۲ و در شبیه‌سازی بار شوری تحت چرخه

فلزات سنگین ۰/۳۰ و ۰/۷۱- و تحت چرخه نیتروژن به‌ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۵۴ به‌دست آمد.

Nouri et al (2016) به بررسی تأثیر بهترین اقدامات مدیریتی در کاهش منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز رودخانه سیمره پرداختند. در این مطالعه، مدل ارزیابی آب‌وخاک (SWAT2009) برای بررسی تأثیر منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای بر روی کیفیت آب رودخانه سیمره در محدوده مطالعاتی زیرحوضه سیمره در حوضه کرخه مورد استفاده قرار گرفت. مدل برای دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۰ واسنجی و سپس برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۰ صحت‌سنجی گردید. ضرایب نش- ساتکلیف و R^2 برای ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. مقادیر این ضرایب نشان داد که مدل SWAT کارایی مناسبی در شبیه‌سازی جریان ماهانه و بار مواد مغذی در حوضه سیمره دارد. نتایج ارزیابی حاکی از آن بود که اجرای کاهش مصرف کودهای شیمیایی و ایجاد نوار فیلتر در طول رودخانه مهم‌ترین اقدامات مدیریتی برای بهبود شرایط کیفی رودخانه می‌باشند.

Sheikh Zainuddin et al. (2015) با بررسی استراتژی‌های مدیریت آبیاری و کودهی بر تلفات نیتروژن با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبریز طشک- بختگان اعلام نمود زمانی که مدل اثرات کاهش مصرف در کود اوره از ۱۰ تا ۷۰ درصد را مدل‌سازی نمود، عملکرد گندم بین یک تا ۲۷ درصد، جو ۰/۸ تا ۲۴، ذرت ۰/۴۲ تا ۲۱ و برنج ۰/۴۷ تا ۸۳/۶ درصد کاهش یافت،این در حالی است که این امر منجر به کاهش تلفات نیترات از طریق آبشویی به میزان ۱۶ تا ۸۱، ۱۸ تا۸۰، ۱۵ تا ۸۵ و ۱۲/۵ تا ۸۳/۶ درصد به‌ترتیب در این محصولات شد. بنابراین با مقایسه تغییرات در عملکرد محصولات و تلفات نیتروژن از طریق آبشویی، این نتیجه حاصل می شود که کاهش قابل توجهی در تلفات نیتروژن میتواند با حداقل هزینه روی عملکرد از طریق بهینه کردن مصرف کود، حاصل شود.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری و زهکشی دز واقع در شمال استان خوزستان، با وسعت ۱۲۵۰۰۰ هکتار و سطح خالص ۹۳۷۵۰ هکتار از بزرگترین شبکه‌های ایران است که در آن از روش‌های پیشرفته برای آبیاری و زهکشی اراضی استفاده می‌شود. آب مورد نیاز این طرح از رودخانه دز تأمین گردیده و برای کنترل، مهار و تنظیم جریان آب آن اقدام به ساخت سدهای مخزنی، تنظیمی و انحرافی بر روی این رودخانه شده است. این شبکه از مجموع تعدادی از کشت و صنعت‌ها، ادارات و باغداران تشکیل شده است. کیفیت آب رودخانه دز از نظر کشاورزی در حد بسیار مطلوب بوده و وجود سه رودخانه دز، کرخه و شاوور باعث گردیده این منطقه یکی از پر آب‌ترین مناطق ایران محسوب گردد. متوسط میزان بارندگی ۳۵۰ میلی‌متر بوده و فصل بارش معمولاً از اواسط آبان آغاز و در اواسط اردیبهشت به پایان می‌رسد.

به‌لحاظ کشاورزی کیفیت اراضی این شبکه در حد مطلوب بوده می‌باشد. اراضی منطقه نسبتاً هموار، متوسط شیب طبیعی آن‌ها حدود یک متر برای هر کیلومتر در جهت شمالی-جنوبی می‌باشد. عمده محصولات کشاورزی منطقه شامل: گندم، ذرت، نیشکر، مرکبات، چغندرقند، سبزیجات می‌باشد. (KWPA Technical Rep,2016.)

در شکل (۱) موقعیت محدوده مطالعاتی نشان داده شده است.

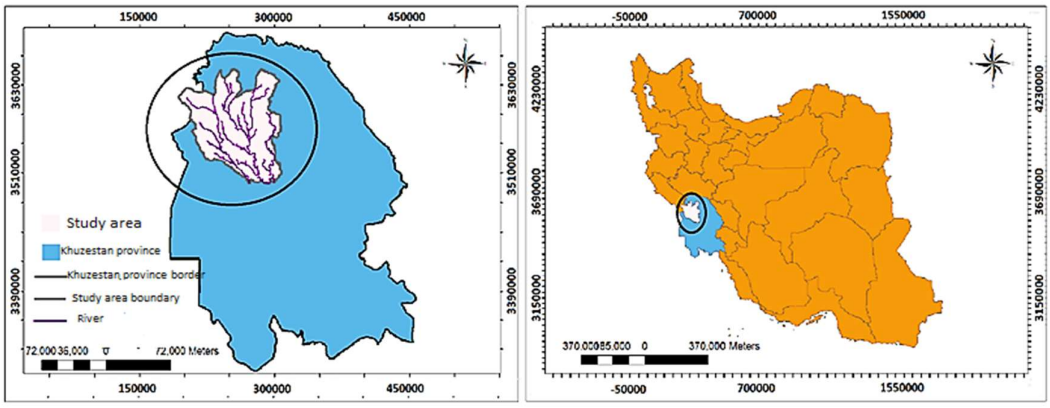


Fig. 1- Location of the study area in the country and Khuzestan province

شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی در کشور و استان خوزستان

DOI: 10.22055/jise.2024.43688.2075

مدل SWAT

در مطالعه حاضر از مدل هیدرولوژیکی SWAT نسخه ۲۰۱۲ به‌منظور ارزیابی تأثیر کود دهی بر میزان نیترات شبکه آبیاری و زهکشی دز استفاده شد. مدل SWAT یکی از مدل‌های جامع ارائه شده توسط سازمان تحقیقات کشاورزی آمریکا در سال ۱۹۹۸ در مقیاس حوضه‌ی آبخیز است (Abbaspour et al., 2007). این مدل به‌منظور بررسی و پیش‌بینی تأثیر روش‌ها و شرایط مختلف مدیریتی بر فرایندهای جریان رواناب، عناصر غذایی و بیلان مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با نوع خاک و کاربری اراضی متفاوت برای دوره‌های زمانی طولانی طراحی شده است. مدل SWAT به‌جای استفاده از روابط رگرسیونی در برقراری ارتباط بین ورودی و خروجی، برای شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی مربوط به مواردی از قبیل حرکت آب، رشد گیاه و سیکل مواد غذایی در خاک نیازمند ورودی‌هایی مانند توپوگرافی، نقشه‌ی خاک، نقشه‌ی کاربری اراضی، داده‌های اقلیمی (بارش، دما، سرعت باد، رطوبت نسبی و تشعشعات خورشیدی)، انتقال آب بین حوزه‌ای، منابع آلودگی نقطه‌ای و روش‌های مدیریتی زمین‌ها است (Abbaspour et al., 2015). در این مدل یک حوضه به چندین زیرحوضه تقسیم می‌شود و سپس هر زیرحوضه به تعدادی واحد پاسخ هیدرولوژیکی Hydrologic Response Unit (HRU) تقسیم‌بندی می‌گردد و جزئیات مکانی را شبیه‌سازی می‌کند. واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) واحد اصلی شبیه‌سازی است که به‌عنوان یک منطقه کلی متشکل از پوشش اراضی، ویژگی‌های خاک و شیب همگن می‌باشد. بخش‌های اصلی مدل شامل هیدرولوژی، اقلیم، واحدهای واکنش هیدرولوژیک، تالاب یا اراضی مرطوب، آب زیرزمینی، فرسایش، رشد گیاهان، چرخه عناصر غذایی، آفتکش‌ها، مدیریت اراضی و روندیابی جریان می‌باشد. شبیه‌سازی چرخه هیدرولوژی در حوضه شامل دو مرحله است (Neitsch et al., 2011). نخستین مرحله فاز زمین چرخه هیدرولوژی است که کنترل‌کننده مقدار آب ، عناصر غذایی و بار آفت کش‌ها در کانال اصلی در هر زیرحوضه است. مرحله دوم، فاز روندیابی چرخه هیدرولوژی است که شامل حرکت آب و غیره در طول شبکه کانال حوضه تا خروجی آن می‌باشد. مدل برای روندیابی مواد مغذی در آبراهه‌ها از مدل QUAL2E استفاده می‌کند. مبانی عملکرد گیاهی در مدل SWAT بر اساس مدل رشد گیاهی Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) می‌باشد که در آن رشد گیاه براساس گرمای روزانه تجمعی شبیه‌سازی می‌شود (Mohammadi et al., 2017). در این مدل رشد گیاهی برمبنای کمبودهای آب، فسفات، نیترات و گرما محدود می‌شود. مدل SWAT برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تحت تأثیر عوامل بسیاری مانند متغیرهای هواشناسی (تابش خورشیدی، دمای متوسط و ...)، متغیرهای گیاهی (شاخص سطح برگ)، متغیرهای مدیریت کشاورزی (کوددهی، تاریخ کشت و برداشت) و متغیرهای آبیاری (عمق و دور آبیاری) می‌باشد (Ahmadzadeh et al., 2013).

چرخه هیدرولوژی بر پایه معادله بیلان آب استوار است که از معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{I=1}^{T}\left(R_{dey} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}\right) \qquad (۱)$$

در رابطه فوق: SW_t : مقدار فعلی آب در خاک، SW_0: مقدار اولیه آب در خاک ، R_{dey}: مقدار بارندگی در روز iام، Q_{surf}: مقدار رواناب در روز iام، E_a: مقدار تبخیر و تعرق در روز iام، W_{seep}: مقدار تبخیر و تعرق روزانه در روز iام، Q_{gw}: مقدار آب وارده شده از پروفیل خاک به ناحیه غیراشباع در روز iام: مقدار جریان برگشتی در روز iام.

داده‌های ورودی به مدل

ورودی‌های مدل شامل نقشه ارتفاعی رقومی منطقه، نقشه کاربری اراضی/ پوشش، نقشه خاکشناسی منطقه و اطلاعات اقلیمی می‌باشد (جدول ۱). اطلاعات توپوگرافی را می‌توان با استفاده از منحنی‌های خطوط تراز در نرم‌افزار ArcGIS تهیه نمود یا از نقشه‌های آماده مراکز استفاده کرد. به‌منظور دستیابی به اهداف پژوهش حاضر اطلاعات مورد نیاز در شش بخش شامل: اقلیمی، هیدرومتری، فیزیوگرافی، داده‌های خاک، نقشه کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی جمع‌آوری شدند. داده‌های مربوط به دما، بارندگی، رطوبت نسبی و تبخیر به‌صورت روزانه از ایستگاه‌های سینوپتیک و هواشناسی طی دوره آماری ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۷ تهیه و به مدل معرفی شد. به‌منظور تهیه واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRU)، از نقشه‌ی رقوم ارتفاعیDigital elevation model (DEM) با رزولیشن ۵۰ متری، نقشه خاک جهانی فائو و نقشه کاربری اراضی منطقه در هشت کلاس استفاده شد. همچنین الگوی کشت، میزان عملکرد و کوددهی محصولات براساس داده‌های دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان تهیه و به مدل معرفی شدند (جدول ۲). از طرفی از اطلاعات روزانه پنج ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده شد (جدول ۳). نقشه (DEM)، جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری، نقشه خاک، نقشه کاربری اراضی حوضه مطالعاتی در شکل (۲) ارائه شده است. در نهایت برای بررسی میزان تأثیر کوددهی بر میزان نیترات خروجی در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب سناریوهای کاهش ۱۰، ۲۰، ۳۰،۴۰، ۵۰، ۶۰ و۷۰ درصد کوددهی در مدل اجرا شد.

جدول ۱- اطلاعات ورودی به مدل برای شبیه‌سازی شبکه آبیاری زهکشی دز

Table 1- Input information to the model for simulating Dez irrigation and drainage network

Data	Data source
(DEM) Digital elevation model	
Soil map	(FAO) United States Food and Agriculture Organization
Land use map	Khuzestan Province Agricultural Jihad Organization
Meteorology data	Iran Meteorological Organization
Hydrometric data	Khuzestan Water and Power Organization
Management and agricultural data	
Fertilization data	Khuzestan Province Agricultural Jihad Organization

جدول ۲- الگوی کشت و میزان کود دهی محصولات زراعی اعمال شده در مدل SWAT

Table 2- Cultivation pattern and fertilization rate of crops applied in SWAT model

Row	Product	Cultivation percentage	Planting date	Harvest date	Performance) (Ton/ha	Amount of fertilizer (Kg/ha) used	
						Urea	Phosphorus
1	wheat	33	1December	20May	4/08	300	100
2	corn	25	21July	12October	6	400	100
3	Sugarbeet	7	2October	10May	67	350	100
4	Alfalfa	6	2October	19March	18/5	100	50
5	barley	6	1December	15May	3	250	75
6	vegetables	7	2October	30April	22	150	50
7	tomato	3	1December	19April	40	200	100
8	onion	3	1September	10March	40	200	100
9	sunflower	4	29February	1August	2/5	200	100
10	Citrus	6	-	21November	10	400	100

جدول ۳- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه

Table 3- Specifications of the hydrometric stations of the studied area

Row	Station name	River	Eevation	Longitude	Latitude
1	Bamdej	Dez	20	37-68-48	08-41-31
2	Harmaleh	Dez	38	24-31-48	82-57-31
3	Shawoor bridge	Shawoor	60	03-15-48	09-03-32
4	Shushtar	Karon	1215	07-85-48	00-05-32
5	Arab asad	Karon	26	33-88-48	19-85-31

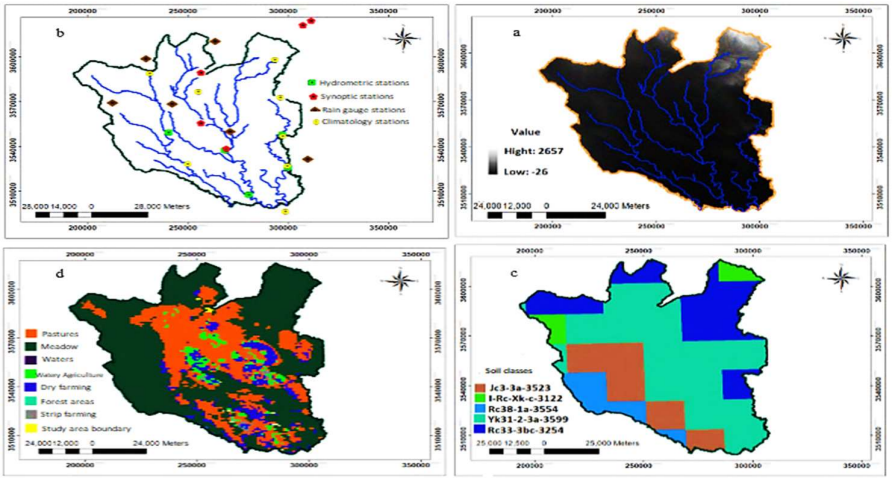


Fig. 2- a: elevation map, b: location map of hydrometric stations, c: soil map, d: land use

شکل ۲- a: نقشه رقوم ارتفاعی، b: نقشه جانمایی ایستگاه‌های هیدرومتری، c: نقشه خاک، d: کاربری اراضی

DOI: 10.22055/jise.2024.43688.2075

آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی

مدل‌های هیدرولوژیک توزیع شده از جمله SWAT دارای پارامترهای زیادی هستند که بهینه‌سازی پارامترها به‌وسیله عملیات واسنجی و اعتبارسنجی صورت می‌پذیرد که به‌علت پیچیدگی مدل واسنجی دستی مشکل و تقریباً ناممکن است. بنابراین SWAT–CUP یک برنامه عدم قطعیت مدل SWAT است که برای تحلیل حساسیت که منجر به انتخاب پارامترهای کلیدی برای واسنجی مدل SWAT و اعتبارسنجی نتایج، طراحی شده است. با استفاده دو عامل t-test و p-value تست حساسیت مدل ارزیابی می‌شود (Akhavan et al., 2010). t-test نشان‌دهنده حساسیت پارامتر است، هر چه قدرمطلق مقدار t-test بیش‌تر باشد، حساسیت پارامتر بیش‌تر خواهد بود. مقدار p-value نیز اهمیت t-test را نشان می‌دهد به‌طوری که هرچه مقدار p-value کم‌تر باشد با درجه اطمینان بیش‌تری می‌توان گفت که پارامتر حساس است. SWAT – CUP می‌تواند روش‌های مختلف واسنجی و عدم قطعیت را به‌کار گیرد (Moriasi et al., 2007). روش‌های SUFI-2، PSO، GLUE، ParaSol و الگوریتم‌های مونتکارلو و زنجیره مارکوف برای واسنجی مدل به‌کار می‌رود .الگوریتم SUFI-2 یکی از برنامه‌های بسته نرم‌افزار SWAT – CUP است که در بسیاری از منابع برای انجام واسنجی از آن استفاده می‌شود. به‌منظور برازش صحیح میان مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی از دو فاکتور P-factor و R- factor استفاده می‌شود. معیار P-factor بیانگر درصدی از داده‌های اندازه‌گیری شده است که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد (ppu۹۵) قرار می‌گیرند. معیار R-factor نیز از تقسیم ضخامت باند ppu۹۵ بر انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده به‌دست می‌آید که مقدار آن هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده شبیه‌سازی بهتری است (NeitSch et al., 2011).

ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل SWAT روش‌های مختلفی به کار می‌رود که ضریب تعیین و ضریب نش – ساتکلیف از مهم‌ترین آن‌ها می‌باشد. هرکدام از این شاخص‌ها در محدوده‌های مشخصی قرار می‌گیرند. در جدول (۴) محدوده ضرایب NSE و R_2 ارائه شده است.

ضریب تعیین (R^2)

ضریب تعیین (R^2) درجه خلوص بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را بیان می‌کند. ضریب همبستگی که از ۱– تا ۱ متغیر است، شاخصی است که رابطه خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را بیان می‌کند. اگر این شاخص برابر صفر باشد به معنای این است که هیچ رابطه خطی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود ندارد، اگر برابر ۱– یا ۱ باشد به‌معنای این است که رابطه خطی منفی یا مثبت کامل بین داده‌های شبیه‌سازی شده با مشاهداتی وجود دارد. R^2 در محدوده صفر تا ۱ قرار دارد و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده واریانس خطای کم‌تر است و معمولاً مقادیر بالاتر از ۰/۵ قابل قبول است.

$$R^2 = \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}(o_i-\bar{o})\times(p_i-\bar{p})\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(o_i-\bar{o})^2}\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(p_i-\bar{p})^2}}\right] \qquad (۲)$$

که در آن: n: تعداد مشاهدات، oi: مقادیر مشاهده شده، pi: مقادیر شبیه‌سازی‌شده، $\bar{o}$: میانگین مقادیر مشاهده شد، : $\bar{p}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی شده.

ضریب نش- ساتکلیف (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i^{obs}-y_i^{sim}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i^{obs}-y_i^{mean})^2} \qquad (۳)$$

ضریب نش – ساتکلیف (NSE) بیانگر اختلاف نسبی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده می‌باشد (Nash and Sutcliffe, 1970). مقدار این فاکتور بین یک تا منفی بی‌نهایت متغیر می‌باشد. ضریب نش – ساتکلیف تغییرات مقادیر مشاهداتی را که در طول زمان رخ داده و مورد توجه مدل SWAT می‌باشد را تفسیر می‌کند. تفاوت اساسی بین ضریب نش و R^2 در این است که ضریب نش قادر است با تکرار داده‌های مشاهداتی عملکرد مدل را تفسیر نماید. درصورتی‌که ضریب R^2 این توانایی را ندارد (Gassman., 2007). که در آن: y_i^{obs}: مقادیر مشاهده شده، y_i^{sim}: مقادیر شبیه‌سازی‌شده، y_i^{mean}: میانگین مقادیر مشاهده شده است.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

در این تحقیق اثر سناریوهای مختلف کاهش کود دهی (کاهش ۱۰تا ۷۰درصد) برمیزان خروجی شبکه آبیاری و زهکشی در مورد بررسی قرار گرفت. پس از مدل‌سازی، منطقه مورد مطالعه به ۵۶ زیر حوضه تقسیم شد که با توجه به نقشه‌های خاک، کاربری اراضی و شیب ۹۲۵ واحد واکنش هیدرولوژیکی (HRU) تشکیل شد. بیش‌ترین مصرف ترکیبات نیترات در اراضی کشاورزی و به‌صورت کودهای نیتراته می‌باشد. غلظت این ترکیبات به میزان نیتروژن آلی و نیتروژن بستگی دارد. میزان تأثیر هرکدام از این پارامترها بر مقدار نیترات متفاوت است. لذا به‌منظور تعیین مؤثرترین پارامتر بر غلظت نیترات فرایند آنالیز حساسیت با هشت پارامتر انجام گرفت نتایج نشان داد غلظت نیترات در سهم آب زیرزمینی در جریان از زیرحوضه (SHALLST_N) و غلظت نیتروژن آلی در کانال (CH_ONCO) در شبیه‌سازی نیترات حساس‌ترین پارامترها در شبیه‌سازی نیترات بودند. همچنین پارامترهای، غلظت اولیه NO_3 در لایه خاک (SOL_NO_3) کم‌ترین حساسیت را در شبیه‌سازی بار نیترات داشتند. مقادیر نهایی حاصل از آنالیز حساسیت

پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی منطقه مورد مطالعه در جداول (۵) و (۶) ارائه شده است.

واسنجی و اعتبارسنجی

واسنجی و صحت‌سنجی در فرایندهای شبیه‌سازی بعد از آنالیز حساسیت مهم‌ترین مراحل مطالعات مدل‌سازی پارامترهای کیفی منابع آب می‌باشند. در پژوهش حاضر نیز واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWA در شبیه‌سازی نیترات موجود در شبکه آبیاری و زهکشی دز و ایستگاه بامدژ واقع در خروجی حوضه صورت گرفت. علاوه‌بر این ارزیابی توانایی مدل نیز با استفاده از شاخص‌های R-factor، P-factor، ضریب تبیین (R2) و ضریب نش- ساتکلیف (NSE) انجام شد. برای انجام واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی پارامتر نیترات به‌ترتیب از دوره‌های آماری ۲۰۱۲- ۱۹۹۵ و ۲۰۱۷-۲۰۱۳ استفاده شد. در جدول (۷) و شکل (۳) نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است.

مقادیر دو شاخصP-factor، R-factor، در مرحله واسنجی به‌ترتیب برابر با (۰/۱۷) و (۰/۰۸) و در مرحله صحت‌سنجی (۰/۰۹) و (۰/۰۴) می‌باشد و باتوجه به مقادیر این دوشاخص کارایی مدل در مرحله واسنجی بالاتر بوده است. نتایج ارزیابی مدل با استفاده از دو شاخص(۸۰/۰) R^2 و (۵۶/۰) NSE در مرحله واسنجی عملکرد خوب مدل را در شبیه‌سازی نیترات نشان می‌دهد. در مرحله صحت‌سنجی نیز مقادیر این شاخص‌ها به‌ترتیب (۰/۵۷) و (۰/۴۷) است، که بیانگر توانایی مناسب مدل SWAT در ارزیابی نیترات ایستگاه بامدژ می‌باشد. مقادیر به‌دست آمده برای شاخص‌های R^2 و NSE در پارامتر نیترات در محدوده‌های به‌دست آمده از یافته‌های Abbaspour et al (2015) , Misaghi و Nouri (2017) و Nouri (2016) قرار گرفته‌اند.

جدول ٤- محدوده‌های ضرایب NSE و R^2 (Basaltpour and Hosseinzadeh, 2016)

Table 4- Ranges of NSE and R^2 coefficients (Basaltpour and Hosseinzadeh, 2016)

assessment's result	Nash-Sutcliffe coefficient (NSE)	The coefficient of determination (R^2)
very well	$0.75 < NSE \leq 1$	$0.85 \leq R^2$
Well	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.70 < R^2 \leq 0.80$
Satisfactory	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.60 < R^2 \leq 0.80$
Unacceptable	$NSE \leq 0.50$	$R^2 \leq 0.60$

جدول ٥- دامنه اولیه و بهینه پارامترهای حساس نیترات در مدل شبیه‌سازی‌شده

Table 5- Initial and optimal range of nitrate sensitive parameters in the simulated model

Optimal value	Optimal range	Initial range	Parameter definition	parameter	Row
0.42	.32-.696	0 - 1	Nitrogen diffusion coefficient	r_NPERCO	1
73.84	58.4-85	0-100	Concentration of organic nitrogen in runoff, after application of urban BMP	v_ORGN_CON	2
80.2	79-192	0-200	Organic nitrogen in the base stream	v_LAT_ORGN	3
235.02	0-671	0-1000	Nitrate concentration in the share of groundwater flowing from the subbasin	v_SHALLST_N	4
85.42	42.2-100	0-100	Concentration of organic nitrogen in the channel	v_CH_ONCO	5
1.89	0-3.14	0-5	Organic nitrogen enrichment ratio	v_SOLN_CON	6
58.73	49.8-79.5	0-100	The initial concentration of NO3 in the soil layer	v__SOL_NO3	7
31.19	21.8-43.7	0-100	The initial concentration of organic nitrogen in the soil layer	v__SOL_ORGN	8

DOI: 10.22055/jise.2024.43688.2075

جدول٦- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر مؤلفه‌های بار نیترات
Table 6- Results of the sensitivity analysis of parameters affecting nitrate load

t-stat	p-value	Optima value l	parameter	Row	t-stat	p-value	Optimal value	parameter	Row	Parameter
-1/04	0/44	3/191	v__SOL_ORGN	5	0/12	0/81	2/0235	v_SHALLST_N	1	
0/98	032	1/89	v_SOLN_CON	6	-/24	0/75	8/425	v_CH_ONCO	2	Nitrate load
1/21	018	7/843	v_ORGN_CON	7	0/38	0/64	0/42	r_NPERCO	3	
1/84	0/09	80/2	v_LAT_ORGN	8	0/57	0/54	5/738	v__SOL_NO3	4	

Table 7- Results of SWAT model efficiency in nitrate load simulation
جدول ۷- نتایج حاصل از کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی بار نیترات

StdDev_sim (StdDev_obs)	Mean_sim (Mean_obs)	NSE	R^2	R-factor	P-factor	Criterion/ Station		Parameter
665(491)	618(526)	0/56	0/80	0/08	0/17	Calibrated	Bamdej	load Nitrate
341(304)	399(398)	0/55	0/70	0/04	0/09	Validated		

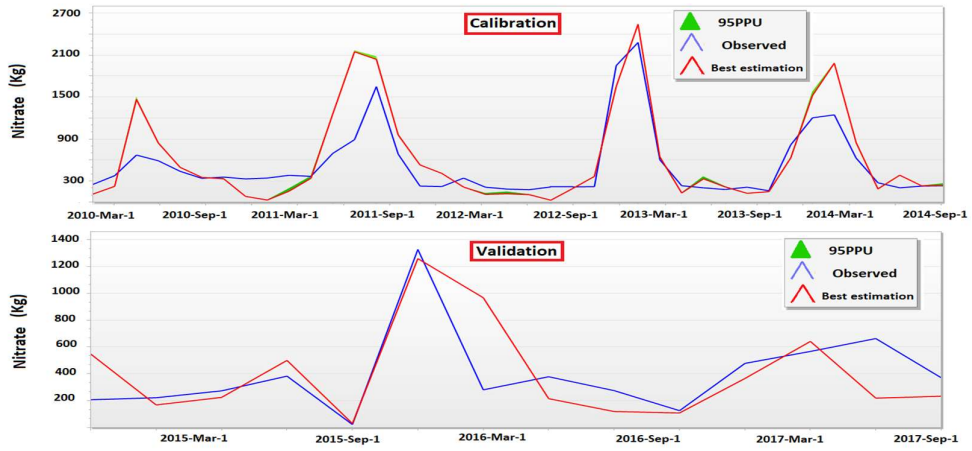


Fig. 3- Results of calibration and verification of nitrate simulation in SWAT model at Bamdej station
شکل ۳- نتایج واسنجی و صحت‌سنجی حاصل از شبیه‌سازی نیترات در مدل SWAT در ایستگاه بامدژ

بررسی تأثیر کاهش میزان کوددهی بر میزان نیترات منطقه

با توجه به رشد جمعیت و نیاز به تولید بیشتر محصولات استفاده از کودهای شیمیایی نیز افزایش یافته است. استفاده بی‌رویه و کنترل نشده از این نهاده‌ها منجر به کاهش کیفیت منابع آب و خاک حوضه آبخیز می‌شود. نیترات، فسفات و آمونیوم ترکیبات اصلی کودهای شیمیایی را تشکیل می‌دهند. زه‌آب خروجی از اراضی کشاورزی که حاصل شستشوی این ترکیبات از سطح خاک می‌باشد یکی از منابع اصلی آلودگی نقطه‌ای آب‌های سطحی می‌باشد. لذا اعمال مدیریت صحیح مصرف این نهاده‌ها به‌منظور ثبات عملکرد گیاه و کاهش آلودگی امری ضروری به‌شمار می‌رود. در پژوهش حاضر نیز تأثیر سناریوهای کاهش کوددهی به میزان ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درصدی بر میزان آلودگی نیترات در شبکه آبیاری و زهکشی دز مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج آن در شکل (۴) و جدول (۷) ارائه شده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده شکل (۴)، ماه ژوئن (تیر-خرداد) بیش‌ترین بار نیترات و ماه مارس (اسفند-فروردین) کم‌ترین بار را به خود اختصاص داده‌اند. یکی از دلایل افزایش نیترات در ماه ژوئن، می‌تواند افزایش مصرف کود به‌منظور آماده‌سازی زمین برای کشت دوم باشد. اعمال سناریوها نیز بیش‌ترین تأثیر را در این ماه داشته است. در ماه مارس با توجه به مراحل انتهایی رشد گیاه مصرف کود و به تبع آن بار نیترات نیز کاهش یافته است. براساس نتایج ارائه شده در طول دوره آماری به‌خصوص در مقادیر کم نیترات سناریوها اختلاف چندانی در کاهش میزان نیترات ندارند. این امر می‌تواند به علت پایداری ترکیبات نیترات در خاک و منابع آب باشد. از طرف دیگر کم‌ترین تأثیر در مقدار بار آلودگی نیترات در دوره آماری مورد ارزیابی مربوط به سناریو ۱۰ و بیش‌ترین تأثیر به سناریو ۷۰ اختصاص دارد نتایج به‌دست آمده با یافته های Sheikh Zainuddin et al (2015) که به بررسی اثر استراتژی های مدیریت آبیاری و کود دهی بر تلفات نیتروژن پرداختند و همچنین مطالعه‌های Misaghi و Nouri (2017) که شبیه‌سازی میزان نیترات ورودی از زمین‌های کشاورزی به رودخانه زنجان رود با استفاده از مدل SWAT را انجام داده بود سازگار می‌باشد. به جز در ماه سپتامبر که سناریوهای ۷۰ و ۶۰ درصد باهم برابر شده‌اند. در خصوص پارامتر نیترات با توجه به پایداری این ترکیبات اعمال این سناریوها در زمان آماده‌سازی زمین که مصرف بیش‌تری صورت می‌گیرد و همچنین جایگزین کردن کودهای ارگانیک برای این عمل می‌تواند بار آلودگی نیترات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

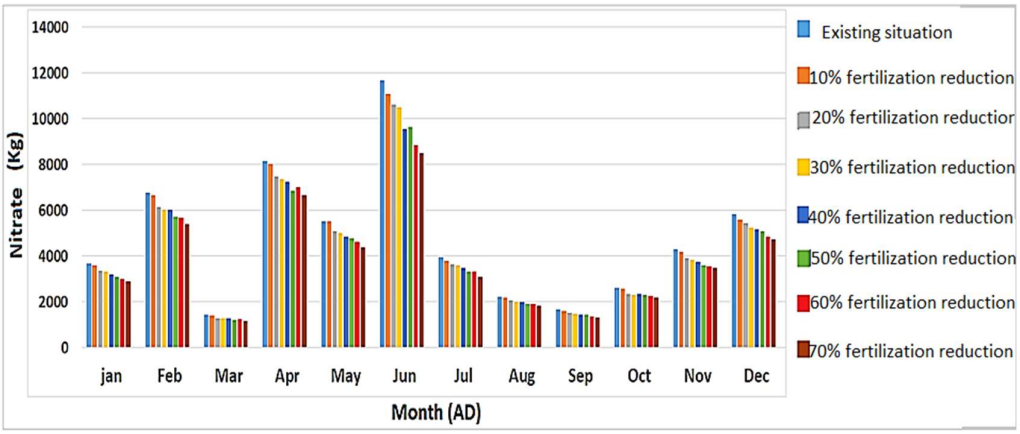


Fig. 4- Average monthly nitrate load and simulated by applying fertilization reduction scenarios

شکل ٤- میانگین بار نیترات ماهانه و شبیه‌سازی شده با اعمال سناریوهای کاهش کود دهی

جدول ۸- تأثیر اعمال سناریوهای کاهش کود دهی بر پارامتر نیترات در منطقه مورد مطالعه

Table 8- Effect of applying fertilizer reduction scenarios on the amount of nitrate in the study area

Parameter	10% fertilizer reduction	20% fertilizer reduction	30% fertilizer reduction	40% fertilizer reduction	50% fertilizer reduction	60% fertilizer reduction	70% fertilizer reduction
Nitrate	-2/74	-9/31	-11/25	-14/83	-17/95	-21/23	-26/62

*Negative values indicate that the applied scenario reduced the studied parameter

DOI: 10.22055/jise.2024.43688.2075

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نیز با هدف بررسی تأثیر استراتژی‌های مدیریتی کود دهی بر میزان نیترات خروجی با استفاده از مدل SWAT (مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی دز) انجام شد. پس از انجام واسنجی و اعتبار سنجی با استفاده از الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWATCUP خروجی مدل SWAT با مقایسه بار نیترات با مقادیر مشاهده‌ای در خروجی منطقه مطالعاتی با معیارهای R^2 و NSE مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس تأثیر سناریوهای کاهش کود دهی بر میزان آلودگی منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی مدل با استفاده از R^2 برای پارامترهای مورد شبیه‌سازی در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب در محدوده‌های (۰/۹۲-۰/۵۹) و (۰/۸۳-۰/۵۸) و NSE نیز در محدوده‌های (۰/۷۶-۰/۵۴) و (۰/۵۷-۰/۴۵) قرار گرفتند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی نیترات می‌باشد.

نتایج حاصل از اعمال سناریوهای کود دهی بر میزان آلودگی نشان می‌دهد که بیش‌ترین میانگین کاهش نیترات به میزان ۲۶/۶۲ در سناریوی ۷۰ درصد کاهش کوددهی صورت پذیرفته و کاهش ۱۰درصد کود دهی منجر به کاهش ۲/۷۴ درصدی نیترات خروجی گردیده است.

با توجه به نتایج به‌دست آمده عوامل مختلفی از قبیل زمان کود دهی، میزان آبیاری، روش آبیاری و میزان نیاز محصولات الگوی کشت به کود می‌تواند بر میزان آلودگی آب‌های سطحی اثرگذار باشد. مطابق نتایج به‌دست آمده برای حفاظت کیفی از منابع آب با صرف هزینه و سیاست‌گذاری مناسب می‌توان گام مهمی در بخش کنترل کودهای شیمیایی برداشت. استفاده بهینه از کود، جایگزین کردن کودهای ارگانیک به‌جای کودهای شیمیایی،اعطای تحصیلات بانکی به کشاورزان برای استفاده از تجهیزات و روش‌های نوین کوددهی و آبیاری در سطح مزرعه و همچنین افزایش قیمت خرید محصولات کشاورزی می‌تواند علاوه برکاهش آلودگی منابع آب منجر به بهبود عملکرد گیاهان در شرایط کاهش مصرف کود و جلوگیری از کاهش سود کشاورز شود. در این مسیر استفاده از مدل‌هایی نظیر SWAT که توانایی ارزیابی سناریوهای مدیریتی مختلف در سطح حوضه‌های آبخیز را دارا می‌باشد، می‌تواند راهکار مؤثری برای تدوین برنامه‌های مدیریت آب و خاک باشد.

ضروری است میزان تأثیر اعمال سناریوهای کاهش کوددهی بر روی عملکرد گیاهان و همچنین تأثیر اقتصادی آن بصورت توامان مورد بررسی قرارگرفته تا بتوان آنالیز منطقی و همه جانبه در زمینه انجام و سپس تصمیم مناسب را اتخاذ نمود.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه GN:SCU.WI98.280 صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

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.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: عباس بختیاری فر، تجزیه و تحلیل داده‌ها.

نویسنده دوم: محمد الباجی، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نگارش مقاله.

نویسنده سوم: منا گلابی، بررسی نتایج.

نویسنده چهار: سعید برومندنسب، بررسی نتایج.

نویسنده پنجم: علی شاهنظری، نگارش مقاله.

سپاسگزاری

این مقاله از رساله دوره دکترای تخصصی در دانشکده مهندسی آب و محیط زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تشکر و قدردانی میگردد .همچنین نویسندگان مقاله مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاری سازمان آب و برق خوزستان در ارائه آمار و اطلاعات ادواری مربوط به شبکه آبیاری و زهکشی دز و ایستگاه های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه اعلام می نمایند.

References

1- Ababei, B. and T. Sohrabi., 2009. Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud Watershed. *Journal of Water and Soil Conservation,* 16(3): 41-58. DOI: 20.1001.1.23222069.1388.16.3.3.7 (In Persian).

2- Abbaspour K.C., Yang ,J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. and Srinivasan, R., 2007. Modelling hydrology and water quality in theprealpine/alpineThur watershed using SWAT, J*ournal of Hydrology* 333: 413– 430. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.09.014.

3- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H. and Klove, B., 2015. A continentalscale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 524: 733–752. DOI:10.1016/j.jhydrol.2015.03.027

4- Ahmadzadeh, H., Murid, S. and Delaver, M., 2013. Evaluation of changes in the performance of agricultural products and input to Lake Urmia in the Zarinerood basin under the influence of changing irrigation systems from surface to pressurized using the SWAT model. *Journal of Irrigation and Drainage of Iran*, 8(1): 1-15. DOI: 20.1001.1.20081758.1400.17.2.3.1

5- Akhavan, S., Abedi, j., Mosavi, S, F., Abbaspour, K., Afyoni, M. and Eslamian, S., 2010. Estimation of "blue water" and "green water" using SWAT model in Hamadan-Bahar watershed. *Water and soil Sciences* (agricultural sciences and techniques and natural resources), 14(53): 9-23. DOI: 10.22067/geo.v8i3.81998 (In Persian).

6- Akhavan, S. and Jodi Hameze Abad, A., 2015. Simulation of Inflow to Urmia Lake Using SWAT Model. *Journal of Water and Soil Science*, 19(72): 23-34. DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.3 (In Persian).

7- Albaji, M., 2010. Land suitability evaluation for sprinkler irrigation systems. *Khuzestan Water and Power Authority (KWPA), Ahwaz, Iran (in Persian)*, *14*(3), pp.16-25.

8- Annual report of Khuzestan Water and Electricity Organization, 2016. Exploitation of irrigation networks in North Khuzestan region, KWPA Technical Rep, p13

9- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: model development. American Water Resources Association.volume 34, 73–89. DOI:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

10- Basaltpour, A. and Hosseinzadeh, N., 2016. *Theory & training step by step construction and implementation of SWAT model.* Valiasr University of Rafsanja. (In Persian).

11- Bindra, S.P., Lawafi, A., Abulifa, S. and Gouma, M., 2014. Change and Development in Biological Civil & Environmental Engineering Education in Libya. *International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering (*BCEE-2014) March 17-18, 2014 Dubai (UAE*).* DOI:10.15242//LLCBE.C0314079

12- Gassman, P.W., Reyes, M. R., Green, C. H. and Arnold, J. G. 2007. The soil and water assessment tool historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 50(4), 1211–1250. DOI: 10.13031/2013.23637

13- Giri, S., Qiu, Z., Prato, T. and Luo, B., 2016. An integrated approach for targeting critical source areas to control nonpoint source pollution in watersheds. *Water Resour Management.* Volume 30, 5087–5100. DOI: 10.1007/s11269-016-1470-z

14- Jingyuan, J., Shiyu, L., Jiatang, H. and Huang, J., 2014 .A modeling approach to evaluating the impacts of policy-induced land management practices on non-point source pollution: A case study of the Liuxi River watershed, China. *Agricultural Water Management Volume* 131:1-16. DOI: 10.1016/j.agwat.2013.09.005

15- Li S., Li J., Xia J. and Hao G., 2021. Optimal control of nonpoint source pollution in the Bahe River Basin, Northwest China, based on the SWAT model. *Environmental Science and Pollution Research*, DOI: 10.1007/s11356-021-14869-4

16- Misaghi, F. and Nouri, M., 2017. Simulating the amount of nitrate entering the river from agricultural land using the SWAT model (case study: Zanjan River). *Iran Water Resources Research*, 14(2): 155-168. DOI: 10.22104/AET.2020.4298.1214 (In Persian)

17- Mohammadi, M., Kavian, a. and Gholmi, L., 2017. Simulation of discharge and water nitrate in Talar watershed using SWAT model. *Watershed Management Research Journal,* 8(15):45-60. DOI: 10.29252/jwmr.8.15.45

18- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900. DOI: 10.13031/2013.23153

19- Naseri, A.A., Albaji, M., Boroomand Nasab, S., Landi, A., Papan, P., Bavi, A.2009. Land suitability evaluation for principal crops in the Abbas Plain, Southwest Iran. *Journal of Food, Agriculture & Environment*.7 (1): 208-213. DOI: https://doi.org/10.1234/4.2009.1502

20- Nash, J. and Sutcliffe, J., 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6

21- Nazari-Sharabian, M., Taheriyoun, M., Ahmad, S., Karakouzian, M. and A. Ahmadi., 2019. Water quality modeling of Mahabad Dam watershed–reservoir system under climate change conditions, using SWAT and system dynamics. *Water* 2019, 11, 394. DOI: 10.3390/w11020394.

22- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R., 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Decumention version 2009 (user, manual). *Texas Water Resources Institute*, 647 pp. DOI: 10.4236/jwarp.2010.25047

23-Nouri, Z., Selajqa, A., Malekian, A. and Moghadamniac, A., 2016. Investigating the effect of the best management measures in reducing point and non-point sources of water pollution using the SWAT model (case study: Simre watershed, Simre river). - *Iran Water and Soil Research*, Volume 48, Number 5, Bahman and Esfand 99-106. DOI: 10.22059/ijswr.2018.225610.667617 (In Persian) .

24- Qiang, W and YuSchilling, H., 2021. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution in a watershed with SWAT–ECM and AHP methods. *Hydrology Research,*.52(6), 1184 DOI: 10.2166/nh.2021.010.

25- Schilling, K. E. and Wolter, C.F., 2009. Modeling nitrate-nitrogen load reduction strategies for the Des Moines River, Iowa Using SWAT. *Environmental Management*, 44 (4), 671–682. DOI: 10.1007/s00267-009-9364-y

26- Sheikhi Grakoui, K., Navabian, M., Vazifeh Dost, M., 2017. Investigating the accuracy of salinity simulation using heavy metals and nitrogen cycle in SWAT model (case study: Navroud watershed). *Iran Water and Soil Research*, 94(1): 25-37. DOI: 10.22059/ijswr.2017.207586.667467. (In Persian).

27- Sheikh Zainuddin, A., Esmaili, A. K. and M. Sebet., 2015. Policy incentives to reduce nitrate leaching in agricultural fields: the study area of Drudzen irrigation and drainage network. *Agricultural Economics and Developmen*t, 30(2): 127-135. DOI: 10.22067/jead2.v30i2.40451

28-. The United Nations World Water Development Report 2021**,** Published in 2021 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

29- Wu, Q and Yu, H., 2021. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution in a watershed with SWAT–ECM and AHP methods. *Hydrology Research,* 52(6), 1184 DOI: 10.2166/nh.2021.010

30- Zarei Gorkhodi, A., Shahnazari, A. and F. Mohammadi., 2022. Evaluating the effect of dams on two parameters of runoff and sediment using SWAT model (case study: Tejn River watershed, Mazandaran). *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 16(2): 294-307. DOI: 20.1001.1.20087942.1401.16.2.3.2 (In Persian).

31- Zhang, X. and Zhang, M., 2011. Modeling effectiveness of agricultural BMPs to reduce sediment load and organophosphate pesticides in surface runoff. *Journal of Science of the Total Environment*, 409(10):1949-1958. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.02.012.

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 89-104

Research Paper

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

EXTENDED ABSTRACT

Identifying Key Factors Influencing Runoff and Simulating Rainfall-Runoff with the SWAT Hydrological Model: A Case Study of the Khersan Watershed

K. Shahedi[1*], S.H. Roshun[2], A. Shahnazari[3] and M. Ghorbanifard[4]

1- Corresponding Author, Professor, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (k.shahedi@sanru.ac.ir)*
2- Researcher, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
3- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
4- M.Sc., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Engineering, Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 22 January 2025
Revised: 10 August 2025
Accepted: 28 August 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Sensitivity Analysis, Flood Forecasting, Water Resources Management, ArcSWAT, Khersan Watershed.

TO CITE THIS ARTICLE:

Shahedi, K., Roshun, S. H., Shahnazari, ,. A., Ghorbanifard, ,. M. 2026. 'Identifying Key Factors Influencing Runoff and Simulating Rainfall-Runoff with the SWAT Hydrological Model: A Case Study of the Khersan Watershed', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 89-104. doi: 10.22055/jise.2025.48844.2154.

Abstract

Rainfall-runoff modeling is a tool for flood prediction, and risk minimization. In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to determine the factors affecting runoff. For this purpose, spatial data including Digital Elevation Model (DEM), land use, and soil were obtained from reliable sources and finalized in ArcGIS software. Then, climatic data including precipitation, maximum and minimum temperature, relative humidity, wind speed, evapotranspiration, and solar radiation were obtained from various meteorological stations. The model calibrated using the SUFI2 algorithm and then the model validation and sensitivity analysis were carried out. The model performance was evaluated using statistical evaluation criteria including RMSE, R2 and NSE. The results of the model sensitivity analysis showed that the model is sensitive to 16 of the 23 parameters. Also, the model simulation during the calibration and validation period with RMSE values of 18.01 and 53.93 and R2 values of 0.85 and 0.91 and NSE coefficients of 0.72 and 0.36 indicate the model performance in the rainfall-runoff simulation in the studied basin. Given the arid and semi-arid climate of Iran and the limited water resources, there is a need to identify the most important components in the process of converting precipitation into runoff. Therefore, the SWAT model can be considered a useful tool in determining these components and can be used in rainfall-runoff simulation for water resources planning and management.

Introduction

Precipitation is one of the most complex elements of the hydrological cycle, exhibiting significant variations in both time and space. Forecasting precipitation is not an easy task, and it involves many uncertainties (Zand and Samaei, 2017). Estimating the runoff resulting from atmospheric precipitation forms the foundation for various studies related to the development and management of water resources. This estimation is crucial for a better understanding of

hydrological issues, water resource management, river engineering, flood control structures, and flood storage. Therefore, the estimation of surface runoff in river basins is an important and complex issue that requires investigation and modeling of river regime (Xue et al., 2022). One of the most significant applications of surface flow estimation in watershed management is flood management, along with the design of hydraulic structures and reservoir policies (Mahmoudi et al., 2021). Watershed hydrology simulation models are employed to better understand the hydrological processes that control the movement of surface and subsurface water. One of the most widely used hydrological models is the semi-distributed SWAT model. The SWAT model is a large-scale model designed to simulate the impact of various land management methods on water, sediment, and chemical agricultural substances at the basin level, taking into account different soil types and land uses over the long term, based on water balance. Among the spatial information required by the SWAT model is the digital elevation model (DEM), which plays a crucial role in extracting the hydrographic characteristics of the basin and estimating the spatial distribution of runoff and sediment load (Goodarzi et al., 2016). The ability of watershed models to accurately simulate hydrological processes is evaluated through parameter sensitivity analysis, model calibration, and model validation.

Methodology

The Khersan watershed is one of the important sub-watersheds of the Karun watershed, located in the southwest of Iran, spanning the provinces of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, Chaharmahal and Bakhtiari, and Isfahan. The SWAT hydrological model was utilized to identify the effective components influencing runoff and to simulate rainfall-runoff in this watershed. For this purpose, spatial data was gathered, including a digital elevation model (DEM) with a 30-meter resolution from SRTM satellite data, a slope layer derived from the DEM, a land use map created by classifying Landsat 8 satellite images using the Supervised Maximum Likelihood Classification (MLC) method, and a soil layer based on the soil map from the Food and Agriculture Organization (FAO). Meteorological data, including daily rainfall, minimum and maximum temperatures, wind speed, and relative humidity, were collected from 14 meteorological stations in the basin covering the period from 07/01/1997 to 06/30/2020. River flow data were obtained from three hydrometric stations located in different areas of the basin. To implement the SWAT model, the ArcSWAT extension within the ArcGIS 10.8 software environment was used. The digital elevation model of the area was added to the software, allowing the model to calculate the watershed area, sub-watershed, main stream network, and other physical characteristics of the watershed. In the next step, using the land use and soil maps, along with introduced classes of slope values, hydrological response units (HRUs) were defined by the model. After preparing the HRUs map, meteorological data including rainfall, minimum and maximum temperatures, average wind speed, and relative humidity were input into the model, and the modeling process was conducted.

Findings

The SWAT model was implemented using the Digital Elevation Model (DEM) layer, land use map, soil map, and meteorological data, including rainfall, maximum and minimum temperatures, relative humidity, and wind speed. Next, the SUFI-2 algorithm was employed to calibrate and validate the model results. A sensitivity analysis of the model was conducted using 29 default parameters, which revealed that 16 parameters were more sensitive. The remaining parameters had no significant effect on the basin runoff simulation, classifying them as insensitive parameters, which were then removed from the calibration process. The performance of the SWAT model in daily and monthly rainfall-runoff simulation, as measured by the Nash-Sutcliffe coefficient, was 0.724, 0.765, 0.87, and 0.88, respectively, for the calibration and validation periods. These results indicate the model's good performance in simulation and its suitability for estimating runoff in the region.

Conclusion

To simulate rainfall-runoff and determine the important components in the simulation, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was employed. The SWAT model was automatically

calibrated using the SUFI-2 algorithm for the period 1997-2020, with calibration conducted for the periods 1997-2013 and 2014-2020. The simulation results indicate that out of 23 important parameters used in the calibration for this basin, 16 effective parameters include: CN2 (initial SCS curve number for medium humidity conditions), ALPHA_BF (groundwater discharge constant), GW_DELAY (water transfer delay time from the last layer to groundwater), SOL_BD (soil bulk density), SOL_AWC (soil available water capacity), SOL_K (soil saturated hydraulic conductivity), SOL_ALB (reflectance coefficient or albedo of moist soil), REVAPMN (groundwater evaporation rate), SMTMP (snowmelt temperature), SMFMX (maximum annual snowmelt rate), ALPHA_BN (channel discharge constant), CANMX (maximum canopy retention), HRU_SLP (mean slope), and SOL_Z (thickness of soil layers). The evaluation of model performance using RMSE, R^2, and NSE criteria shows that during the calibration and validation periods, the RMSE values were 18.01 and 53.93, respectively. The R^2 coefficient values were 0.85 and 0.91 for the calibration and validation periods, respectively, while the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) values were 0.72 and 0.36, respectively. Overall, considering these three performance evaluation criteria, the SWAT model demonstrates good performance in the study area.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Grant number Code: 04-1400-01.

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Kaka Shahedi, Guidance, consulting, results control, editing
Second Author: Hossein Roshun, Initial writing, performing software/statistical analyses
Third Author: Ali Shahnazari, Consulting
Fourth Author: Mehdi Ghorbanifard, Data collection

Acknowledgment

The authors gratefully acknowledge the collaboration and financial support provided by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in conducting this research.

References

1- Goodarzi, M., Zahabiyoun, B., & Massah Bavani, A. 2016. Simulation of Rainfall-Runoff for Gharesou Watershed Using SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Technology, 18*(2), pp. 12-20. https://journals.srbiau.ac.ir/article_9797.html (In Persian).

2- Mahmoudi, P., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. 2021. Surface Runoff Simulation Based on SWATCUP Sensitivity Analysis Method (Case study: Ghareh-Chay River). *Nivar, 45*(112-113), pp. 46-58. https://doi.org/10.30467/nivar.2021.261833.1173 (In Persian).

3- Xue, H., Liu, J., Dong, G., Zhang, C., & Jia, D. 2022. Runoff Estimation in the Upper Reaches of the Heihe River Using an LSTM Model with Remote Sensing Data. *Remote Sensing, 14*(10), pp. 2488. https://doi.org/10.3390/rs14102488.

4- Zand, M., & Samaei, R. 2017. Investigation on Amount and Intensity of Rainfalls in Flood Generation in Khorramabad Basin. *Nivar, 41*(96-97), pp. 1-8. https://doi.org/10.30467/nivar.2017.44813 (In Persian).

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٩، شماره‌ی۲، تابستان ١٤٠٥، مقاله پژوهشی، ص. ١٠٤-٨٩

تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رواناب و شبیه‌سازی بارش-رواناب با مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز خرسان)

کاکا شاهدی[۱*]، سیدحسین روشان[۲]، علی شاهنظری[۳] و مهدی قربانی‌فرد[۴]

۱*- نویسنده مسئول، استاد، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
k.shahedi@sanru.ac.ir

۲- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۴ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

چکیده

مدل‌سازی بارش-رواناب ابزاری برای پیش‌بینی سیل و اجتناب از تهدیدات و به حداقل رساندن خطرات است. در این مطالعه از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) برای تعیین مؤلفه‌های مؤثر بر رواناب استفاده شده است. به این منظور ابتدا داده‌های مکانی شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)، کاربری اراضی و خاک‌شناسی از منابع معتبر اخذ و در نرم‌افزار ArcGIS نهایی گردید، سپس داده‌های اقلیمی شامل بارندگی، بیشینه و کمینه دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تبخیر و تعرق و تابش خورشیدی از ایستگاه‌های مختلف هواشناسی تهیه گردید. به‌منظور اجرای مدل از افزونه ArcSWAT و مدل SWAT استفاده گردید. فرآیند واسنجی مدل نیز با استفاده از الگوریتم SUFI2 انجام و سپس اقدام به اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت مدل شد. ارزیابی عملکرد مدل نیز با استفاده از معیارهای ارزیابی آماری از جمله RMSE، R^2 و NSE انجام گردید. نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که مدل از مجموع ۲۳ پارامتر به ١٦ پارامتر آن حساس است. همچنین شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی و اعتبارسنجی با مقادیر RMSE برابر با ۱۸/۰۱ و ۵۳/۹۳ و مقدار R^2 برابر با ۰/۸۵ و ۰/۹۱ و ضریب NSE برابر با ۰/۷۲ و ۰/۳٦ بیان از عملکرد مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه مورد مطالعه دارد. با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور ایران و محدودیت منابع آب، نیاز به شناسایی مهمترین مؤلفه‌ها بر فرآیند تبدیل بارش به رواناب است. بنابراین می‌توان مدل SWAT را ابزاری مفید در تعیین این مؤلفه‌ها دانست و جهت برنامه‌ریزی منابع آبی و مدیریت آنها از آن در شبیه‌سازی بارش-رواناب استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: آنالیز حساسیت، پیش‌بینی سیل، مدیریت منابع آب، ArcSWAT، حوضه آبخیز خرسان.

مقدمه

آب سطحی که نتیجه پاسخ‌های بارش-رواناب در یک حوضه می‌باشد، منبع بالقوه‌ای است که اگر به‌طور صحیح مدیریت شود، می‌تواند برای تأمین تقاضا، مفید واقع گردد (Kumar et al., 2021). بارش یکی از پیچیده‌ترین عناصر چرخه هیدرولوژی همراه با تغییرات زیاد در زمان و مکان است. پیش‌بینی بارش کار ساده‌ای نیست و عدم قطعیت‌های زیادی در آن وجود دارد (Zand and Samaei, 2017). برآورد رواناب ناشی از بارش‌های جوی، به‌عنوان پایه و اساس بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با توسعه و بهره‌برداری از منابع آبی شناخته می‌شود. این موضوع در درک بهتر مسائل هیدرولوژیکی، مدیریت منابع آب، طراحی و مهندسی رودخانه، ساخت سازه‌های کنترل سیلاب و برنامه‌ریزی برای ذخیره‌سازی آب اهمیت بالایی دارد. از این‌رو، برآورد رواناب سطحی در حوضه‌های آبخیز رودخانه‌ها به‌عنوان یک چالش پیچیده و مهم مطرح است که نیازمند ارزیابی دقیق و مدل‌سازی رفتار رودخانه می‌باشد (Xue et al., 2022). برای این منظور مدل‌های بسیاری برای شبیه‌سازی فرآیندهای حوضه آبخیز وجود دارد (Yaghoubi and Bahremand, 2011). شبیه‌سازی بارش-رواناب یکی از مهم‌ترین مباحث در هیدرولوژی و مدیریت محیط زیست محسوب می‌شود (Achite et al., 2022). با توجه به افزایش سریع نیاز به منابع آبی، ضرورت مدیریت یکپارچه و پایدار آب و داشتن درک دقیق‌تری از بیلان آبی به شدت احساس می‌شود (Anwar, 2010). برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوضه‌های آبخیز، به‌کارگیری مدل‌های متنوع که هر کدام برای شرایط خاصی طراحی شده‌اند، لازم است (Rezaei Moghaddam et al., 2021). به‌دلیل محدودیت‌های مالی و زمانی، شرایط دشوار فیزیکی و تغییرات اقلیمی، امکان درک و جمع‌آوری اطلاعات کافی درباره رواناب و رسوب در مناطق طبیعی وجود ندارد (Moradi et al.,

DOI: 10.22055/jise.2025.48844.2154

2019). مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژی به بهبود فهم فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی کیفیت آب یاری می‌رسانند. انتخاب مدل مناسب بر اساس عواملی مانند دقت، قابلیت شبیه‌سازی و دسترسی به داده‌ها انجام می‌شود (Singh, 1995). این مدل‌ها باید به درستی منعکس کننده تغییرات در کاربری اراضی، مدیریت کشاورزی و اثرات آن‌ها بر جریان باشند. Arnold et al. (1998) شش ویژگی مهم یک مدل هیدرولوژیکی را ذکر کرده‌اند که عبارت است از: راندمان محاسباتی، جزئیات مکانی با کیفیت بالا، ورودی با دسترسی آسان، پیوستگی زمانی، توانایی شبیه‌سازی سناریوهای مدیریت زمین و توانایی ارائه نتایج مناسب. اجرای این مدل‌ها غالباً به سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، سنجش از دور و پایگاه داده‌های متعدد نیاز دارد تا بتوانند پارامترهای ورودی مدل را توسعه داده و نتایج شبیه‌سازی را تحلیل و نمایش دهند (He, 2003). یکی از پرکاربردترین مدل‌های هیدرولوژیکی مدل نیمه‌توزیعی SWAT است. مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (Soil and Water Assessment Tool) مدلی بزرگ مقیاس است که برای شبیه‌سازی تاثیر روش‌های مختلف مدیریت اراضی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی-کشاورزی در سطح حوضه‌های با خاک و کاربری اراضی مختلف در دراز مدت طراحی شده است که بر اساس بیلان آبی استوار است. فرایندهای فیزیکی مرتبط با حرکت آب، حرکت رسوبات، رشدگیاه، چرخه موادمغذی و غیره در این مدل مستقیم از روی پارامترهای ورودی شبیه‌سازی می‌شوند (Mahmoudi et al., 2021). مدل SWAT، یکی از ابزارهای ارزیابی پیشرفته در علوم آب و خاک، به‌طور گسترده برای تحلیل تاثیرات تغییرات مدیریتی زمین بر منابع آبی در حوضه‌های پیچیده به‌کار می‌رود. این مدل با در نظر گرفتن تغییرات مکانی ویژگی‌های آبخیز نظیر کاربری اراضی، ارتفاع و خصوصیات خاک، توانایی زیادی در شبیه‌سازی و ارزیابی دارد. کاربرد این مدل در مناطق مختلف دنیا روندی چشمگیر داشته و به‌ویژه در سال‌های اخیر برای شبیه‌سازی رواناب، فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز و همچنین تحلیل مؤلفه‌های آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله اطلاعات مکانی مورد نیاز مدل SWAT، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) است که در استخراج مشخصات هیدروگرافی حوضه، برآورد توزیع مکانی رواناب و بار رسوب نقش دارد. ارزیابی توانایی مدل‌های آبخیز در شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای هیدرولوژیکی با تحلیل حساسیت پارامترها، تنظیم و صحت‌سنجی مدل صورت می‌گیرد (Goodarzi et al., 2016). در مدل SWAT نیز برای آنالیز حساسیت، واسنجی و آنالیز عدم قطعیت از الگوریتم SUFI-2 استفاده می‌شود (Abbaspour et al., 2007). مدل SWAT توسط سرویس تحقیقاتی کشاورزی آمریکا طراحی شده است تا تأثیر روش‌های مدیریتی مختلف را بر جریان آب، رسوب، عناصر غذایی و تعادل مواد شیمیایی در حوضه‌هایی با خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی متفاوت، در بازه‌های زمانی طولانی پیش‌بینی کند Neitsch et al. (2002) و کاربرد آن در زمینه‌های ارزیابی دراز مدت روش‌های مدیریتی متفاوت Tolson و Shoemaker (2004) ارزیابی برنامه‌های زیست‌محیطی و حفاظتی Baffaut et al. (2005)، شبیه‌سازی کیفیت آب و رسوب Abbaspour et al. (2007)، شبیه‌سازی بیلان هیدرولوژی Schuol et al. (2006)، شبیه سازی رسوب روزانه Gholami (2003) تأیید گردیده است. تا به حال تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی بارش –رواناب در حوضه خرسان انجام نشده است، این حوضه نقش مهمی در تأمین آب کشاورزی و صنعت کشور دارد. علاوه بر این، رواناب‌های این حوضه در نهایت به سد کارون سه منتهی می‌شوند. بنابراین، هدف این مطالعه استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز خرسان است تا روند بارش–رواناب شبیه‌سازی شده و عوامل مؤثری که بر تولید رواناب تأثیرگذارند شناسایی شوند.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

حوضه آبخیز خرسان به‌عنوان یکی از زیرآبخیزهای مهم حوضه بزرگ کارون در جنوب غربی ایران و در استان‌های کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال و بختیاری و اصفهان قرار دارد. این حوضه بین عرض جغرافیایی ′۱۶ °۳۰ تا ′۳۳ °۳۱ و طول جغرافیایی ′۱۷ °۵۰ تا ′۰۰ °۵۲ واقع گردیده است. مساحت این حوضه ۹۰۵۳/۱۴ کیلومترمربع است که رودخانه بشار به طول حدود ۱۸۰ کیلومتر آنرا زهکشی می‌کند. بلندترین نقاط ارتفاعی حوضه در رشته کوه‌های دنا با ارتفاع بالای ۴۴۰۶ و کمترین آن در خروجی حوضه با ارتفاع ۷۸۰ متر می‌باشد. با توجه به وسعت آبخیز و وجود رشـته کوه‌های مرتفع زاگرس، اقلیم منطقه در نقاط مختلف آن متغیر بوده، به‌طوری‌که جنوب تا شـــمال غرب اقلیم نیمه مرطوب معتدل تا نیمه مرطوب سرد، دامنه‌ها و نواحی هم‌بار شمال شرق، اقلیم نیمه خشک سرد و ارتفاعات فوقانی دارای اقلیم مرطوب سرد می‌باشد. شکل (۱) موقعیت این حوضه را نشان می‌دهد.

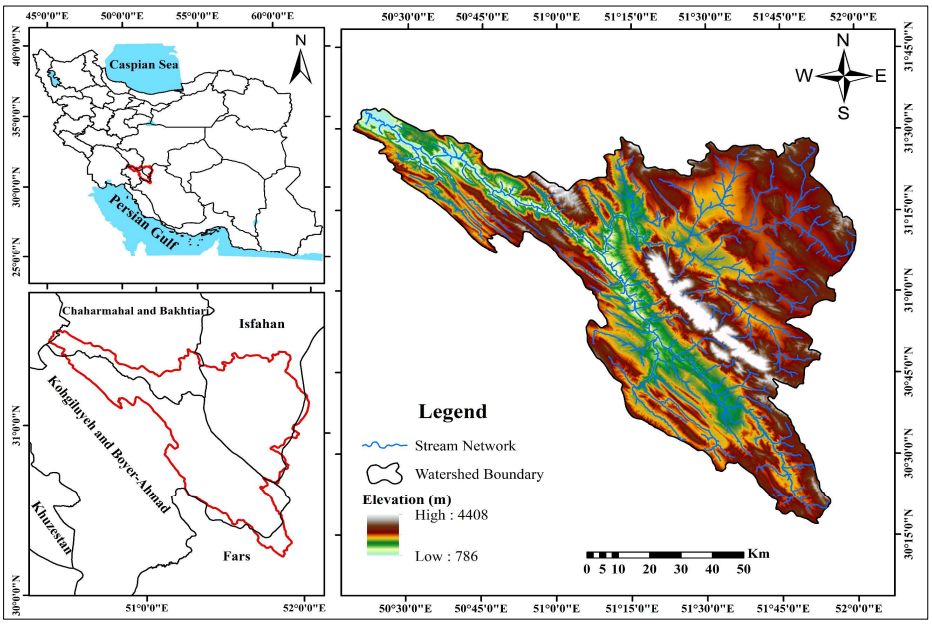


Fig. 1- Location of Khersan Watershed in Iran

شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز خرسان در استان و ایران

روش تحقیق

به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در مدل SWAT نیاز به دو گروه داده، شامل داده‌های مکانی و داده‌های هواشناسی می‌باشد که روش تهیه آن‌ها در زیر اشاره شده است (Kurbah and Jain, 2017).

داده‌های مکانی

مدل رقومی ارتفاع (Digital Elevation Model): مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه آبخیز با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر حاصل از ماهواره SRTM از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) اخذ گردید و نواقص احتمالی (پیسکل‌های جا افتاده) در نرم‌افزار ArcGIS برطرف شد. لایه طبقات شیب حوضه آبخیز نیز از مدل رقومی ارتفاع استخراج شد.

کاربری اراضی: برای تهیه لایه کاربری اراضی حوضه آبخیز از تصاویر ماهواره لندست ۸ سنجنده OLI (Operational Land Imager) استفاده شد. به این منظور ابتدا تصاویر بر مبنای شماره ردیف و گذر حوضه آبخیز در سال ۲۰۲۱ دانلود شد (جدول ۱).

سپس تصحیح رادیومتریک برای تبدیل رادیانس به بازتاب سطحی بالای اتمسفر انجام شد. همچنین تصحیح اتمسفری تصاویر نیز بر اساس روش تجزیه و تحلیل سریع خطدید اتمسفر از طریق طیف ابر مکعب (FLAASH) در محیط نرم افزار ENVI 5.6 انجام گردید. بعد از انجام تصحیحات اقدام به موزاییک کردن تصاویر شد و سپس ترکیب رنگی مناسب انتخاب گردید. در مرحله بعدی پس از انتخاب مناطق تعلیمی از تصاویر با استفاده از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال (Maximum Likelihood Classification) که دقت بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد طبقه‌بندی تصاویر انجام شد. نقاط کنترل زمینی (Ground Control Point) حاصل از بازدیدهای میدانی که به‌صورت نظام‌مند و به تعداد ۳۰ نمونه برای هر کاربری با دستگاه GPS برداشت و درستی نمونه‌ها تأیید شد. نقشه‌های تولیدی در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 اصلاح و در نهایت نقشه کاربری اراضی تهیه گردید. دقت طبقه‌بندی تصاویر نیز با استفاده از ضریب کاپا بر مبنای روابط زیر محاسبه شد:

$$k = \frac{\emptyset_1 - \emptyset_2}{1 - \emptyset_2} \quad (۱)$$

$$\emptyset_1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{m} Pij \quad (۲)$$

$$\emptyset_2 = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{m} Pi.\,xPj \quad (۳)$$

که در آن، Pij: عناصر قطر اصلی، m: تعداد کلاس‌ها، N: تعداد کل نمونه‌های آزمایشی در تمام طبقات، Pi: جمع ستون‌ها و Pj: جمع ردیف می‌باشد.

لایه خاک‌شناسی: لایه خاک‌شناسی بر اساس نقشه خاک جهانی تولید شده توسط فائو (سازمان خوار و بار و کشاورزی جهانی) برای منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. لایه خاکشناسی در پنج گروه خاک (بر اساس گروه هیدرولوژیک خاک، تعداد لایه‌های خاک، بافت خاک، مواد آلی خاک و ...) به مدل معرفی شد، مشخصات لایه خاک در جدول (۲) آمده است.

 DOI: 10.22055/jise.2025.48844.2154

داده‌های هواشناسی

گروه دوم داده‌های مورد نیاز مدل SWAT داده‌های هواشناسی است که شامل، داده‌های بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد و رطوبت نسبی در مقیاس روزانه از ۱۴ ایستگاه هواشناسی (۱۱ ایستگاه باران‌سنجی، سه ایستگاه سینوپتیک) موجود در حوضه در بازه زمانی ۱۳۷۶/۰۷/۰۱ تا ۱۳۹۹/۰۶/۳۰ به مدل وارد شد. همچنین داده‌های مربوط به جریان رودخانه از سه ایستگاه آب‌سنجی واقع در مناطق مختلف و خروجی حوضه اخذ گردید (جدول ۳).

به‌منظور اجرای مدل SWAT ابتدا با استفاده از الحاقیه ArcSWAT در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه به نرم‌افزار اضافه شد. سپس محدوده آبخیز، زیرحوضه‌ها، شبکه آبراهه‌های اصلی و سایر خصوصیات فیزیکی آبخیز توسط مدل محاسبه شد. در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی و نقشه خاک و همین‌طور معرفی طبقات مقدار شیب در آبخیز، واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (Hydrologic Response Units) توسط مدل تعریف شدند. بعد از تهیه نقشه HRUs داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، دمای کمینه و بیشینه، سرعت متوسط باد و رطوبت نسبی در فرمت قابل قبول به مدل معرفی و مدل‌سازی انجام گردید. در این تحقیق از ایستگاه مرجع یاسوج برای داده‌های هواشناسی استفاده گردید.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این تحقیق

Table 1- Characteristics of satellite images used in this research

Sattelite Name	Sensor	Bands	Row	Path	Date
Landsat 8	OLI	11	38	163	29/04/2020
			39	163	
			38	164	
			39	164	

جدول ۲- مشخصات لایه خاک مورد استفاده در اجرای مدل SWAT

Table 2 - Soil Layer Specifications Used in the Implementation of the SWAT Model

Row	Soil Code	Name	Soil Texture	k Value
1	3122	I-Rc-Xk-c-3122	Loam	0.3204
2	3508	I-Rc-Yk-c-3508	Loam	0.3061
3	3578	Xk5-2-3a-3578	Clay-Loam	0.3601
4	3254	Rc33-3bc-3254	Loam	0.3244
5	3304	Xk5-3ab-3304	Clay-Loam	0.3562

جدول ۳- مختصات ایستگاه‌های مورد استفاده در منطقه

Table 3 - Coordinates of the Stations used in the Area

Number	Station Name	Station Type	Longitude	Latitude
1	Ganjaei	Raingauge	51 36 00	30 46 00
2	Garmook	Raingauge	51 43 00	31 22 59
3	Ghale Raeisi	Raingauge	50 38 59	31 16 59
4	Gifteh	Raingauge	51 40 00	30 55 58
5	Hanna	Raingauge	51 43 48	31 13 00
6	Kaloos	Raingauge	51 27 00	30 37 50
7	Komeh	Raingauge	51 36 00	31 04 00
8	Maymand	Raingauge	51 16 00	31 08 50
9	Pataveh	Raingauge	51 14 48	30 56 54
10	Setnegan	Raingauge	51 37 00	30 36 00
11	Sisakht	Raingauge	51 21 00	30 52 56
12	Yasuj	Synoptic	51 33 16	30 42 11
13	Semirom	Synoptic	51 33 56	31 24 23
14	Sisakht	Synoptic	51 27 45	30 50 59
15	Pataveh	Hydrometric	51 15 16	30 57 36
16	Kata	Hydrometric	51 15 33	31 10 59
17	Barez	Hydrometric	50 28 26	31 28 30

مدل SWAT

مدل SWAT یک مدل در مقیاس حوضه و نیمه توزیعی است که توسط Arnold et al. (1998) توسعه یافته است. این مدل قادر به شبیه‌سازی تأثیر شیوه‌های مختلف مدیریتی روی آب، رسوب، آلاینده‌های کشاورزی در حوضه‌های آبخیز با انواع خاک و کاربری‌های مختلف است. این مدل حوضه را به چند زیرحوضه و هر زیرحوضه را به تعداد زیادی واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) با توجه به پارامترهای توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک تقسیم می‌شود. رواناب سطحی از بارش روزانه با روش شماره منحنی برآورد می‌شود. فرسایش و رسوب در هر HRUs بر اساس معادله تلفات خاک اصلاح شده ماسل، و رسوب در کانال براساس معادله انتقال رسوب اصلاح شده بگنولد محاسبه می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی انتقال مواد مغذی در SWAT عوامل مختلفی چون معدنی شدن، تجزیه و عدم تحرک نیتروژن و فسفر، میزان فرسایش و رسوب در هر واحد هیدرولوژیکی، نحوه انتقال آب، رسوبات، مواد مغذی از طریق شبکه رودخانه‌ای و مکانیسم‌های پراکندگی و فرا رفت را در نظر می‌گیرد. داده‌های ورودی مورد نیاز مدل شامل نقشه رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک می‌باشد که هر سه باید در قالب رستری به مدل ارائه شوند، سایر اطلاعات مورد نیاز مدل شامل داده‌های هواشناسی از قبیل بارندگی روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه، عوامل مؤثر بر جریان سطحی و کانال، برداشت آب، مدیریت اراضی، مخازن و برخی زمینه‌های دیگر با توجه به هدف تحقیق باید در مدل وارد شوند (Neitsch et al., 2011).

شبیه‌سازی

شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است. همچنانکه یک سیستم با گذشت زمان تکوین می‌یابد، رفتار آن با ایجاد مدل شبیه‌سازی بررسی می‌شود. این مدل، معمولاً به شکل مجموعه‌ای از فرض‌های مربوط به عملکرد سیستم است. این فرض‌ها در چارچوب رابطه‌های ریاضی، منطقی و نمادین بین نهاده‌ها یا اهداف مورد نظر سیستم بیان می‌شود (Sadoun, 2000).

واسنجی

هدف از واسنجی حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده است. هر مدل پردازشی تعدادی پارامتر دارد که مقادیر آن‌ها باید برای حوضه خاصی که مدل‌سازی خواهد شد تعیین شود در حالت عادی و برای مدل‌هایی با فرمول‌بندی خوب هر پارامتر را می‌توان با اندازه‌گیری‌های مستقیم تعیین نمود (Mai, 2023). مقدار هر پارامتر برای استفاده مدل برای تخمین هیدروگراف‌های رواناب یا روندیابی باید مشخص شود. برخی از مدل‌ها پارامترهایی دارند که توسط مشاهده یا اندازه‌گیری خصوصیات حوضه آبخیز یا کانال تخمین زده نمی‌شوند. پس چگونه می‌تواند مقادیر مناسب برای پارامترها انتخاب شود؟ اگر مشاهدات بارندگی و دبی موجود باشند واسنجی یک پاسخی برای این سوال است. واسنجی داده‌های آب و هواشناسی مشاهده شده را در یک جستجوی منظم برای پارامترهایی که بهترین تناسب نتایج محاسبه شده با رواناب مشاهده شده را می‌دهد به کار می‌برد. این جستجو اغلب بهینه‌سازی یا واسنجی نامیده می‌شود (White et al., 2003).

آنالیز حساسیت

پارامترهایی که در حل نهایی تأثیر دارند تعیین می‌شوند. باید توجه داشت که در طول واسنجی، بعضی از پارامترها نسبت به بقیه حساس‌ترند. یک پارامتر حساس پارامتری است که تأثیر بیشتری روی خروجی مدل دارد بنابراین اگر مقدار یک پارامتر حساس به آرامی تغییر کند تأثیر زیادتری در پیشگویی مدل خواهد داشت (Li et al., 2021). در آنالیز حساسیت تخمین دقیق یک پارامتر حساس از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار حساسیت هر پارامتر نسبت به تابع هدف تخمین زده می‌شود، مقدار تابع هدف برای هر پارامتر ۰/۹۹۵ و ۱/۰۰۵ برابر مقدار بهینه است و از معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$S = \frac{0.995X - .005X}{X} \quad (۴)$$

S: میزان حساسیت

X: مقدار بهینه پارامتر معرفی شده جهت آنالیز حساسیت

مقدار حساسیت، درصد تغییرات در مقدار تابع هدف حاصل از افزایش یک درصدی در مقدار پارامتر است (HEC, 2000). جهت واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت از نرم‌افزار SWAT-CUP استفاده شده است. شکل (۲) فرآیند اجرای مدل را نشان می‌دهد.

معیارهای سنجش واسنجی مدل

ارزیابی عملکرد مدل به‌صورت بصری هیدروگراف‌های جریان شبیه‌سازی شده و مشاهده شده و با استفاده از مقایسه‌های آماری انجام گردید. برای مقایسه آماری بین جریان مشاهده‌شده (OBS) و جریان شبیه‌سازی‌شده (SIM) در مقیاس زمانی روزانه، از ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NSE) بر اساس روابط زیر استفاده شد (Phetanan et al., 2024):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(SIM_i - \overline{SIM})(OBS_i - \overline{OBS})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(SIM_i - \overline{SIM})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(OBS_i - \overline{OBS})^2}} \quad (۵)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n}(OBS_i - SIM_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(SIM_i - OBS_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(OBS_i - \overline{OBS})^2}\right] \quad (۷)$$

که در آن‌ها n تعداد کل جفت داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده است و $\overline{OBS}$ و $\overline{SIM}$ نشان‌دهنده مقدار متوسط

DOI: 10.22055/jise.2025.48844.2154

داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌باشند. NSE مقدار خطا عدم توافق بین میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده را اندازه‌گیری می‌کند. Legates و McCabe Jr (1999) دریافتند که NSE از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و مقادیر بالاتر نشان دهنده توافق بهتر است و R^2 میزان همبستگی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را اندازه‌گیری می‌کند.

نتایج و بحث

مدل SWAT با استفاده از لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک، داده‌های بارندگی، دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، سرعت باد اجرا گردید. در ادامه با استفاده از الگوریتم SUFI2 نتایج مدل واسنجی و اعتبارسنجی شد. آنالیز حساسیت مدل نیز با استفاده از ۲۳ پارامتر که از پیش فرض‌های مدل هستند، انجام شد و نتایج نشان داد که ۱۶ پارامتر حساسیت بیشتری دارند و بقیه پارامترها تأثیری بر شبیه‌سازی رواناب حوضه نداشته و به‌عنوان پارامترهای غیرحساس در نظر گرفته شدند و از مرحله واسنجی حذف شدند در مدل SWAT، p-value و t-stat معمولاً در فرآیند تحلیل حساسیت و واسنجی مدل به کار می‌روند. مقدار t-stat نشان‌دهنده میزان تأثیر یک پارامتر بر خروجی مدل است، به این معنا که هرچه مقدار t-stat بزرگ‌تر باشد، آن پارامتر تأثیر بیشتری بر نتایج مدل دارد. از سوی دیگر، مقدار p-value برای تعیین معناداری آماری این تأثیر استفاده می‌شود؛ اگر مقدار p-value کمتر از یک سطح آستانه (مثلاً ۰/۰۵) باشد، نشان‌دهنده این است که تأثیر آن پارامتر بر مدل معنادار است (جدول ۴).

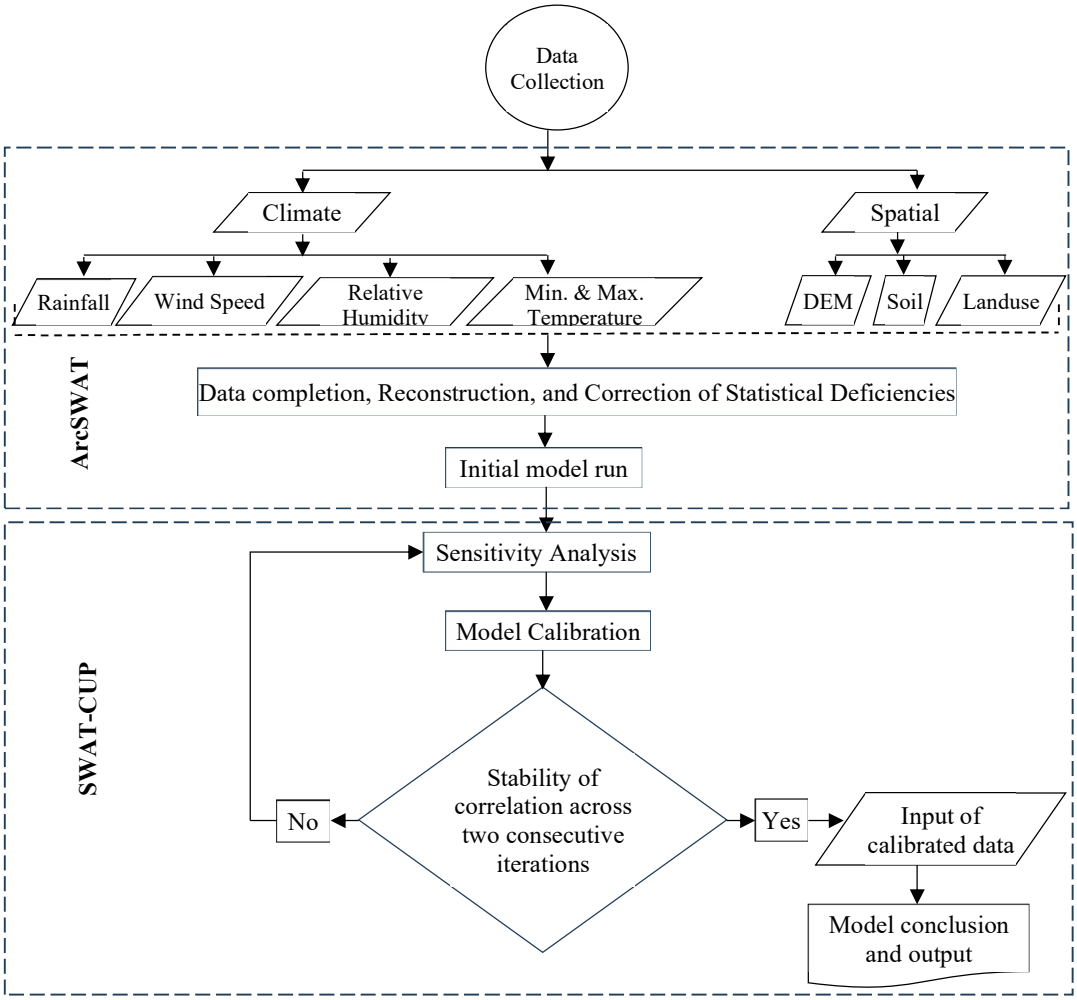


Fig. 2 - Flowchart of the Research Process

شکل ۲- نمودار جریانی انجام پژوهش

جدول ٤- بازه پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی فرآیند بارش – رواناب در مدل SWAT

Table 4- Range of Effective Parameters in Simulating Rainfall-Runoff Processes in the SWAT Model

Row	Parameters	Discription	Minimum	Maximum	p-value	t-stat
1	R*__CN2.mgt	SCS curve number for moisture condition II	-0.20	0.20	0.000	-8.013
2	V**__ALPHA_BF.gw	Base flow alpha factor (days)	0	1	0.002	-0.889
3	V__GW_DELAY.gw	Groundwater delay time (days)	30	450	0.285	-0.609
4	R__SOL_BD(..).sol	Moist bulk density (gcm^{-3})	-0.30	0.30	0.004	-2.249
5	R__SOL_AWC(..).sol	Available water capacity of the soil layer (mm/mm)	-0.30	0.30	0.338	0.867
6	R__SOL_K(..).sol	Soil saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	-0.80	0.80	0.000	-3.567
7	R__SOL_ALB(..).sol	Soil albido coefficient	-0.50	0.50	0.180	-0.879
8	V__GW_DELAY.gw	Groundwater delay time (days)	0	500	0.000	3.043
9	V__REVAPMN.gw	Depth of water threshold in groundwater table	0	100	0.411	0.314
10	V__SMTMP.bsn	Snow melt base temperature (°C)	-5	5	0.745	-0.42
11	V__SMFMX.bsn	Melt factor for snow on June 21 (mm/°C-day)	0	10	0.052	0.849
12	V__ALPHA_BNK.rte	Baseflow alpha factor for bank storage (days)	0	1	0.061	-1.603
13	V__CANMX.hru	Maximum canopy storage (mm)	0	100	0.025	-2.51
14	R__HRU_SLP.hru	Average Slope (m/m)	0	0.90	0.062	-1.817
15	R__SOL_Z(..).sol	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	0	0.80	0.045	1.538
16	V__GWQMN.gw	Thershold water level in shallow aquifer for baseflow (mm)	0	5000	0.837	0.194

*: V means that the parameter value is replaced with a new optimal value.
**: R means that the parameter is multiplied by (1 + the optimal value)

با توجه به نتایج جدول (۴) تعداد ۱۶ پارامتر حساس و مهم در شبیه‌سازی رواناب با مدل SWAT در حوضه خرسان مؤثر بودند. در مطالعه‌ای که Rostamian et al. (2008) با هدف به‌کارگیری مدل SWAT در کل حوضه‌های ایران داشتند تعداد ۲۲ پارامتر حساس در شبیه‌سازی رواناب تشخیص دادند. نتایج مدل SWAT در شبیه‌سازی روزانه فرآیند بارش–رواناب در ایستگاه خروجی حوضه (ایستگاه هیدرومتری بارز) در شکل (۳) ارائه شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.48844.2154

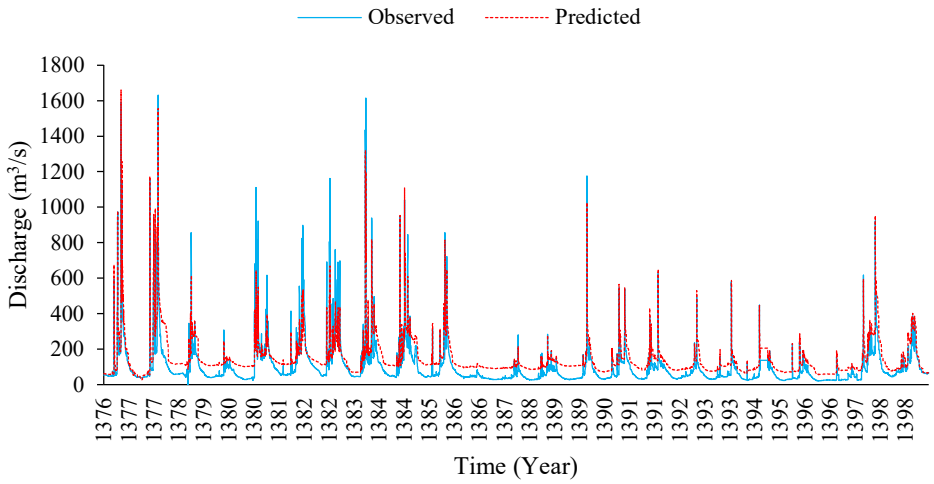


Fig. 3 - Prediction of stream discharge at the outlet station of the Khersan watershed using the SWAT model.

شکل ۳- پیش‌بینی میزان دبی جریان ایستگاه خروجی حوضه خرسان با استفاده از مدل SWAT

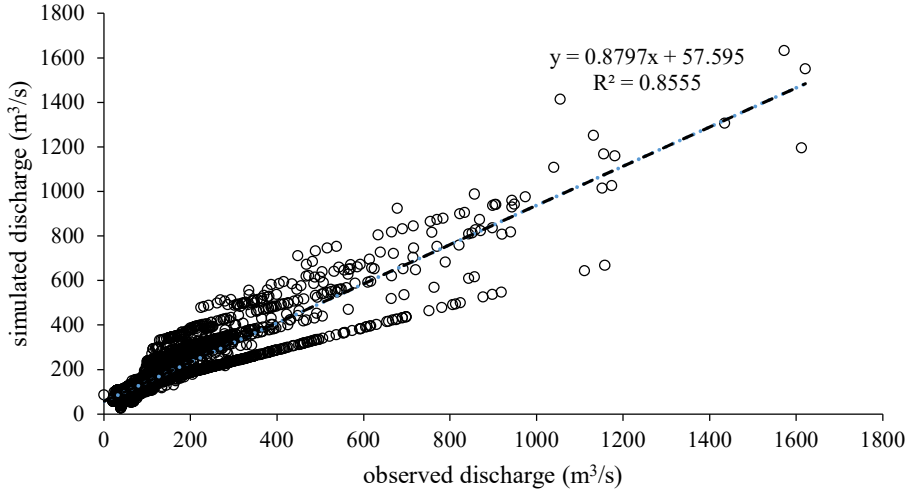


Fig. 4 - Prediction of stream discharge at the outlet station of the Khersan watershed using the SWAT model.

شکل ٤- پیش‌بینی میزان دبی جریان ایستگاه خروجی حوضه خرسان با استفاده از مدل SWAT

با توجه به شکل (۳)، مدل SWAT نتوانسته است جریان پایه را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کند و مقدار آن را بیش از حد واقعی برآورد کرده است. از سوی دیگر، در شبیه‌سازی جریان‌های با حجم بالا نیز ضعف‌هایی مشاهده می‌شود، به‌گونه‌ای که مقدار جریان‌های بالا کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شده است. این ناهماهنگی ممکن است ناشی از چند عامل باشد. از مهمترین دلایل آن کمبود داده‌های دقیق و معتبر برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز ممکن است تأثیرگذار بوده باشد. همچنین، عدم در نظر گرفتن کافی شرایط محلی، نظیر ویژگی‌های خاص خاک و پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه، ممکن است به کاهش دقت مدل منجر شده باشد. در نهایت، روش‌های مدیریتی خاص یا تغییرات آب‌وهوایی نیز ممکن است در نتایج مدل اثرگذار بوده و باعث انحراف از واقعیت شوند. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد که نشان از نتایج قابل قبول مدل برای حوضه خرسان می‌باشد (شکل ۴). به‌منظور ارزیابی مدل از معیارهای ارزیابی ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش- ساتکلیف (NSE) استفاده شد که نتایج آن در زیر ارائه شده است (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل SWAT برای دوره واسنجی (۱۳۹۲-۱۳۷۶) و اعتبارسنجی (۱۳۹۹-۱۳۹۳)

Table 5 - Results of the SWAT Model Evaluation for the Calibration (1997-2013) and Validation Period (2014-2020)

Statistical	Calibration	Validation
R^2	0.85	0.91
RMSE	18.01	53.93
NSE	0.72	0.36

با توجه به اینکه شاخص ناش – ساتکلیف برای مقادیر بیشتر از ۰/۷۵ بیانگر دقت بالا و عالی مدل است و مقدار بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ بیان‌گر نتایج رضایت‌بخش بوده و اگر مقدار این معیار کمتر از ۰/۳۶ باشد نتایج غیرقابل قبول فرض می‌شوند (Ndomba and Birhanu, 2008). Kurbah و Jain (2017) عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی روزانه و ماهانه بارش–رواناب بر اساس ضریب ناش–ساتکلیف را به‌ترتیب برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی ۰/۷۲۴، ۰/۷۶۵، ۰/۸۷ و ۰/۸۸ به‌دست آوردند که نشان از عملکرد خوب این مدل در شبیه‌سازی دارد. همچنین Kangsabanik و Murmu (2017) بیان داشتند که مدل SWAT با ضریب همبستگی ۰/۹۴۱ عملکرد خوبی در شبیه‌سازی بارش – رواناب نشان می‌دهد. بر اساس جدول (۵) عملکرد مدل SWAT در شبیه‌سازی بارش–رواناب در حوضه مورد مطالعه از عملکرد خوبی برخودار است و می‌تواند در مطالعه‌های برآورد میزان رواناب در منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه‌های منابع آب، رواناب مهمترین متغیر هیدرولوژیکی مورد استفاده است. برآورد رواناب مستقیم برای حوضه‌های آبخیز فاقد آمار کاری دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است. مدل‌های زیادی برای هیدرولوژی حوضه توسعه داده شد، تا حجم رواناب تولیدی در حوضه را شبیه‌سازی کنند. اما در دسترس بودن داده‌های زمانی و مکانی محدودیت اصلی مانع اجرای این مدل‌ها به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مثل کشورمان است. مدل هیدرولوژیکی SWAT یکی از گزینه‌های مناسب برای این منظور است. این مدل قابلیت استفاده از داده‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) را دارا بوده و با ادغام با مدل‌های مناسب بارش–رواناب، ابزار کاربردی و ایده‌آلی برای تخمین حجم رواناب مستقیم فراهم می‌کند. در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. حوضه آبخیز خرسان در استان کهگیلویه و بویراحمد یکی از زیرحوضه‌های حوضه کارون بزرگ است که از نظر منابع آب در کشور اهمیت بالایی دارد. به منظور شبیه‌سازی بارش–رواناب و تعیین مؤلفه‌های مهم در آن از مدل ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) استفاده گردید. مدل SWAT برای دوره ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۹ با استفاده از الگوریتم SUFI2 به‌طور خودکار کالیبره شد و در دوره ۱۳۷۶–۱۳۹۲ واسنجی و ۱۳۹۹–۱۳۹۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که از ۲۳ پارامتر مهم در واسنجی آن در این حوضه ۱۶ پارامتر مؤثر شامل CN2 (شماره منحنی SCS اولیه برای شرایط رطوبتی متوسط (II))، ALPHA_BF (ثابت تخلیه آب زیرزمینی)، GW_DELAY (زمان تأخیر انتقال آب از آخرین لایه به آب زیرزمینی)، SOL_BD (چگالی توده خاک)، SOL_AWC (ظرفیت آب قابل دسترس خاک)، SOL_K (هدایت هیدرولیکی اشباع خاک)، SOL_ALB (ضریب بازتاب (آلبیدو) خاک مرطوب)، GW_DELAY (زمان تأخیر آب زیرزمینی)، REVAPMN (ضریب تبخیر آب زیرزمینی)، SMTMP (دمای ذوب برف)، SMFMX (حداکثر نرخ ذوب برف در طول سال)، ALPHA_BN (ثابت تخلیه کانال)، CANMX (حداکثر نگهداشت تاج پوشش)، HRU_SLP (میانگین شیب) و SOL_Z (ضخامت لایه‌های خاک) وجود دارد. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از معیارهای RMSE، R^2 و NSE نشان می‌دهد که در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مقدار RMSE بترتیب ۱۸/۰۱ و ۵۳/۹۳ می‌باشد. مقدار ضریب R^2 نیز برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۹۱ و مقدار ضریب ناش–ساتکلیف (NSE) برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی بترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۳۶ می‌باشد. در مجموع با در نظر گرفتن سه معیار ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه مورد مطالعه از عملکرد خوبی برخوردار است که پیشنهاد می‌شود در مطالعه‌های مدیریت منابع آب و برآورد حجم رواناب تولیدی در حوضه مذکور مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مطالعات آتی به موضوع تخصیص منابع آب در حوضه مورد مطالعه با استفاده از مدل SWAT اقدام نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی شماره پژوهانه کد ۰۴-۱۴۰۰-۱ صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

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

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.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: کاکا شاهدی، راهنمایی، مشاوره، کنترل نتایج، ویرایش.

نویسنده دوم: حسین روشان، نگارش، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری.

نویسنده سوم: علی شاهنظری، مشاوره.

نویسنده چهارم: مهدی قربانی فرد، جمع آوری داده.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله نویسندگان از همکاری و مساعدت دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و تأمین مالی این پژوهشکمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

1- Abbaspour, K.C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J. & Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology, 333*(2-4), pp. 413-430. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014.

2- Achite, M., Mohammadi, B., Jehanzaib, M., Elshaboury, N., Pham, Q. B., & Duan, Z. 2022. Enhancing rainfall-runoff simulation via meteorological variables and a deep-conceptual learning-based framework. *Atmosphere, 13*(10), pp. 1688. https://doi.org/10.3390/atmos13101688.

3- Anwar, N. S. 2010. Simulated Impact of land use dynamics on Hydrology during a 20-ear-Preiod of deles basin in Ethiopia. TRITA-LWR Master Thesis, Department of Land and Water Resources Engineering Royal Institute of Technology (KTH).

4- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 34*(1), pp. 73-89. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

5- Baffaut, C., Farrand, T. D. & Benson, V. W. 2005. Potential accuracy of water quality estimates based on noncalibrated SWAT simulations. *3rd International SWAT Conference, Zurich, Switzerland,* 301-309.

6- Gholami, Sh. 2003. Daily sediment simulation model using SWAT distribution model in mountain watersheds (Emame watershed). *Research and Construction Quarterly, 16*(2), pp. 28-33. (In Persian).

7- Goodarzi, M., Zahabiyoun, B., & Massah Bavani, A. 2016. Simulation of Rainfall-Runoff for Gharesou Watershed Using SWAT Model. *Journal of Environmental Science and Technology, 18*(2), pp. 12-20. https://journals.srbiau.ac.ir/article_9797.html (In Persian).

8- He, C. 2003. Integration of geographic information systems and simulation model for watershed management. *Environmental Modelling & Software, 18*(8-9), pp. 809-813. https://swatplus.gitbook.io/docs/..

9- Hydrologic Engineering Center (HEC). 2000. *Hydrologic modeling system HEC–HMS*: technical reference manual, U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, Calif..

10- Kangsabanik, S., & Murmu, S. 2017. Rainfall-runoff modelling of Ajay river catchment using SWAT model. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 67(1), 012033. IOP Publishing.

11- Kumar, A., Kanga, S., Taloor, A. K., Singh, S. K., & Đurin, B. 2021. Surface runoff estimation of Sind River basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. *HydroResearch, 4*, pp. 61-74. https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.08.001.

12- Kurbah, S., & Jain, D. M. K. 2017. Rainfall-runoff modeling of a river basin using SWAT model. *International Journal of Engineering Research & Technology, 6*(12), pp. 293-302.

13- Legates, D. R., & McCabe Jr, G. J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research, 35*(1), pp. 233-241. https://doi.org/10.1029/1998WR900018.

14- Li, M., Di, Z., & Duan, Q. 2021. Effect of sensitivity analysis on parameter optimization: Case study based on streamflow simulations using the SWAT model in China. *Journal of Hydrology,* 603, pp. 1-17. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126896.

15- Mahmoudi, P., Zakeri Niri, M., & Najafi Jilani, A. 2021. Surface Runoff Simulation Based on SWATCUP Sensitivity Analysis Method (Case study: Ghareh-Chay River). *Nivar, 45*(112-113), pp. 46-58. https://doi.org/10.30467/nivar.2021.261833.1173 (In Persian).

16- Mai, J. 2023. Ten strategies towards successful calibration of environmental models. *Journal of Hydrology,* 620, pp. 1-24. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129414.

17- Moradi, A., Najafinejad, A., Ownegh, M., & Komaki, C. B. 2019. Assessment of the impacts of different Digital Elevation Models on runoff and suspended sediment estimations using SWAT model (Case Study: Galikesh watershed, Golestan Province). *Watershed Engineering and Management, 11*(1), pp. 62-75. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.118433 (In Persian).

18- Ndomba, P. M., & Birhanu, B. Z. 2008. Problems and prospects of SWAT model applications in Nilotic catchments: a review. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine, 1*, pp. 41-52..

19- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, R. Srinivasan, & Williams, J. R. 2002. *Soil and water assessment tool: User's Manual.* Published 2002 by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas TWRI Report TR-192.

20- 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, Technical Report No. 406, Texas A&M University System, Collage Station, Texas 77843-2118.

21- Phetanan, K., Hong, S. M., Yun, D., Lee, J., Chotpantarat, S., Jeong, H., & Cho, K. H. 2024. Enhancing flow rate prediction of the Chao Phraya River Basin using SWAT–LSTM model coupling. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 53*, pp. 1-19. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101820.

22- Rezaei Moghaddam, M. H., Mokhtari, D., & shafieimehr, M. 2021. Calibration and validation the SWAT model in the simulation of runoff and sediment in Shahr Chai of Miyaneh. *Journal of Geography and Planning, 25*(76), pp. 129-139. https://doi.org/10.22034/gp.2020.40775.2656.

23- 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), pp. 977-988. https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.977.

24- Sadoun, B. 2000. Applied system simulation: a review study. *Information Sciences, 124*(1-4), pp. 173-192. https://doi.org/10.1016/S0020-0255(99)00079-1.

25- Schuol, J., Abbaspour, K. C., Yang, H., Reichert, P., Srinivasan, R., Schar, Ch., & Zehnder, A. J. B. 2006. Estimation of freshwater availability in the West African Sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of hydrology, 352*(1-2), pp. 30-49. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025.

26- Singh, V. P. 1995. *Computer models of watershed hydrology.* 1-22. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.

27- Tolson, B. A. & Shoemaker, C. A. 2004. *Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and phosphorus transport to the Cannonsville reservoir.* Version 1.0. Technical Report, School of Civil and .Environmental Engineering, Cornell University., Ithaca, New York, 159 p..

28- Xue, H., Liu, J., Dong, G., Zhang, C., & Jia, D. 2022. Runoff Estimation in the Upper Reaches of the Heihe River Using an LSTM Model with Remote Sensing Data. *Remote Sensing, 14*(10), pp. 2488. https://doi.org/10.3390/rs14102488.

29- White, L. W., Vieux, B., Armand, D., & LeDimet, F. X. 2003. Estimation of optimal parameters for a surface hydrology model. *Advances in water resources, 26*(3), pp. 337-348. https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00189-6.

30- Yaghoubi, F., & Bahremand, A.R. 2011. Streamflow Simulation using Spatially Distributed Hydrologic Model, WetSpa in Chehel-Chai Watershed in Golestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation, 18*(3), pp. 185-207. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1390.18.3.11.9 (In Persian)..

31- Zand, M., & Samaei, R. 2017. Investigation on Amount and Intensity of Rainfalls in Flood Generation in Khorramabad Basin. *Nivar, 41*(96-97), pp. 1-8. https://doi.org/10.30467/nivar.2017.44813 (In Persian).

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 105-118

Research Paper

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

EXTENDED ABSTRACT

Determining The Wetted Perimeter and Water Flow Cross-Section in Furrow Irrigation Using Different Methods

A. Rahimi

Department of Water Science and Engineering,Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.(Ab.Rahimi1349@iau.ac.ir)

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 22 June 2025
Revised: 09 December 2025
Accepted: 29 December 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Evaluation, Manning's, SCS, and Parabolic Equations.

TO CITE THIS ARTICLE:

Rahimi, A. 2026. 'Determining The Wetted Perimeter and Water Flow Cross-Section in Furrow Irrigation Using Different Methods', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 105-118. doi: 10.22055/jise.2025.50008.2168.

Abstract

Most strategic crops such as sugarcane, sugar beet, and others are irrigated using the furrow method. The most important factors affecting water infiltration in the furrows include the wetted perimeter, flow cross-section, and so on. Evaluating the wetted perimeter and flow cross-section in furrow irrigation requires measuring parameters such as the cross-section, wetted perimeter, and others.At the farmlands of the Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Sanandaj, 20×20 meter grid was implemented to determine the land slope, and a topographical map was prepared. The furrows were created using a ridger with an approximately parabolic cross-section, spaced 0.75 meters apart and 80 meters long. A total of five measurement furrows and ten buffer furrows were created in one block for four consecutive irrigations, and the necessary experiments were conducted.The data were analyzed using MSTAT-C, SPSS, software.The Analysis of Variance results showed a significant difference at the one percent (1%) level between the mean wetted perimeter values in measurement furrows one to five and the cross-section meter and parabola equation. The coefficient of variation for this data was 0.03 percent. The mean wetted perimeter values for the cross-section meter and parabola equation methods were 48.36 cm and 48.31 cm, respectively.The results showed a significant difference at the one percent (1%) level between the mean flow cross-section values in furrows one to five and the two measurement methods. The coefficient of variation for this data was 2.18 percent. The mean flow cross-section values for the cross-section meter and parabola equation methods were 306.28 cm^2 and 347.43 cm^2, respectively.The fitted line equation and the correlation coefficient derived from the mean wetted perimeter values using the cross-section meter and parabola equation methods showed that the correlation coefficient for the wetted perimeter obtained equal to one and for the flow cross-section, it was approximately 0.99.

Introduction

Li et al (2023) surface irrigation is one of the most common irrigation methods in Iran and the world. Many strategic crops such as sugarcane, sugar beet, and corn are irrigated using the furrow method. The wetted perimeter, flow cross-section, infiltration opportunity time, furrow length, inflow rate, geometric shape, and furrow slope are among the most important factors affecting water infiltration in furrows. Behzad (1996) by definition, the length of the water-soil interface in the cross-section of the furrow is called the "wetted perimeter." Water infiltration in furrows is more complex due to the water-soil contact area, the effect of adjacent furrows, the geometric shape of the furrows, etc., on the amount of infiltration. Philip (1984) showed theoretically and experimentally that water infiltration from a curved surface is significantly greater than from a flat surface.

Wöhling et al. (2004) in order to study the effect of the wetted perimeter on water infiltration in furrows, performed infiltration tests using inflow and outflow methods, a circulating infiltrometer, and blocked furrows with constant and variable depths, and investigated equations. The results of the analysis of variance of the predicted infiltration values by each of the equations showed that infiltration equations that lack the effect of the wetted perimeter and flow cross-section in estimating the amount of water infiltration in the soil have the greatest error. On the contrary, equations that have wetted perimeter or flow cross-section parameters, in addition to having less error, have more flexibility to adapt to changes in hydraulic conditions in furrows compared to previous equations.

Research Methodology

The study area includes the lands of the Faculty of Agriculture of Islamic Azad University of Sanandaj, located 10 kilometers from the Sanandaj-Kermanshah road. This area has geographic coordinates of $36^{\circ}, 10', 38''$ northern latitude and $44^{\circ}, 03', 47''$ eastern longitude. There are several methods for evaluating the flow cross-section and wetted perimeter, including sectioning methods, parabolic equation, Manning's formula, and the United States Soil Conservation Service (SCS) method.

After preparing the land, 20×20 square meter grids were implemented to determine the land slope, and a topographic map of the land was prepared. Then, furrows with an approximately parabolic cross-section were created using a furrow shaper at a distance of 0.75 meters from each other and with a length of 80 meters in a block of 5 measurement furrows and 10 buffer furrows for four consecutive irrigations (first to fourth). Numerous experiments were performed, including measuring the geometric shape, inflow and outflow rate, irrigation depth, water surface width, and furrow slope. Irrigation was carried out using siphons$\frac{3}{4}$ and$1\frac{1}{4}$ inches from the earthen canal above the farm, and each furrow was irrigated with two$\frac{3}{4}$ siphons and one$1\frac{1}{4}$ inch siphon in an open-ended manner.

Results

In order to compare and evaluate the wetted perimeter and flow cross-section using the sectioning method, parabolic equation, Manning's formula, and the United States Soil Conservation Service (SCS) method in furrow irrigation, the required data including advance and recession time, inflow and outflow rate, depth and width of the water surface, and furrow slope were collected for five furrows and analyzed using MSTAT-C, SPSS, and Microsoft Office software. To compare between the sectioning method and the parabolic equation and determine the significance of the difference between the two methods in terms of the wetted perimeter and flow cross-section, and to determine the significance of the difference between the treatments, analysis of variance was performed using ANOVA through MSTAT-C software in a completely randomized design. Also, Duncan's multiple range test was used to determine the homogeneity of the difference between the treatments. The results of the analysis of variance related to the effect of the sectioning method and the parabolic equation for the wetted perimeter and flow cross-section are presented in Tables (1 and 2).

Table 1 - Results of Analysis of Variance of the Effect of Measurement Method on Wetted Perimeter

Row	Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares
1	Block	4	2.28**
2	Measurement Method	1	0.007**
3	Error	4	0.001
4	Total	9	
5	Coefficient of Variation (CV) % 0.03		

** Significant at the 1% level * Significant at the 5% level ns Non-significant

Table 2 - Results of Analysis of Variance of the Effect of Measurement Method on Flow Cross-Sectional Area

Row	Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares
1	Block	4	1817.810**
2	Measurement Method	1	4232.607**
3	Error	4	50.927
4	Total	9	
5	Coefficient of Variation (CV)	% 2.18	

** Significant at the 1% level * Significant at the 5% level ns Non-significant

The results of the analysis of variance of the experimental data showed that there is a significant difference at the 1% level between the average values of the flow cross-section in the measurement blocks (furrows 1 to 5) and the measurement methods (sectioning and parabolic equation), and the coefficient of variation of the data is 2.18%. The average values of the flow cross-section in the two sectioning and parabolic equation methods were 306.28 and 347.43 square centimeters, respectively.

The results of fitting regression lines along with the fitted line equation and correlation coefficient between the average values of the flow cross-section with the sectioning and parabolic equation methods were evaluated. The results showed that the highest correlation coefficient in the flow cross-section obtained from the two measurement methods was related to furrow number two, equal to 0.99, and the lowest correlation coefficient was related to furrow number four, equal to 0.99. The results of fitting regression lines along with the fitted line equation and correlation coefficient between the average values of the wetted perimeter with the sectioning and parabolic equation methods were evaluated in all furrows. The results showed that the correlation coefficient in the wetted perimeter obtained from the two methods is approximately equal to one for all furrows and is approximately 0.99 for the flow cross-section (Figures 1 and 2).

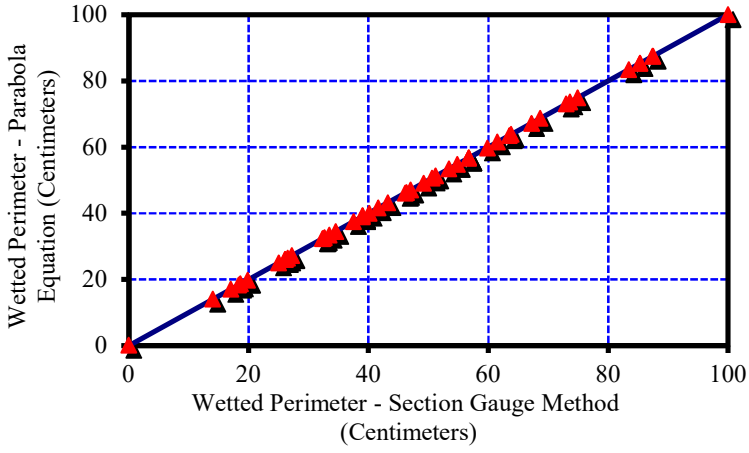


Fig. 1-Comparison of Wetted Perimeter Values Using the Section Measurement and Parabola Equation Methods in Furrows Number 1 to 5.

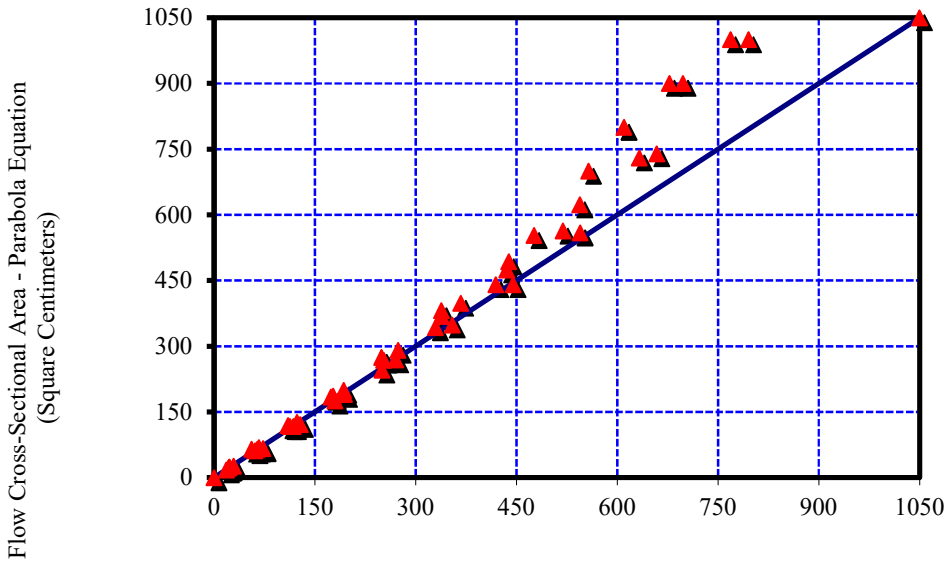


Fig. 2- Comparison of Flow Cross-Sectional Area Values Using the Section Measurement and Parabola Equation Methods in Furrows Number 1 to 5.

Conclusion

The results of the analysis of variance of the experimental data showed that there is a significant difference at the 1% level between the average values of the wetted perimeter in the measurement blocks (furrows 1 to 5) and the measurement methods (sectioning and parabolic equation), and the coefficient of variation of the data is 0.03%. The average values of the wetted perimeter in the two sectioning and parabolic equation methods were 48.361 and 48.31 cm, respectively. Also, the results of the analysis of variance of the experimental data showed that there is a significant difference at the 1% level between the average values of the flow cross-section in the measurement blocks (furrows 1 to 5) and the measurement methods (sectioning and parabolic equation), and the coefficient of variation of the data is 2.18%. The average values of the flow cross-section in the two sectioning and parabolic equation methods were 306.28 and 347.43 cm2, respectively.

Conflict of Interest

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

Funding

The financial support of this research has been provided by Islamic Azad University, Sanandaj and we hereby thank the Honorable Vice Chancellor of Research from Islamic Azad University, Sanandaj. for their support.

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

Author: Abubakr Rahimi،Department of Water Science and Engineering,Sa.C., Islamic Azad University, Sanandaj, Iran.

Acknowledgments

This article is the result of research financially supported by the Islamic Azad University, Sanandaj Branch. Therefore, we would like to express our gratitude and appreciation to this university unit.

References

1-Behzad,M., 1996. Study of the effect of wetted perimeter on water penetration in furrows. PhD thesis, Faculty of Agriculture, *Tarbiat Modares University*, 218 pages.

2_Li, J., Zhu, Y., Jin, H., Zhou, B., Han, L., Wang, H. and Wei, C., 2023. Approximate water vertical infiltration extremum path in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, *625*, p.129989. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129989.

3- Philip, J.R., 1984. Steady infiltration from circular cylindrical cavities. *Soil Science Society of America Journal*, *48*(2), pp.270-278. https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020008x

4- Wöhling, T., Schmitz, G.H. and Mailhol, J.C., 2004. Modeling two-dimensional infiltration from irrigation furrows. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(4), pp.296-303. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(296).

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری
جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۱۸-۱۰۵

تعیین محیط خیس شده و سطح مقطع جریان آب در آبیاری جویچه‌ای با استفاده اززروش‌های مختلف

ابوبکر رحیمی

گروه علوم ومهندسی آب، واحد سنندج،دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج،ایران.Ab.Rahimi1349@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۸ انتشار: ۱۴۰۵/۵/۱۵

چکیده

اغلب محصولات استراتژیک مثل نیشکر، چغندرقند و ... به روش جویچه‌ای آبیاری می‌شوند. از مهمترین عوامل مؤثر بر نفوذ آب در جویچه‌ها می‌توان به محیط خیس شده، سطح مقطع جریان و ... اشاره نمود. ارزیابی محیط خیس شده و سطح مقطع جریان در آبیاری جویچه‌ای نیاز به اندازه‌گیری پارامترهایی مانند شکل سطح مقطع جریان، محیط خیس شده و... می‌باشد. در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی سنندج برای تعیین شیب زمین، شبکه‌های ۲۰×۲۰ متر مربع اجرا و نقشه توپوگرافی زمین تهیه گردید. جویچه‌ها به‌وسیله جوی پشته‌بند با مقطعی تقریباً سهمی شکل به فاصله ۰/۷۵ متر از یکدیگر و به طول ۸۰ متر در یک بلوک مجموعاً پنج جویچه لندازه‌گیری و ده جویچه حایل برای انجام چهار آبیاری متوالی ایجاد و آزمایش‌های لازم انجام گردید. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهایMSTAT-C ، SPSS و ... مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مورد آزمایش بین مقادیر متوسط محیط خیس شده در جویچه‌های یک تا پنج و روش‌های مقطع سنج ومعادله سهمی تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد را نشان داد و ضریب تغییرات داده‌ها برابر۰/۰۳ درصد می‌باشد. مقادیر متوسط محیط خیس شده در دو روش مقطع سنج ومعادله سهمی به‌ترتیب برابر ٤٨/٣٦ و ٤٨/٣١ سانتی‌متر بوده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مورد آزمایش بین مقادیر متوسط سطح مقطع جریان در جویچه‌های یک تا پنج وروش‌های مقطع سنج و معادله سهمی تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد داشتند وضریب تغییرات داده‌ها برابر۲/۱۸ درصد می‌باشد. مقادیر متوسط سطح مقطع جریان در دو روش مقطع سنج و معادله سهمی به‌ترتیب برابر ۳۰٦/۲۸و۳٤۷/٤۳ سانتی‌متر مربع بوده است. معادله خط برازش یافته و ضریب همبستگی، حاصل از مقادیر متوسط محیط خیس شده با روش‌های مقطع سنج و معادله سهمی حاصل از دو روش اندازه‌گیری برای تمامی جویچه‌ها تقریباً برابر یک و برای سطح مقطع جریان حدود ۰/۹۹ می‌باشد.

کلیدواژه ها: ارزیابی، معادله های مانینگ ،SCS وسهمی.

مقدمه

آبیاری سطحی یکی از متداولترین روش‌های آبیاری در ایران و جهان است. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای که در سایر روش‌های آبیاری به‌وجود آمده آبیاری سطحی در اغلب کشورها از جمله ایران همچنان با روش‌های سنتی اجرا می‌گردد و تاکنون تغییر قابل توجهی در این روش مهم آبیاری داده نشده است. بدیهی است که با توجه به افزایش جمعیت و محدودیت منابع آب و خاک نمی‌توان برای همیشه با بازده‌های موجود آبیاری سطحی را ادامه داد و لازم است که بازده‌های آبیاری افزایش داده شود. برای افزایش بازده‌های آبیاری به‌خصوص آبیاری سطحی قبل از هر چیز شناخت مسئله و مطالعه پدیده پیچیده نفوذ آب در خاک لازم است. آبیاری سطحی به روش‌های آبیاری کرتی، نواری و جویچه‌ای اجرا می‌شود. نفوذ آب در کرت‌ها و نوارها عمدتاً یک بعدی است که به‌طور عمودی و در جهت نیروی ثقل صورت می‌گیرد. در جویچه‌ها نفوذ آب دو بعدی بوده و در جهت عمودی و افقی به‌وسیله نیروی ثقل و موئینگی انجام می‌شود (Li et al., 2023). به‌علت اینکه اغلب محصولات استراتژیک مثل نیشکر، چغندرقند، ذرت و ... به روش جویچه‌ای آبیاری می‌شوند و از مهمترین عوامل مؤثر بر نفوذ آب در جویچه‌ها می‌توان به محیط خیس شده ، سطح مقطع جریان ،فرصت زمان نفوذ ، طول جویچه، شدت جریان ورودی، شکل هندسی و شیب جویچه‌ها اشاره نمود. با توجه به اینکه در اکثر معادله‌های نفوذ آب در جویچه‌ها پارمترهای شکل هندسی جویچه، محیط خیس شده و سطح مقطع جریان نقش اساسی در مقدار نفوذ آب در خاک را دارند از این جهت به ارزیابی این مهم پرداخته خواهد شد. بنا به تعریف طول فصل مشترک آب با خاک را در مقطع عرضی جویچه «محیط خیس شده» گویند Behzad (1996).

محیط خیس شده در مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای نسبت به زمان و مکان متغیر می‌باشد و لازم است اثر آن بر مقدار نفوذ مورد بررسی قرار گرفته تا در صورت لازم برای بالا بردن کیفیت طراحی، مدیریت و اجرا در مدل‌های آبیاری سطحی منظور گردد. روند تغییرات محیط خیس شده در طول جویچه بستگی به نوع خاک، زبری جویچه، کمبود رطوبت خاک، شیب جویچه و مقدار جریان ورودی دارد لذا تعیین اثر محیط خیس شده بر مقدار نفوذ به منزله تعیین غیر مستقیم اثر عوامل مذکور نیز می باشد. نفوذ آب در کرت‌ها و نوارها پدیده پیچیده‌ای است که به نوع خاک و شرایط

سطح آن بستگی دارد و نفوذ آب در جویچه‌ها به‌علت سطح تماس آب با خاک، اثر جویچه‌های مجاور شکل هندسی جویچه‌ها و ... بر مقدار نفوذ پیچیده‌تر است بدیهی است وارد کردن اثر همه عوامل در معادله‌های نفوذ بررسی مسئله را پیچیده‌تر می‌کند و لذا معمولاً سعی می‌شود اثر عوامل مختلف بررسی و عوامل مؤثرتر را انتخاب و وارد معادله‌های نفوذ نمود. علاوه بر نوع خاک و شرایط سطح آن عمده‌ترین عوامل مؤثر بر نفوذ آب در جویچه‌ها می‌توان به فرصت نفوذ ، فاصله جویچه‌ها، شکل هندسی، سرعت جریان سطحی، شدت جریان ورودی، شیب زمین، محیط خیس شده، هوا و شکاف‌های موجود در خاک و غیره اشاره نمود. شکل هندسی جویچه‌ها بر مقدار نفوذ مؤثر می‌باشد.

Philip et al.(1984) با تئوری و تجربه نشان داد که نفوذ آب از یک سطح منحنی شکل به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از یک سطح مسطح است.

Gillies et al., (2005) تأثیر شکل مقطع جویچه (ذوزنقه‌ای و مثلثی) و رطوبت اولیه خاک بر میزان نفوذ در آبیاری سطحی را مورد مطالعه قرار دادند و معادله‌های دو بعدی نفوذ را به‌دست آوردند. Martin (2002) فرض کرد که شکل هندسی تأثیر چندانی بر مقدار نفوذ نداشته وآن را مستطیلی در نظر گرفته ومعادله های نفوذ دو بعدی آب در جویچه ها را ارائه کردند. Dibal et al.(2014) تأثیر سرعت جریان سطحی بر مقدار نفوذ آب در جویچه‌ها را فرسایش، حمل ذرات، رسوب‌گذاری مجدد و مسدود شدن خلل و فرج سطح نفوذپذیر و یا تشکیل سله توسط سرعت جریان سطحی و یا تنش بررشی حاصل از آن می‌داند.

De Queiroz et al. (2020)دسترسی به یک رابطه نفوذ شدت جریان ورودی به‌منظور پیش بینی تغییرات نفوذ با شدت جریان ورودی درجویچه‌ها راضروری می‌دانند، آن‌ها به‌علت عدم دسترسی به چنین رابطه‌ای از یک روش ساختگی برای منظور کردن اثر این پدیده استفاده کرده‌اند. بدین ترتیب که مقدار نفوذ آب درجویچه‌ها رلباتوجه به محیط خیس شده و شدت جریان نرمال محاسبه نموده وسپس برای محاسبه مقدار نفوذ با شدت جریان مورد نظر آن را در نسبت محیط خیس شده شدت جریان مورد نظر به محیط خیس شده شدت جریان نرمال ضرب نموده اند.

Wöhling et al., (2004) به‌منظور مطالعه اثر محیط خیس شده بر نفوذ آب درجویچه‌ها به روش‌های ورودی وخروجی، نفوذسنج گردشی، و جویچه‌های مسدود با عمق ثابت و متغیر آزمایش‌های نفوذپذیری را انجام و معادله‌ها را مورد بررسی قرار داد، نتایج تجزیه واریانس مقادیر پیش‌بینی نفوذ به‌وسیله هر یک از معادله‌های نشان داد که معادله‌های نفوذی که فاقد اثر محیط خیس شده و سطح مقطع جریان در برآورد میزان نفوذ آب در خاک می‌باشند دارای بیشترین خطا هستند ولی برعکس معادله‌های که دارای پارامترهای محیط خیس شده یا سطح مقطع جریان هستند علاوه بر خطای کمتر دارای انعطاف‌پذیری بیشتری برای تطابق با تغییرات شرایط هیدرولیکی در جویچه‌ها نسبت به معادله‌های قبلی می‌باشند. در نهایت استفاده از معادله‌های که دارای پارامترهای محیط خیس شده یا سطح مقطع جریان هستند برای برآورد میزان نفوذ آب در جویچه‌ها را توصیه نمود زیرا دقت محاسبات و بازده آبیاری را بالا می‌برد. به‌منظور مطالعه اثر محیط خیس شده و سطح مقطع جریان بر میزان نفوذ آب در جویچه‌ها و تعیین این دو پارامتر با استفاده از روش‌های مقطع سنج، معادله‌های سهمی، مانینگ و سازمان حفاظت خاک امریکا بایستی آزمایش‌های نفوذپذیری به روش ورودی وخروجی انجام و داده‌های مورد نیاز شامل زمان پیشروی و پسروی، شدت جریان ورودی وخروجی، عمق و عرض سطح آب و شیب جویچه‌ها برای جویچه‌ها جمع‌آوری و سپس از طریق فرمول‌های زیر ضرایب شکل جویچه‌ها تعیین تا در نهایت به کمک روش‌های فوق‌الذکر بتوان به ارزیابی محیط خیس شده و سطح مقطع جریان پرداخت.

$$T_W = a_1 Y^{a_2} \quad (۱)$$

$$A = \delta_1 Y^{\delta_2} \quad (۲)$$

$$W_P = \gamma_1 Y^{\gamma_2} \quad (۳)$$

$$A = \rho_1 {W_P}^{\rho_2} \quad (۴)$$

که درآن:

T_W ،A،Y و W_P به‌ترتیب عرض سطح آب، سطح مقطع جویچه، عمق جریان و محیط خیس شده جویچه می‌باشند و a_1،a_2،δ_1،δ_2،γ_1،γ_2،ρ_1وρ_2= پارامترهای معادل یا ضرایب شکل هندسی جویچه‌ها با توجه به عمق و عرض سطح آب در جویچه‌ها و با فرض شکل سهمی برای جویچه‌ها می‌توان از معادله‌های سهمی به شکل زیر محیط خیس شده و سطح مقطع جریان را تعیین نمود:

$$W_P = \left(\frac{T_{op}}{2}\right)\left[\sqrt{1+X^2} + \frac{1}{X} Ln\left(X + \sqrt{1+X^2}\right)\right] \quad (۵)$$

$$X = \frac{4Y}{T_{op}} \quad (۶)$$

$$\mathrm{A} = \frac{2}{3}\left(\mathrm{Y}.\mathrm{T_{op}}\right) \quad (۷)$$

که درآن Y،T_{op}،AوW_P به‌ترتیب عمق جریان، عرض سطح آب، سطح مقطع جریان و محیط خیس شده می‌باشند. Manineg نیز با فرض جریان یکنواخت معادله‌های زیر را برای برآورد محیط خیس شده پیشنهاد نمود:

DOI: 10.22055/jise.2025.50008.2168

$$W_P = a_P \left[\frac{n' Q_{in}}{\sqrt{S}}\right]^{\frac{3}{(5\rho_2 - 2)}} \quad (۸)$$

$$a_P = \rho_1^{\frac{-5}{(5\rho_2 - 2)}} \quad (۹)$$

که در آن Q_{in}،Sوn' به‌ترتیب شدت جریان ورودی، شیب جویچه‌ها و ضریب زبری مانینگ می‌باشند. برای تعیین ضرایب شکل جویچه‌ها باید از داده‌های حاصل از روش مقطع سنج استفاده نمود. Mazarei et al., (2021) با معلوم بودن ضریب مانینگ، شیب کف جویچه‌ها و شدت جریان ورودی می‌توان محیط خیس شده برای ابتدای جویچه‌ها محاسبه نمود. سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) نیز با استفاده از معادله (۹) معادله زیر را جهت تعیین محیط خیس شده پیشنهاد نمود:

$$W_P = 0.265 \left[\frac{n' Q_{in}}{\sqrt{S}}\right]^{0.4247} + 0.227 \quad (۱۰)$$

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق شامل اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی سنندج واقع در ده کیلومتری جاده سنندج- کرمانشاه می‌باشد. این منطقه دارای مختصات جغرافیایی ۳۶ درجه،۱۰ دقیقه و ۳۸ ثانیه عرض شمالی و۴۴ درجه، ۳ دقیقه و۴۷ ثانیه طول شرقی می‌باشد (شکل۱).

به‌منظور ارزیابی، طراحی و یا شبیه‌سازی یک سیستم آبیاری جویچه‌ای و به خصوص تعیین معادله نفوذ آب به جویچه که بیانگر وضعیت طبیعی جویچه‌های تحت مطالعه می‌باشد ارزیابی محیط خیس شده و سطح مقطع جریان ضروری است، هر قدر این ارزیابی دقیق‌تر باشد بهتر می‌توان سیستم‌های مورد نظر را ارزیابی، طراحی و یا شبیه‌سازی نمود.

روش‌های متعددی برای ارزیابی سطح مقطع جریان و محیط خیس شده وجود دارند که از آن جمله می‌توان به روش‌های مقطع سنج، معادله سهمی، فرمول مانینگ و سازمان حفاظت خاک آمریکا اشاره نمود .برای ارزیابی محیط خیس شده و سطح مقطع جریان و تأثیر آن بر میزان نفوذپذیری انجام آزمایش‌های نفوذ پذیری به یکی ازروش‌های ورودی-خروجی، جویچه مسدود شده و نفوذسنج گردشی (بازگردلندن رولناب انتهای جویچه) الزامی است، که در این تحقیق با توجه به اینکه روش ورودی-خروجی در آبیاری مزارع کشاورزی بیشتر قابل توجه و کاربردی است استفاده گردید.

پس از آماده سازی زمین برای تعیین شیب زمین، شبکه‌های ۲۰×۲۰ مترمربع اجرا و نقشه توپوگرافی زمین تهیه می‌گردد سپس جویچه‌ها به‌وسیله جوی و پشته بند با مقطعی تقریباً سهمی شکل به فاصله ۰/۷۵ متر از یکدیگر و به طول ۸۰ متر در یک بلوک مجموعاً پنج جویچه اندازه گیری و ده جویچه حایل برای انجام چهار آبیاری متوالی (اول تا چهارم) وآزمایش‌های متعدد از جمله اندازه‌گیری شکل هندسی، شدت جریان ورودی وخروجی، عمق آبیاری، عرض سطح آب، شیب جویچه‌ها و غیره انجام شد. آبیاری به‌وسیله سیفون‌های سه چهارم و یک و یک چهارم اینچ از نهر خاکی بالای مزرعه انجام گردید. هر جویچه با دوسیفون سه چهارم و یک سیفون یک و یک چهارم اینچ آبیاری و تمام جویچه‌ها به‌صورت انتها باز آبیاری شدند.



Fig. 1- Study Area
شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

برای دستیابی به اطلاعات لازم جهت تحقق اهداف طرح شده و پاسخ مناسب برای سئوالات تحقیق، و به‌منظور مطالعه اثر محیط خیس شده و سطح مقطع جریان برمیزان نفوذ آب در جویچه‌ها آزمایش‌های نفوذ پذیری با اثر محیط خیس شده و شدت جریان ورودی به روش ورودی و خروجی انجام شد. به‌منظور مقایسه وارزیابی محیط خیس شده وسطح مقطع جریان با استفاده ازروش‌های مقطع سنج، معادله معادله‌های سهمی، فرمول مانینگ وسازمان حفاظت خاک آمریکا در آبیاری جویچه‌ای، داده‌های مورد نیاز شامل زمان پیشروی و پسروی، شدت جریان ورودی و خروجی، عمق و عرض سطح آب و شیب جویچه‌ها برای پنج جویچه جمع‌آوری و با استفاده از نرم‌افزارهایMSTAT-C ، SPSS و Microsoft Office مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

برای مقایسه بین روش مقطع سنج و معادله سهمی و تعیین معنی‌دار بودن اختلاف بین دو روش در مورد محیط خیس شده و سطح مقطع جریان و تعیین معنی‌دار بودن اختلاف بین تیمارها، در قالب طرح کاملاً تصادفی، تجزیه واریانس از طریق آزمون ANOVA با استفاده از نرم افزار MSTAT-C صورت گرفت. همچنین آزمون چند دامنه‌ای دانکن به‌منظور تعیین همگن بودن اختلاف بین تیمارها به‌کارگرفته شد. نتایج مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک و تجزیه واریانس مربوط به اثر روش مقطع سنج و معادله سهمی برای محیط خیس شده و سطح مقطع جریان در جداول (۱) تا (۳) ارائه شده است. همچنین برای تعیین دقت آزمایش‌ها از ضریب تغییرات که مبین خطا بر حسب درصد میانگین آزمایش‌ها است استفاده شد و مقدار ضریب تغییرات بر حسب درصد به‌دست آمد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مورد آزمایش نشان داد که بین مقادیر متوسط محیط خیس شده در بلوک‌های اندازه گیری (جویچه‌های یک تا پنج) و روش‌های اندازه گیری (مقطع سنج و معادله سهمی) تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد وضریب تغییرات داده‌ها برابر۰/۰۳ درصد می‌باشد . مقادیر متوسط محیط خیس شده در دو روش مقطع سنج و معادله سهمی به ترتیب برابر ۴۸/۳۶ و۴۸/۳۱ سانتی‌متر بوده است (شکل۲). همچنین نتایج تجزیه واریانس داده‌های مورد آزمایش نشان داد که بین مقادیر متوسط سطح مقطع جریان در بلوک‌های اندازه‌گیری (جویچه‌های یک تا پنج) و روش‌های اندازه‌گیری (مقطع سنج ومعادله سهمی) تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد وضریب تغییرات داده‌ها برابر۲/۱۸ درصد می‌باشد. مقادیر متوسط سطح مقطع جریان در دو روش مقطع سنج و معادله سهمی به‌ترتیب برابر ۳۰۶/۲۸و۳۴۷/۴۳ سانتی‌متر مربع بوده است (شکل۳).

جدول۱- خصوصیات فیزیکی خاک در عمق‌های مختلف

Table 1 - Physical characteristics of soil at different depths

Deep Soil (cm)	Percentage of Soil Particles clay (%)	silt (%)	Sand (%)	Soil Texture	Bulk Density (gr/cm^3)	Particle Density (gr/cm^3)
0-30	33	34	33	Clay Loam	1.37	2.60
30-60	37	32	31	Loam	1.35	2.61
60-90	21	24	55	Clay Loam	1.68	2.53

جدول۲- نتایج تجزیه واریانس اثر روش اندازه گیری بر محیط خیس شده

Table 2 - Results of Analysis of Variance of the Effect of Measurement Method on Wetted Perimeter

Row	Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares
1	Block	4	2.28**
2	Measurement Method	1	0.007**
3	Error	4	0.001
4	Total	9	
5	Coefficient of Variation (CV) %	0.03	

** Significant at the 1% level * Significant at the 5% level ns Non-significant

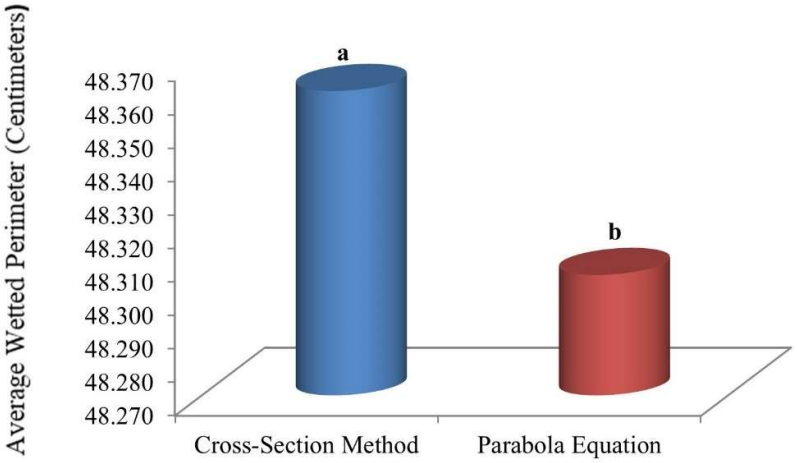
DOI: 10.22055/jise.2025.50008.2168

جدول۳- نتایج تجزیه واریانس اثر روش اندازه گیری بر سطح مقطع جریان

Table 3 - Results of Analysis of Variance of the Effect of Measurement Method on Flow Cross-Sectional Area

Row	Source of Variation	Degrees of Freedom	Sum of Squares
1	Block	4	1817.810**
2	Measurement Method	1	4232.61**
3	Error	4	50.93
4	Total	9	
5	Coefficient of Variation (CV) % 2.18		

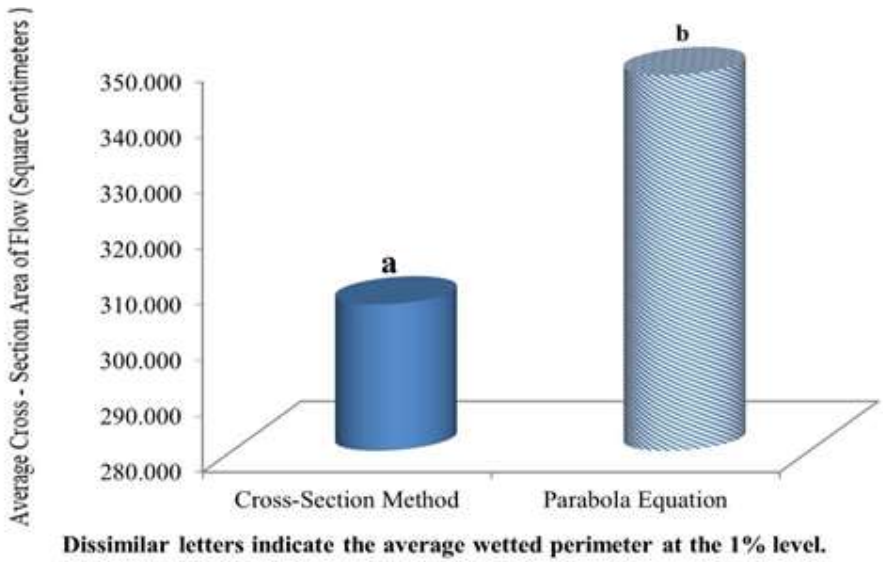
** Significant at the 1% level * Significant at the 5% level ns Non-significant



Dissimilar letters indicate the average wetted perimeter at the 1% level.

Fig. 2- Comparison of Mean Values of Wetted Perimeter Using Different Measurement Methods with Duncan's test

شکل۲- مقایسه میانگین های محیط خیس شده درروش های مختلف اندازه گیری با آزمون دانکن



Dissimilar letters indicate the average wetted perimeter at the 1% level.

Fig. 3- Comparison of Mean Flow Cross-Sectional Areas Using Different Measurement Methods with Duncan's test

شکل۳- مقایسه میانگین های سطح مقطع جریان درروش های مختلف اندازه گیری با آزمون دانکن

همچنین نتایج برازش خطوط رگرسیون همراه با معادله خط برازش یافته و ضریب همبستگی بین مقادیر متوسط سطح مقطع جریان و محیط خیس شده با روش‌های مقطع سنج و معادله سهمی به تفکیک مورد ارزیابی قرار گرفت (جداول ۴ و ۵ و شکل‌های ۴ و ۵). نتایج نشان داد که ضریب همبستگی در محیط خیس شده حاصل از دو روش اندازه‌گیری برای تمامی جویچه‌ها تقریباً برابر یک و برای سطح مقطع جریان حدود ۰/۹۹می‌باشد. نتایج نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی در سطح مقطع جریان حاصل از دو روش اندازه‌گیری مربوط به جویچه شماره دو برابر ۰/۹۹ و کمترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به جویچه شماره چهار برابر ۰/۹۹ است.

Nasseri et al. (2004) با ایجاد همبستگی ساده و جزئی بین نفوذ تجمعی و متغیرهای مستقل نفوذ دریافتند که اثر سطح مقطع جریان و محیط خیس شده بر نفوذ تجمعی معنی‌دار می‌باشد. به‌منظور بررسی بیشتر نتایج برازش خطوط رگرسیون همراه با معادله خط برازش یافته و ضریب همبستگی بین مقادیر متوسط محیط خیس شده با روش‌های مقطع سنج و معادله سهمی در تمامی جویچه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی در محیط خیس شده حاصل از دو روش برای تمامی جویچه‌ها تقریباً برابر یک و برای سطح مقطع جریان حدود ۰/۹۹ می‌باشد. رابطه بین مقادیر محیط خیس شده و سطح مقطع جریان در دو روش اندازه‌گیری مقطع سنج و معادله سهمی در جدول (۶) ارائه شده است.

Wöhling et al.(2004) به این نتیجه رسیدندکه بهترین متغیر برای محاسبه نفوذ دوبعدی آب به خاک در آبیاری جویچه‌ای محیط خیس شده می‌باشد. رابطه سرعت نفوذ آب در جویچه با محیط خیس شده جویچه همبستگی مثبتی وجود دارد. تعدادی از محققین براین باورند که تغییرات محیط خیس شده جویچه یک سوم تغییرات نفوذ را تشکیل می دهد.

جدول٤- معادله خط برازش یافته وضریب همبستگی برای محیط خیس شده

Table 4 – Linear Regression Equation and Correlation Coefficient for Wetted Perimeter

Furrow Number	Measured Parameter	Measurement Method	Fitted Line Equation	Correlation Coefficient
1	Wetted Perimeter	Cross-section & Parabolic	$W_P = 1.0013W_P' - 0.1449$	1
2	Wetted Perimeter	Cross-section & Parabolic	$W_P = 1.0007W_P' - 0.0835$	1
3	Wetted Perimeter	Cross-section & Parabolic	$W_P = 0.9989W_P' - 0.0103$	1
4	Wetted Perimeter	Cross-section & Parabolic	$W_P = 1.0023W_P' - 0.1652$	1
5	Wetted Perimeter	Cross-section & Parabolic	$W_P = 0.999W_P' - 0.0235$	1

W_P= Wetted Perimeter (Parabolic Equation) W_P' = Wetted Perimeter (Cross-section Method)

جدول٥- معادله خط برازش یافته وضریب همبستگی برای سطح مقطع جریان

Table 5 — Fitted Line Equation and Correlation Coefficient for Flow Cross-section

Furrow Number	Measured Parameter	Measurement Method	Fitted Line Equation	Correlation Coefficient
1	Flow Cross-ection	Cross-section and parabolic	$A = 1.2501A' - 43.073$	0.992
2	Flow Cross-section	Cross-section and parabolic	$A = 1.2818A' - 27.978$	0.9965
3	Flow Cross-section	Cross-section and parabolic	$A = 1.2789A' - 33.642$	0.9932
4	Flow Cross-section	Cross-section and parabolic	$A = 1.2064A' - 45.529$	0.9909
5	Flow Cross-section	Cross-section and parabolic	$A = 1.269A' - 34.418$	0.9918

A = Flow Cross-section (Parabolic Equation) A'= Flow Cross-section (Cross-section Method)

DOI: 10.22055/jise.2025.50008.2168

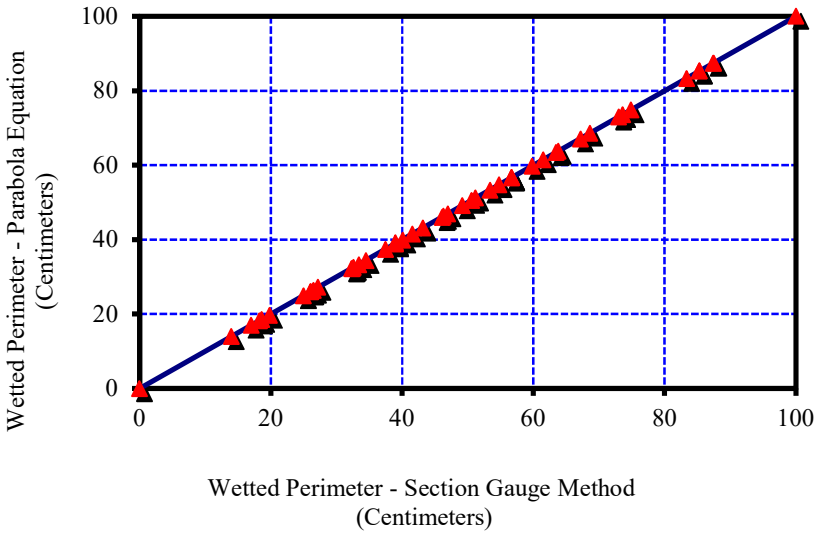


Fig. 4- Comparison of Wetted Perimeter Values Using the Section Measurement and Parabola Equation Methods in Furrows Number 1 to 5.

شکل٤- مقایسه مقادیر محیط خیس شده به دو روش مقطع سنج ومعادله سهمی در جویچه های شماره یک تا پنج

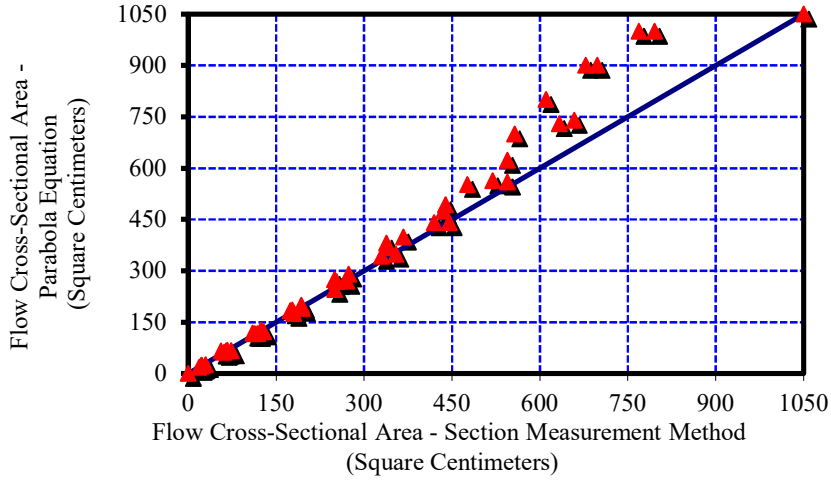


Fig. 5- Comparison of Flow Cross-Sectional Area Values Using the Section Measurement and Parabola Equation Methods in Furrows Number 1 to 5

شکل٥- مقایسه مقادیر سطح مقطع جریان به دو روش مقطع سنج ومعادله سهمی در جویچه های شماره یک تا پنج

جدول٦- معادله خط برازش یافته وضریب همبستگی برای محیط خیس شده وسطح مقطع جریان

Table 6 — Fitted Line Equation and Correlation Coefficient for Wetted Perimeter and Flow Cross-Section

Row	Measured Parameter	Measurement Method	Fitted Line Equation	Correlation Coefficient
1	Wetted Perimeter	Cross-section & Parabolic	$W_P = 1.0006W_P' - 0.0796$	1
2	Flow Cross-Section	Cross-section & Parabolic	$A = 1.1912A' - 21.439$	0.9879

W_P= Wetted Perimeter (Parabolic Equation) W_P' = Wetted Perimeter (Cross-section Method)
A = Flow Cross-section (Parabolic Equation) A'= Flow Cross-section (Cross-section Method)

نتیجه گیری

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مورد آزمایش نشان داد که بین مقادیر متوسط محیط خیس شده در بلوک‌های اندازه‌گیری (جویچه‌های یک تا پنج) و روش‌های لندازه‌گیری (مقطع سنج و معادله سهمی) تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد و ضریب تغییرات داده‌ها برابر ۰/۰۳ درصد می‌باشد . مقادیر متوسط محیط خیس شده در دو روش مقطع سنج و معادله سهمی به‌ترتیب برابر ۴۸/۳۶ و ۴۸/۳۱ سانتی‌متر بوده است. همچنین نتایج تجزیه واریانس داده‌های مورد آزمایش نشان داد که بین مقادیر متوسط سطح مقطع جریان در بلوک‌های اندازه‌گیری (جویچه‌های یک تا پنج) و روش‌های اندازه‌گیری (مقطع سنج و معادله سهمی) تفاوت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد و ضریب تغییرات داده‌ها برابر ۲/۱۸ درصد می‌باشد. مقادیر متوسط سطح مقطع جریان در دو روش مقطع سنج و معادله سهمی به‌ترتیب برابر ۳۰۶/۲۸ و ۳۴۷/۴۳ سانتی‌متر مربع بوده است. به‌منظور بررسی بیشتر نتایج برازش خطوط رگرسیون همراه با معادله خط برازش یافته و ضریب همبستگی آن‌ها بین مقادیر متوسط محیط خیس شده با روش‌های مقطع سنج ومعادله سهمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب همبستگی در محیط خیس شده حاصل از دو روش لندازه‌گیری برای تمامی جویچه‌ها تقریباً برابر یک و برای سطح مقطع جریان حدود ۰/۹۹ می‌باشد.

در این تحقیق تفاوت‌های بارزی بین نتایج محیط خیس شده و سطح مقطع جریان در جویچه‌ها با روش‌های مقطع سنج، معادله سهمی، معادله مانینگ و معادله سازمان حفاظت خاک آمریکا مشاهده شدکه نتایج محیط خیس شده و سطح مقطع جریان می‌تولند اثر قابل ملاحظه‌ای در برآورد میزان نفوذ آب در خاک در روش‌های آبیاری سطحی به‌ویژه آبیاری جویچه‌ای و در نهایت تلفات آب ومقدار بازده آبیاری داشته باشد

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

حمایت های مالی این تحقیق از محل اعتبار پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج صورت گرفته است.

دسترسی به داده‌ها

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

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.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده: ابوبکر رحیمی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران.

تشکر وقدردانی

این مقاله حاصل تحقیقی بوده که دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج از آن حمایت مالی نموده است. لذا بدینوسیله از این واحد دانشگاهی تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

1- Behzad,M., 1996. Study of the effect of wetted perimeter on water penetration in furrows. PhD thesis, Faculty of Agriculture, *Tarbiat Modares University*, 218 pages.

2- De Queiroz, M.G., Da Silva, T.G.F., Zolnier, S., Jardim, A.M.D.R.F., de Souza, C.A.A., Júnior, G.D.N.A., de Morais, J.E.F. and de Souza, L.S.B., 2020. Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *Catena*, *188*, p.104457. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457

3- Dibal, J.M., Ramalan, A.A., Mudiare, O.J. and Igbadun, H.E., 2014. Scenario Studies on Effects of Soil Infiltration Rates, Land Slope, and Furrow Irrigation Characteristics on Furrow Irrigation-Induced Erosion. *International Scholarly Research Notices*, *2014*(1), p.942732.doi: 10.1155/2014/942732.

4- Gillies, M.H. and Smith, R.J., 2005. Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science*, *24*(1), pp.25-35.

5- Li, J., Zhu, Y., Jin, H., Zhou, B., Han, L., Wang, H. and Wei, C., 2023. Approximate water vertical infiltration extremum path in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, *625*, p.129989. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129989.

6- Martin, C.J.S.L., 2002. A Physically Based Two-Dimensional Infiltration Model for Furrow Irrigation. In *2002 ASAE Annual Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers. doi: 10.13031/2013.11688.

7- Mazarei, R., Mohammadi, A.S., Ebrahimian, H. and Naseri, A.A., 2021. Temporal variability of infiltration and roughness coefficients and furrow irrigation performance under different inflow rates. *Agricultural Water Management*, *245*, p.106465. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106465

8- Nasseri, A., Neyshabori, M.R., Fard, A.F., Mogaddam, M. and Nazemi, A.H., 2004. Field-measured furrow infiltration functions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *28*(2), pp.93-99.

9- Philip, J.R., 1984. Steady infiltration from circular cylindrical cavities. *Soil Science Society of America Journal*, *48*(2), pp.270-278. https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020008x

10- Wöhling, T., Schmitz, G.H. and Mailhol, J.C., 2004. Modeling two-dimensional infiltration from irrigation furrows. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *130*(4), pp.296-303. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(296).

Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 119-142

Research Paper

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

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of Optimized Hybrid SVR and RF Models for Predicting Actual Evapotranspiration of Sunflower Crop

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

1-M.Sc. Student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
2-Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
3- Correponding Author, Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran (j.behmanesh@urmia.ac.ir).*
4- Ph.D. Graduate, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 1 June 2025
Revised: 23 August 2025
Accepted: 15 September 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Water requirement, Machine learning, Random forest, Support vector regression.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mohammadzadeh, ., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Sharafi, M. 2026. 'Evaluation of Optimized Hybrid SVR and RF Models for Predicting Actual Evapotranspiration of Sunflower Crop', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 119-142. doi: 10.22055/jise.2025.49823.2165.

Abstract

Accurate prediction of actual evapotranspiration in response to water resource management problems and increasing the productivity of agricultural products under dry and semi-arid climatic conditions is considered essential. Sunflower, as an economic crop with relative resistance to water deficiency, is a suitable option for cultivation in areas with water limitations. In this study, Support Vector Regression (SVR) and Random Forest (RF) models optimized with the Genetic Algorithm (GA) were used to predict actual evapotranspiration. For this purpose, data from weighing lysimeters in Bushland, Texas, USA, during the 2011–2012 growing season were extracted. A total of 230 data points were selected as model inputs in the form of eight scenarios with different combinations of climatic parameters. The results of this study showed that, in the SVR-GA model, the best performance was obtained for the combination of inputs including daily soil temperature inside and outside the lysimeter at a depth of 1.6 m, relative water storage at midnight, daily average relative water storage, soil temperature at different depths, air temperature, soil heat flux in the rows and the distance between rows, relative humidity, and wind speed, such that the Root Mean Square Error (RMSE) was 1.017 mm/day, the correlation coefficient (R) was 0.95, and the Nash Sutcliffe Efficiently (NS) was 0.908. Also, in the RF-GA model, the best results were obtained with input variables including all the above-mentioned variables except wind speed, with an RMSE of 1.516 mm/day, an R value of 0.90, and an NS value of 0.796. Comparison of the results showed that the use of the Genetic Algorithm in optimizing the models increased prediction accuracy, such that based on the RMSE criterion, the hybrid SVR-GA and RF-GA models experienced reductions of 59.91% and 35.8%, respectively, compared with their corresponding standalone models. Finally, the hybrid models can be used as efficient tools for estimating actual evapotranspiration under conditions where direct measurement using traditional methods is costly or limited.

Introduction

Evapotranspiration is a fundamental component of the hydrological cycle and plays a vital role in water resource management, irrigation design and assessing plant water requirements (Chiew et al., 1995). Since lysimeters provide relatively accurate measurements of evapotranspiration, their application is often limited due to high costs and the need for specialized expertise, particularly in developing regions (Feng & Tian, 2021). Therefore, developing alternative predictive models has

become essential. This study focuses on employing machine learning models, including random forest and support vector regression, optimized by genetic algorithms to estimate evapotranspiration. Despite prior research on reference evapotranspiration prediction, limited attention has been focused to hybrid models, especially for actual evapotranspiration forecasting due to data limitations. This research introduces a hybrid model aimed at improving prediction accuracy, applied in the Bushland region of Texas, with sunflower as a strategic crop. The model's performance is assessed through various evaluation metrics to demonstrate its efficacy compared to existing single-model approaches.

Methodology

This dataset comprised one year of lysimeter weight measurements for sunflowers collected at the USDA-ARS Conservation and Production Laboratory (CPRL), Soil and Water Management Research Unit (SWMRU) in Bushland, Texas, during the 2011–2012 crop year (Evett et al., 2000). The parameters measured include wind speed, air temperature, relative humidity, soil temperature, soil heat flux, daily evapotranspiration, daily averages and relative water storage at specific lysimeter depths. Sensitivity analysis using Pearson's correlation Figure (1) revealed that daily mean soil temperature at 1.6 m depth showed the strongest correlation (r = 0.70), while wind speed exhibited the weakest (r = −0.32). All variables were measured daily over the full crop year (Evett et al., 2018; 2022). In this study, data from two lysimeters located in the northeast and southeast of agricultural fields in Potter City were used as inputs for SVR, RF, RF-GA, and SVR-GA models to predict actual daily evapotranspiration.

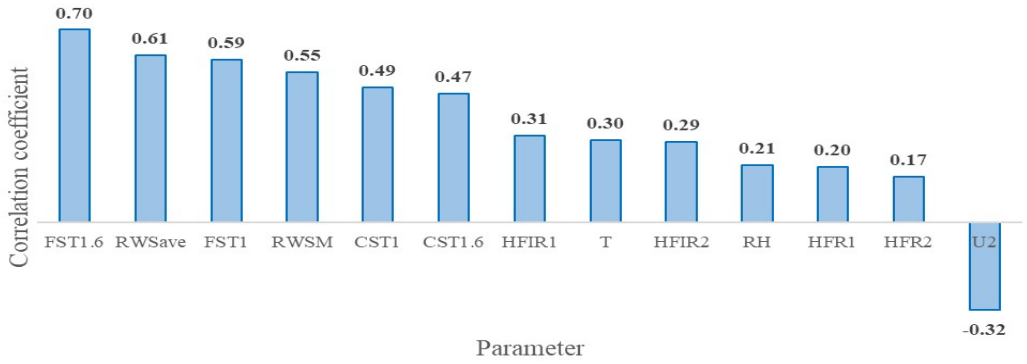


Fig. 1 – Bar chart of correlation coefficient of input parameters

Random Forest (RF)

The Random Forest (RF) model was first introduced by Breiman (2001) as a decision tree-based machine learning method. This algorithm has attracted the attention of researchers in recent years due to its various capabilities, including classification and regression. In Random Forest, a set of decision trees is built based on different parts of the training data.

Support Vector Regression (SVR)

Support Vector Regression is a support vector machine (SVM)-based method used in classification and regression analysis problems. It operates on the basis of binary classification in the desired feature space and is widely used in forecasting problems (Yoon et al. 2011; Jha & Hayashi 2014).

Genetic Algorithm (GA)

The basic concept of a genetic algorithm was first introduced by Holland (1992). This algorithm is an optimization method inspired by the principles of natural selection and genetic theory. In this method, each member of a population, called a chromosome, is considered as a possible answer to the problem.

Results and Discussion

Table (1) presents the evaluation results of the models during the test period based on R, RMSE, NRMSE, NS and WI criteria. Among the SVR scenarios, the seventh scenario showed the best performance with the lowest error and highest correlation, due to the inclusion of HFR_1 and HFR_2 variables. The SVR-GA model further improved accuracy, reducing RMSE by 1.44% compared to the best SVR scenario. These results are consistent with Sharafi et al. (2024), who applied a combined SVR-FOA model for evapotranspiration prediction in Ahvaz with similar improvements. In the RF-GA model, the seventh scenario achieved the highest accuracy, with R = 0.90, RMSE = 1.516 mm/day, NS = 0.796, NRMSE = 0.122, and WI = 0.98. Comparison of RF and RF-GA models indicates that genetic algorithm optimization significantly enhances model performance. This finding aligns with Monavvar Sabegh et al. (2023), who demonstrated improved evapotranspiration estimates at East Azerbaijan stations using a GA-optimized RF model, reporting Wilmot indices of 0.982 and 0.992 in different scenarios for Tabriz station.

Table 1 – Performance of the models during the testing period

Model	R	RMSE (mm/day)	NRMSE	NS	WI
SVR-1	0.69	2.537	0.204	0.43	0.74
SVR-2	0.80	2.044	0.164	0.63	0.89
SVR-3	0.80	2.077	0.167	0.62	0.89
SVR-4	0.84	1.932	0.155	0.67	0.92
SVR-5	0.84	1.837	0.148	0.701	0.93
SVR-6	0.84	1.841	0.148	0.70	0.93
SVR-7	0.86	1.820	0.147	0.706	0.93
SVR-8	0.84	1.835	0.148	0.702	0.93
SVR-GA-1	0.76	2.199	0.176	0.572	0.92
SVR-GA-2	0.87	1.670	0.135	0.753	0.97
SVR-GA-3	0.88	1.610	0.130	0.77	0.98
SVR-GA-4	0.89	1.533	0.124	0.792	0.98
SVR-GA-5	0.92	1.301	0.105	0.85	0.99
SVR-GA-6	0.94	1.151	0.093	0.883	0.99
SVR-GA-7	0.94	1.168	0.094	0.879	0.99
SVR-GA-8	0.95	1.017	0.082	0.908	0.99
RF-1	0.72	2.360	0.190	0.504	0.89
RF-2	0.84	1.810	0.146	0.71	0.96
RF-3	0.84	1.821	0.147	0.706	0.96
RF-4	0.86	1.712	0.138	0.74	0.97
RF-5	0.88	1.602	0.129	0.773	0.98
RF-6	0.88	1.627	0.131	0.765	0.97
RF-7	0.88	1.620	0.130	0.768	0.98
RF-8	0.89	1.618	0.130	0.768	0.98
RF-GA-1	0.76	2.178	0.176	0.580	0.92
RF-GA-2	0.84	1.805	0.146	0.711	0.96
RF-GA-3	0.86	1.755	0.142	0.727	0.96
RF-GA-4	0.87	1.672	0.135	0.752	0.97
RF-GA-5	0.88	1.603	0.129	0.773	0.98
RF-GA-6	0.89	1.551	0.125	0.787	0.98
RF-GA-7	0.90	1.516	0.122	0.796	0.98

Model	R	RMSE (mm/day)	NRMSE	NS	WI
RF-GA-8	0.90	1.539	0.124	0.790	0.98

Conclusion

This study aims to develop an accurate model for predicting actual evapotranspiration. Hybrid models can serve as efficient tools for estimating actual evapotranspiration, especially in situations where direct measurement using traditional methods is costly or limited. In this regard, the SVR, SVR-GA, RF, and RF-GA models were evaluated using available data from two lysimeters in Bushland, Texas, for the years 2011-2012. The results of the evaluations showed that the models optimized with the genetic algorithm had the highest accuracy in predicting actual evapotranspiration and presented the lowest root mean square error (1.516 and 1.017). Also, Future studies should utilize advanced validation methods like cross-validation to ensure robust model evaluation, especially with small datasets such as lysimeter data.

Conflict of Interest

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

Funding

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

Data Availability Statements

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

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Authors' contribution

First Author: Saeideh Mohammadzadeh, Writing the manuscript and literature search.
Second Author: Vahid Rezaverdinejad, Scientific supervision and guidance, reviewing the manuscript content, and revisions.
Third Author: Javad Behmanesh, Scientific supervision and guidance, reviewing the manuscript content, and revisions.
Fourth Author: Milad Sharafi, Reviewing the results and data analysis, reviewing the manuscript content, and scientific and editorial revisions.

Acknowledgement

The authors sincerely thank the USDA-ARS Conservation and Production Research Laboratory, Soil and Water Management Research Unit, Bushland, Texas, for providing the one-year sunflower weighing lysimeter data which used in this study.

References

1- Breiman, L. 2001. *Random forests*. Machine learning. 45: 5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324
2- Chiew, FHS., Kamaladasa, NN., Malano, H.M. and McMahon, T.A. 1995. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agricultural Water Management. 28*:9–21. Doi: 10.1016/0378-3774(95)01172-F

3- Evett, S. R., Copeland, K.S., Ruthardt, B.B., Marek, G.W., Colaizzi, P.D., Brauer, D.K. and Howell, T.A. 2022. The Bushland Maize for Grain Datasets: A Machine-readable Resource. 2022 ASABE Annual International Meeting. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. 1*(1): 28-41. doi.org/10.13031/aim.202201078

4- Evett, S. R., Howell, T. A., Todd, R. W., Schneider, A. D. and Tolk, J. A. 2000. Alfalfa reference ET measurement and prediction. In Proceedings of the 4th Decennial *National Irrigation Symposium. 17(1)*: 14-16.

5- Evett, S.R., Marek, G.W., Copeland, K.S. and Colaizzi, P.D. 2018. Quality management for research weather data: USDA-ARS, Bushland, TX. *Agrosystems, Geosciences & Environment. 1*(1): 1-18. doi: 10.2134/age2018.09.0036

6- Feng, K. and Tian, J. 2021. Forecasting reference evapotranspiration using data mining and limited climatic data. European *Journal of Remote Sensing. 54*(2): 363-371. doi: 10.1080/22797254.2020.1801355

7- Holland, JH. 1992. *Adaptation in natural and artificial systems*: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT Press. doi: 10.7551/mitpress/1090.001.0001

8- Jha, S.K. and Hayashi, K. 2014. A novel odor filtering and sensing system combined with regression analysis for chemical vapor quantification. *Sensors and Actuators B: Chemical. 200*(1): 269-287. doi: 10.1016/j.snb.2014.04.022

9- Monavar Sabegh, S. , Zarehaghi, D. , Samadianfard, S. , Neishabouri, M. R. and Mikaeili, F. 2023. Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using Random Forest Optimized by Genetic Algorithm. *Water and Soil Science*, *33*(4), 33-53 (In Persian). doi: 10.22034/ws.2021.48756.2449. (In Persian). doi**:** 10.22034/ws.2021.48756.2449.

10- Sharafi, M. , Besharat, S. and Zeinalzadeh, K. 2024. A comparative study using a data-driven method versus a hybrid approach to estimate daily reference evapotranspiration in Ahvaz. *Irrigation Sciences and Engineering*, *47*(2), 53-68 (In Persian). doi: 10.22055/jise.2023.43524.2065.

11- Yoon, H., Jun, S.C., Hyun, Y., Bae, G.O. and Lee, K.K. 2011. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. *Journal of hydrology. 396*(1-2): 128-138. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.11.002.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۱۴۲-۱۱۹

ارزیابی مدل‌های بهینه هیبریدی SVR و RF در پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی محصول آفتابگردان

سعیده محمدزاده[۱]، وحید رضاوردی نژاد[۲]، جواد بهمنش [۳*] و میلاد شرفی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳*- نویسنده مسئول، استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (j.behmanesh@urmia.ac.ir)

۴- دانش آموخته دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

پیش‌بینی دقیق تبخیر-تعرق واقعی در پاسخ به مشکلات مدیریت منابع آبی و افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک امری ضروری تلقی می‌شود. محصول آفتابگردان به‌عنوان محصول اقتصادی با دارا بودن مقاومت نسبی به کم‌آبی، گزینه‌ای مناسب برای کشت در مناطق با محدودیت آبی است. در این پژوهش، از مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و جنگل تصادفی (RF) بهینه شده با الگوریتم ژنتیک (GA) برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی استفاده شده است. برای این منظور داده‌های لایسیمترهای وزنی در منطقه بوشلند، تگزاس، ایالات متحده طی سال زراعی ۲۰۱۲-۲۰۱۱ استخراج شد. تعداد ۲۳۰ داده در قالب هشت سناریو با ترکیب‌هایی از پارامترهای اقلیمی مختلف، به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند. نتایج این تحقیق نشان داد در مدلSVR-GA، بهترین عملکرد مربوط به ترکیب ورودی‌هایی بود که شامل دمای روزانه خاک داخل و خارج لایسیمتر در عمق ۱/٦ متری، ذخیره نسبی آب در نیمه‌شب، میانگین روزانه ذخیره نسبی، دمای خاک در عمق‌های مختلف، دمای هوا، شار حرارتی خاک در ردیف‌ها و فاصله بین‌ردیف‌ها، رطوبت نسبی و سرعت باد بودند، به‌طوری‌که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)برابر با ۱/۰۱۷ میلی‌متر بر روز، ضریب همبستگی (R) معادل ۰/۹۵ و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برابر با ۰/۹۰۸ حاصل شد. همچنین در مدلRF-GA ، بهترین نتایج با متغیرهای ورودی شامل همه موارد فوق به‌جز سرعت باد به‌دست آمد و RMSE برابر با ۱/۵۱٦ میلی‌متر در روز، R معادل ۰/۹۰ و NS برابر با ۰/۷۹٦ بود. مقایسه نتایج نشان داد که استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی مدل‌ها باعث افزایش دقت پیش‌بینی شده است، به‌طوری‌که بر اساس معیار RMSE، مدل‌های هیبریدی SVR-GA و RF-GA نسبت به مدل‌های مستقل خود به‌ترتیب کاهش ۵۹/۹۱ و ۳۵/۸ درصدی را تجربه کردند. در نهایت، مدل‌های هیبریدی می‌توانند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی در شرایطی که اندازه‌گیری مستقیم با روش‌های سنتی پرهزینه یا محدود است، مورد استفاده قرار گیرند.

کلید واژه‌ها: نیاز آبی، یادگیری ماشین، جنگل تصادفی، رگرسیون بردار پشتیبان.

مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از فرآیندهای اساسی چرخه هیدرولوژیکی به‌شمار می‌آید و برآورد دقیق این پارامتر، برای ارزیابی بیلان هیدرولوژیکی، طراحی سیستم‌های آبیاری، تعیین نیاز آبی گیاهان و مدیریت منابع آب، اهمیت ویژه‌ای دارد (Chiew et al., 1995). گیاه آفتابگردان به‌دلیل ویژگی‌های کلیدی نظیر دوره رشد کوتاه، نیاز آبی نسبتاً پایین، توانایی سازگاری در مقابل خشکسالی و تحمل تنش‌های آبی کوتاه‌مدت، به‌عنوان یکی از محصولات زراعی استراتژیک برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک شناخته می‌شود (Lamm et al., 2011; Tolk and Howell, 2012). روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق وجود دارد که از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از لایسیمترها Dong و Hansen (2023) روش نسبت بوون مبتنی‌بر تعادل انرژی و جرم بخار Xiong et al (2022) و همچنین تشتک‌های تبخیر Choudhury (1999) اشاره کرد. لایسیمترها ابزار مؤثری برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق هستند که می‌توانند به‌طور نسبی داده‌های دقیقی از این فرآیند ارائه دهند. نتایج حاصل از لایسیمترها در بهبود و ارزیابی سایر روش‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، استفاده از لایسیمتر به‌دلیل نیاز به نیروی متخصص و محدودیت دسترسی به این ابزار در برخی کشورهای در حال توسعه، عمدتاً به امور تحقیقاتی محدود می‌شود (Feng & Tian, 2021). در چنین شرایطی، توسعه مدل‌های ریاضی که قادر به پیش‌بینی دقیق روابط پیچیده میان پارامترهای ورودی و خروجی هستند، اهمیت زیادی پیدا می‌کند. این مدل‌ها می‌توانند جایگزینی مؤثر برای روش‌های پرهزینه و زمان‌بر قدیمی باشند و در مطالعه‌های مربوط به تبخیر-تعرق کاربرد گسترده‌ای پیدا

کرده‌اند (Wu et al., 2019). روش‌های مبتنی‌بر هوش مصنوعی (Artificial Intelligence) با داشتن قابلیت‌هایی مانند استفاده از تعداد زیادی متغیر در مدل و توانایی شناسایی پارامترها حتی در شرایط وجود داده‌های ناقص، در مقایسه با روش‌های سنتی برتری قابل‌توجهی دارند (Hashemian et al., 2019). این روش‌ها با داشتن دقت و سرعت بالاتر در پیش‌بینی تبخیر-تعرق از اهمیت ویژه برخوردار می‌باشند (Bayat et al., 2009). جنگل تصادفی (Random forest) یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که به‌دلیل عملکرد قوی در طیف گسترده‌ای از مجموعه داده‌ها، در تحقیقات زیادی مورد استفاده قرار گرفته است (Jing et al., 2015 and Da Silva Junior et al., 2019).

در مطالعه‌ای Wang et al (2019) به پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و مقایسه آن با روش برنامه‌ریزی ژن (gene-expression programming) در جنوب غربی چین پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مدل جنگل تصادفی با داشتن ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (Nash Sutcliffe coefficient of efficiency) بین ۰/۹۸۶ - ۰/۶۲۶، ریشه میانگین مربع خطا (Root mean square error) بین ۰/۵۶۳- ۰/۱۰۷ میلی‌متر درصد عملکرد خوبی با ترکیب ورودی‌های مختلف در مقایسه با مدل برنامه‌ریزی ژن داشته‌است. Feng et al. (2017) در تحقیقی عملکرد دو مدل یادگیری ماشین از جمله جنگل‌تصادفی و رگرسیون شبکه‌های عصبی (Generalized regression neural networks) در تخمین تبخیر-تعرق مرجع روزانه را در جنوب غربی چین ارزیابی کردند نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد هر دو مدل برای تخمین تبخیر-تعرق روزانه مناسب بوده، اما عملکرد مدل جنگل تصادفی به‌علت داشتن RMSE پایین‌تر (۰/۰۷۵-۰/۰۶۱) بهتر از روش رگرسیون شبکه‌های عصبی بوده است. در پژوهشی Shiri et al (2021) به ارزیابی دقت تخمین تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده‌های اقلیمی در سه ایستگاه مرطوب کشور با استفاده از مدل جنگل تصادفی و سایر مدل‌های تجربی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل جنگل تصادفی نسبت به مدل‌های تجربی واسنجی‌شده و واسنجی‌نشده که دارای متغیرهایی مانند دمای هوا و تابش خورشیدی می‌باشد با داشتن میانگین قدر مطلق خطا برابر ۰/۴ میلی‌متر بر روز و داشتن شاخص پراکندگی ۰/۰۰۸ دقت بیش‌تری را در تخمین ارائه داده است. رگرسیون بردار پشتیبان (Support vector regression) در سال‌های اخیر به‌عنوان یک رویکرد قوی و دقیق در پیش‌بینی تبخیر-تعرق شناخته شده است. Mokari et al. (2022) در تحقیقی به ارزیابی قدرت چند مدل از جمله یادگیری ماشین افراطی (Extreme learning machine)، برنامه‌ریزی ژنتیک (Genetic programming) و (SVR) برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق پرداختند. برای انجام این تحقیق از داده‌های هواشناسی بازه ده ساله (۱۳۹۷-۱۳۸۷) در منطقه نیومکزیکو استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل رگرسیون بردار پشتیبان با داشتن بالاترین پایداری در مرحله آزمون که در آن کاهشی به‌میزان کمتر از ۱۰درصد داشت عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان داد. Zouzou و Citakoglu (2023) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی تبخیر-تعرق با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین ازجمله رگرسیون بردار پشتیبان، جنگل‌تصادفی و رگرسیون فرایند گاوسی (Gaussian process regression) در ترکیه پرداختند نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که مدل SVR موجب کاهش ریشه میانگین مربعات خطا نسبت به سایر مدل‌های یادگیری ماشین گردید. Kumar و Singh (2022) در پژوهشی روش‌های داده‌محور در مدل‌سازی سری زمانی فرآیندهای هیدرولوژیکی را در منطقه Ranichauri هند مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل SVR با داشتن RMSE بین مقادیر ۰/۶۸۹-۰/۵۴۲ و ضریب NSE بین مقادیر ۰/۹۷۴-۰/۹۵۳، دقت قابل قبولی نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. استفاده از مدل‌های هیبریدی موجب افزایش دقت و سرعت در مدل‌های ریاضی در مقایسه با مدل‌های منفرد شده است و مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است (Talukdar et al., 2022; Saravi et al., 2022). در تحقیقی Khosravi et al. (2019) به پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع در موصل عراق با استفاده از مدل‌های (Adaptive neuro-fuzzy inference system) و مدل هیبریدی ANFIS-GA پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل هیبریدی ANFIS-GA با داشتن مقادیر (R^2=۰/۹۷ و RMSE= ۳۲/۸۱ mm) بهترین عملکرد را در ایستگاه بغداد در پیش‌بینی تبخیر-تعرق نسبت به سایر مدل‌ها داشته است. در تحقیقی Sharafi و Samadianfard (2024) به پیش‌بینی تبخیر-تعرق روزانه در چهار ایستگاه ساحلی با استفاده از مدل‌های هیبریدی (SVR-FFA) و مدل یادگیری SVR پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل هیبریدی SVR-FFA با داشتن خطای ۱/۱۳ میلی‌متر بر روز در مقایسه با مدل SVR با خطای ۱/۲۵ میلی‌متر بر روز، از عملکرد و دقت بالایی برخوردار بوده است. در تحقیقی Monavar Sabegh et al. (2023) به ارزیابی عملکرد مدل جنگل تصادفی و مدل بهینه شده جنگل تصادفی با الگوریتم ژنتیک (Genetic algorithm) درکنار معادله‌های تجربی برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق در استان آذربایجان شرقی طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۰ با استفاده از پارامترهای حداقل و حداکثر دما، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که الگوریتم ژنتیک بهینه شده با کاهش شاخص پراکندگی عملکرد مناسبی داشت.

این تحقیق با ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین رگرسیون بردار پشتیبان SVR و جنگل تصادفی RF بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک (GA) به پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی آفتابگردان با استفاده از اطلاعات لایسیمتری در بوشلند تگزاس می‌پردازد. بهینه‌سازی این مدل‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک

DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

انجام می‌شود تا دقت پیش‌بینی افزایش یافته و حداکثر خطاهای محاسباتی به حداقل برسد. هدف از این پژوهش ارائه مدلی است که از نظر قابلیت اطمینان و کارایی در پیش‌بینی تبخیر–تعرق واقعی عملکرد قابل توجهی داشته باشد. این مدل با بهره‌گیری از یک روش هیبریدی تلاش می‌کند تا دقت پیش‌بینی را نسبت به مدل‌های منفرد افزایش دهد و تخمین‌های دقیق و قابل اعتمادی را از تبخیر–تعرق واقعی ارائه دهد. بررسی جامع مطالعه‌های پیشین نشان می‌دهد که تحقیق‌های محدودی در زمینه مدل‌های هیبریدی برای پیش‌بینی تبخیر–تعرق مرجع انجام شده است. بااین‌حال، اغلب تحقیقات پیشین بر پیش‌بینی تبخیر–تعرق مرجع متمرکز بوده‌اند و تبخیر–تعرق واقعی (ET_a) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، به‌دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های دقیق لایسیمتری، استفاده از این داده‌ها در مدل‌سازی Et_a تاکنون محدود بوده است. تحقیق حاضر با ارائه یک مدل هیبریدی، دقت و عملکرد پیش‌بینی را نسبت به سایر مدل‌های منفرد بهبود می‌بخشد. منطقه بوشلند، تگزاس، ایالات متحده با اقلیم خشک و دسترسی به داده‌های دقیق لایسیمتری، با هدف ارتقای دقت مدل‌سازی و کاهش عدم قطعیت‌ها به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. آفتابگردان به‌عنوان یک محصول با مقاومت نسبی به کم‌آبی، نقش قابل توجهی را در کشاورزی مناطق خشک ایفا می‌کند و پیش‌بینی دقیق تبخیر–تعرق واقعی در این گیاه به مدیریت بهینه آبیاری و افزایش بهره‌وری کمک می‌کند. همچنین، داده‌های لایسیمتری به‌دلیل دقت بالا در اندازه‌گیری تبخیر–تعرق، مبنای معتبری برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی هستند. از سوی دیگر، مدل‌های SVR و RF به‌واسطه توانایی در شناسایی روابط غیرخطی، عملکرد مؤثر در تحلیل داده‌های پیچیده و قابلیت تلفیق با الگوریتم ژنتیک، برای این پژوهش انتخاب شدند. نتایج این تحقیق علاوه‌بر بهبود عملکرد و دقت در پیش‌بینی تبخیر–تعرق واقعی موجب کمک به صرفه‌جویی در مصرف آب و توسعه پایدار کشاورزی، کاهش فشار بر منابع آبی و افزایش بهره‌وری این محصول در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

داده‌های این مجموعه شامل اطلاعات یک‌ساله لایسیمتر وزنی برای گیاه آفتابگردان در آزمایشگاه حفاظت و تولید USDA-ARS (Conservation and Production Laboratory)، واحد تحقیقات مدیریت آب و خاک (Soil and Water Management Research Unit) در بوشلند، تگزاس (عرض جغرافیایی ۳۵/۱۸۶، طول جغرافیایی ۱۰۲/۰۹۴–، ارتفاع ۱۱۷۰ متر بالاتر از میانگین سطح دریا) در سال زراعی ۲۰۱۲–۲۰۱۱ می‌باشد (Evett et al., 2000). موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. گیاه آفتابگردان بر روی دو لایسیمتر بزرگ و با دقت توزین زیاد، هریک در اطراف یک زمین مربعی‌شکل به مساحت ۴/۴۴ هکتار کشت شده است. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل سرعت باد در ارتفاع دو متری (U_2)، میانگین روزانه دمای هوا در همان ارتفاع (T)، رطوبت نسبی (RH)، میانگین دمای روزانه خاک در عمق ۱/۶ متری داخل لایسیمتر ($CST_{1.6}$)، میانگین دمای روزانه خاک در عمق ۱/۶ متری خارج از لایسیمتر ($FST_{1.6}$)، میانگین دمای روزانه خاک در عمق یک متری داخل لایسیمتر (CST_1)، میانگین دمای روزانه خاک در عمق یک متری خارج از لایسیمتر (FST_1)، مجموع شار حرارتی خاک در اولین فاصله بین ردیف‌ها ($HFIR_1$)، مجموع شار حرارتی خاک در دومین فاصله بین ردیف‌ها ($HFIR_2$)، مجموع شار حرارتی خاک در اولین ردیف از لبه جنوبی لایسیمتر (HFR_1)، شار حرارتی خاک در ردیف دوم از لبه جنوبی لایسیمتر (HFR_2)، تبخیر–تعرق واقعی روزانه (ET_a)، میانگین روزانه ذخیره نسبی آب در لایسیمتر (RWS_{ave}) و ذخیره نسبی آب در لایسیمتر برحسب میلی‌متر در نیمه‌شب (RWS_M) است. مشخصات کامل این پارامترها در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین شکل (۲) آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی بر پارامتر هدف را با استفاده ضریب همبستگی پیرسون نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که میانگین دمای روزانه خاک در عمق ۱/۶ متری با داشتن ضریب همبستگی ۰/۷ بیش‌ترین تأثیر و پارامتر سرعت باد با مقدار ۰/۳۲– کم‌ترین تأثیر را بر روی پارامتر هدف داشته‌اند.

تمامی پارامترها در مقیاس روزانه در طول یک سال زراعی اندازه‌گیری شدند (Evett et al., and Evett et al., 2022 2018). همچنین، روش‌های پردازش، نظیر حذف داده‌های پرت و ناقص، پس از جمع‌آوری داده‌ها برای کاهش خطاهای محاسباتی مرتبط با تبخیر–تعرق لایسیمتر به‌کار گرفته شد (Marek et al 2014). در این تحقیق، پارامترهای به‌دست‌آمده از دو لایسیمتر واقع در شمال شرق (Northeast) و جنوب شرق (Southeast) در اراضی کشاورزی شهر پاتر (Potter County) به‌عنوان ورودی مدل‌های SVR، RF، RF-GA و SVR-GA مورد استفاده قرار گرفتند تا مقادیر تبخیر–تعرق واقعی روزانه پیش‌بینی شود.

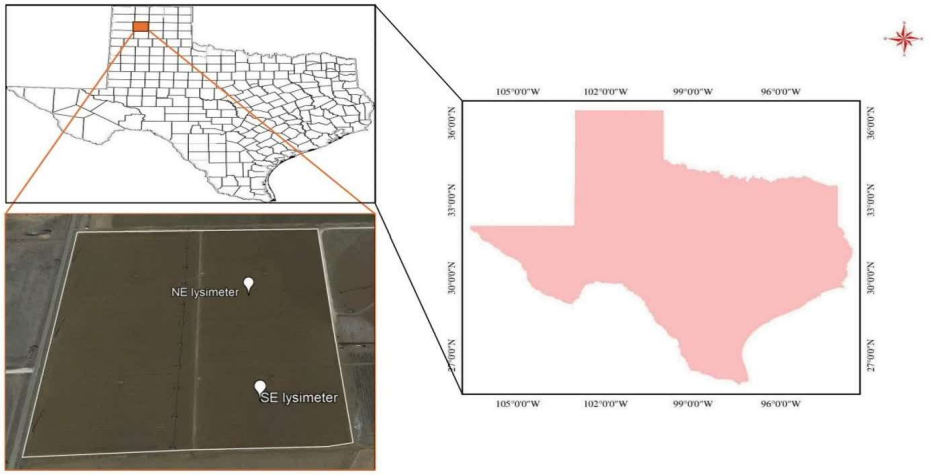


Fig. 1 – Location of the Study Area in Bushland, Texas
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در بوشلند، تگزاس

جدول ۱- مشخصات پارامترهای مورد استفاده
Table 1 - Specifications of Parameters Used

Parameter Name	Description
$CST_{1.6}$	Daily average soil temperature at 1.6 m depth inside the lysimeter, measured about 1 meter from the lysimeter wall using a thermocouple.
$FST_{1.6}$	Daily average soil temperature at 1.6 m depth outside the lysimeter, measured about 1 meter from the lysimeter chamber wall using a thermocouple.
CST_1	Daily average soil temperature at 1 m depth inside the lysimeter, measured about 1 meter from the lysimeter wall using a thermocouple.
FST_1	Daily average soil temperature at 1 m depth outside the lysimeter, measured about 1 meter from the lysimeter chamber wall using a thermocouple.
T	Daily average air temperature measured at 2 meters above the soil surface.
ET_a	Daily actual evapotranspiration calculated based on lysimeter mass change, precipitation, irrigation, and other factors.
RH	Daily average relative humidity (%) measured by a Vaisala sensor at 2 meters above the soil surface inside the lysimeter.
$HFIR_2$	Daily total soil heat flux (MJ/m²) measured at 50 mm depth in the second inter-row spacing inside the lysimeter using a heat flux plate, corrected thermometrically to the surface.
HFR_1	Daily total soil heat flux (MJ/m²) measured at 50 mm depth in the first row from the southern edge of the lysimeter using a heat flux plate, corrected thermometrically to the surface.
HFR_2	Daily total soil heat flux (MJ/m²) measured at 50 mm depth in the second row from the southern edge of the lysimeter using a heat flux plate, corrected thermometrically to the surface.
$HFIR_1$	Daily total soil heat flux (MJ/m²) measured at 50 mm depth in the first inter-row spacing inside the lysimeter using a heat flux plate, corrected thermometrically to the surface.
RWS_{ave}	Daily average relative water storage (mm) in the lysimeter based on calibration of lysimeter scale at water depth, related to an initial arbitrary storage value at water depth.
RWS_M	Relative water storage (mm) in the lysimeter at midnight based on calibration of lysimeter scale at water depth, related to an initial arbitrary storage value at water depth.
U_2	Daily average wind speed measured by an anemometer at 2 meters above the soil surface inside the lysimeter.

 DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

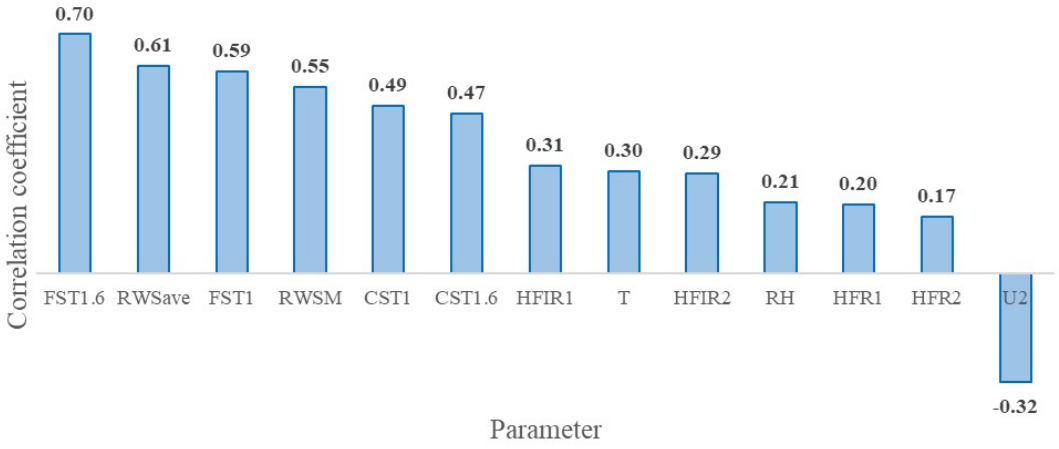


Fig. 2 – Bar chart of correlation coefficient of input parameters
شکل ۲- نمودار میله‌ای ضریب همبستگی پارامترهای ورودی

مدل جنگل تصادفی (RF)

مدل جنگل تصادفی (RF) نخستین بار توسط Breiman (2001) به‌عنوان یک روش یادگیری ماشین مبتنی‌بر درخت تصمیم شناخته شد. این الگوریتم با داشتن قابلیت‌های مختلف از جمله طبقه‌بندی و رگرسیون، در سال‌های اخیر مورد توجه محققان واقع شده است. در این مدل ابتدا ویژگی‌های ورودی منتخب استخراج و پارامترهای مدل تنظیم می‌شوند، سپس داده‌ها به مجموعه‌های آموزش و آزمون تقسیم شده و توسط مدل جنگل تصادفی آموزش داده می‌شود. درآخر خروجی مدل با داده‌های واقعی مقایسه شده و با استفاده از شاخص‌های عملکرد ارزیابی می‌گردد (شکل ۳). در جنگل تصادفی، مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم بر اساس بخش‌های مختلف داده‌های آموزشی ساخته می‌شوند. یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد این الگوریتم، توانایی آن در ارزیابی اهمیت پیش‌بینی هر یک از متغیرهای ورودی است. همچنین در این مدل از مجموعه متغیرهایی استفاده می‌شود که می‌توانند به بهبود دقت پیش‌بینی‌کمک کنند (Tyralis et al., 2019). در این روش، هر درخت به‌طور مستقل بر اساس زیرمجموعه‌ای از داده‌ها، آموزش می‌بیند و بدین‌ترتیب مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی ایجاد می‌شود. تنوع درخت‌ها از طریق تولید زیرمجموعه‌های مختلف از داده‌های آموزشی کاهش می‌یابد که این فرایند تحت عنوان طبقه‌بندی شناخته می‌شود. این روش به کاهش پراکندگی مدل و افزایش دقت مدل کمک می‌کند. به‌علاوه، در این فرایند ممکن است برخی از داده‌ها بیش از یک‌بار در مدل‌ها به‌کار گرفته شوند که در نهایت موجب افزایش پایداری مدل می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که مدل در برابر تغییرات کوچک در داده‌ها مقاوم‌تر باشد و دقت پیش‌بینی به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. در نهایت، این الگوریتم با استفاده از یک روش تصمیم‌گیری مبتنی‌بر رأی‌گیری، پیش‌بینی نهایی را از طریق انتخاب کلاسه‌ای که بیش‌ترین تعداد رأی را کسب کرده است، انجام می‌دهد.

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

رگرسیون بردار پشتیبان یک روش مبتنی‌بر ماشین بردار پشتیبان (Support vector machine) است که در دسته‌بندی و تحلیل مسائل رگرسیونی کاربرد دارد. این روش براساس طبقه‌بندی دوگانه در فضای ویژگی‌های مطلوب عمل کرده و به‌طور گسترده در مسائل پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Yoon et al. 2011; Jha & Hayashi 2014). SVR از یک تابع تلفات (insensitive loss function) برای تحمل خطا در داده‌های آموزشی استفاده می‌کند. این تابع به SVR اجازه می‌دهد تا خطاها را در یک محدوده مشخص نادیده بگیرد، و خطاهایی که از این محدوده فراتر می‌روند، در فرآیند یادگیری در نظر گرفته می‌شوند. معادله (۱) تابع SVR را به‌صورت زیر نشان می‌دهد.

$$F(x) = \mathrm{W}^T X + b \qquad (۱)$$

که، W بردار وزن عمود بر ابرصفحه، T ترانهاده، b مقدار بایاس، X بردار ورودی و $F(x)$ بردار خروجی است.

$C > 0$ یک هایپرپارامتر تنظیم است که باید به‌صورت دقیق انتخاب شود، به‌علاوه این پارامتر به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی خطای آزمون درنظر گرفته می‌شود. C فاصله میان مقادیر واقعی و مقادیر متناظر در محدوده $\varepsilon - Tube$ را تعریف می‌کند که با ξ_j و ξ_i^* مشخص می‌شود. برای حل مسائل بهینه‌سازی در SVR از متغیرهای لاگرانژی استفاده می‌شود که امکان انعطاف‌پذیری مرزها را در حین حل مسئله بهینه‌سازی فراهم می‌کند. در معادله

(۲) قیود این تابع تعریف شده است که در آن x_i بردار ورودی و y_i بردار خروجی را نشان می‌دهد.

$$\begin{cases} F(x) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \mathrm{y_i} - \mathrm{F(x)} \leq \varepsilon + \xi_\mathrm{i} \\ \mathrm{i} = 1, 2, 3, \ldots, \mathrm{N} \\ \xi_\mathrm{i}^*, \xi_j \geq 0 \end{cases} \quad (۳)$$

برای کمینه‌سازی معادله (۱) تحت قیود معادله (۲) تابع زیر بر اساس مطالعه‌های Gun (1998) و Cimen (2008) استخراج شده است.

$$F(x) = \sum_{i=1}^{N}(a_i^* - a_i)K(x, x_i) + b \quad (۳)$$

در معادله (۳)، $K(x, x_i)$ به‌عنوان تابع کرنل تعریف شده است، $a_i, a_i^* \geq 0$ ضرایب لاگرانژی را نشان می‌دهند و b بیانگر جمله بایاس است. به‌طور کلی تابع کرنل در SVR برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Smola and Schölkopf, 2004).

$$K(x, x_i) = exp(\gamma \|x - x_i\|^2) \quad (۴)$$

γ در این معادله به‌معنای عرض تابع کرنل است که نقش کلیدی در تنظیم رفتار تابع کرنل دارد. شکل (۴) فلوچارت مدل رگرسیون بردار پشتیبان را ارائه می‌دهد. در این فرآیند اجرای مدل با پیش‌پردازش داده‌ها آغاز می‌شود تا ویژگی‌ها به‌شکل مناسبی برای تحلیل آماده شوند. سپس، تابع کرنل متناسب با ویژگی‌های داده انتخاب می‌شود تا فضا ویژگی‌ها بهینه شود. پس از آن، مدل با استفاده از داده‌های آموزشی اعتبارسنجی شده و عملکرد آن ارزیابی می‌گردد. در نهایت، هایپرپارامترها با هدف بهینه‌سازی دقت مدل تنظیم شده و فرایند آموزش تکمیل می‌شود.

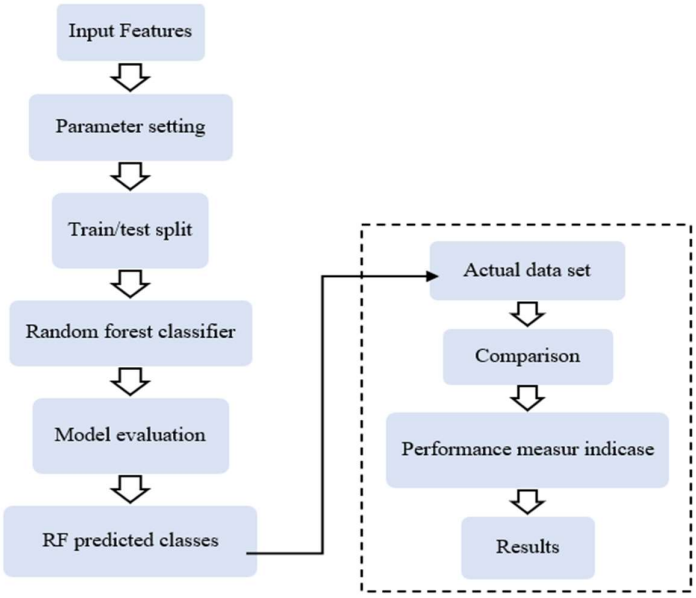


Fig. 3 – Flowchart of the Random Forest (Achite, et al., 2023)
شکل ۳- فلوچارت جنگل تصادفی(Achite, et al., 2023)

DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

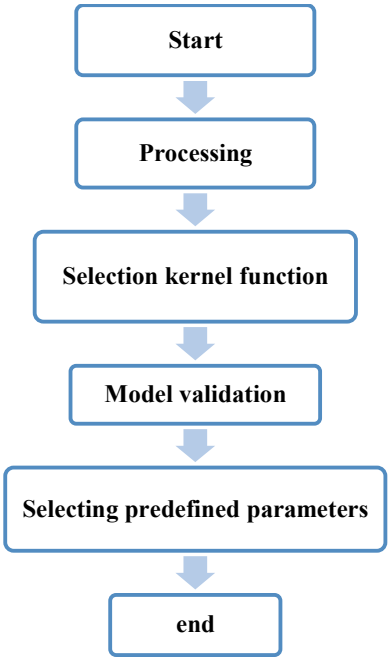


Fig. 4 – Flowchart of Support Vector Regression (Achite, et al., 2024)
شکل ٤- فلوچارت رگرسیون بردار پشتیبان (Achite, et al., 2024)

الگوریتم ژنتیک (GA)

مفهوم اولیه الگوریتم ژنتیک برای نخستین بار توسط Holland (1992) معرفی شد. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی است که از اصول انتخاب طبیعی و نظریه ژنتیک الهام گرفته است. در این روش، هر عضو یک جمعیت به‌نام کروموزوم، به‌عنوان یک پاسخ احتمالی به مسئله در نظر گرفته می شود. جستجو در این الگوریتم با تولید تصادفی جمعیت اولیه شروع می‌شود و نسل‌های بعدی این جمعیت توسط عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش گسترش می‌یابند. در ادامه، به تشریح مراحل اصلی الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

۱- تولید جمعیت اولیه: الگوریتم با تولید تصادفی یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها شروع می‌شود. هر کروموزوم یک راه‌حل بالقوه برای مسئله بهینه‌سازی است.

۲- انتخاب (Selection): براساس اصل بقا، کروموزوم‌هایی که دارای شایستگی بیش‌تری هستند (راه حل‌های بهینه‌ای برای مسئله ارائه می دهند) برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند.

۳- تقاطع (Crossover): در این مرحله، کروموزوم‌های انتخاب شده باهم ترکیب می‌شوند تا کروموزوم‌های جدیدی ایجاد شوند.

۴- جهش (Mutation): در این مرحله، برخی‌از ژن‌های کروموزوم‌ها به‌طور تصادفی تغییر می‌کنند، این عمل باعث می‌شود که الگوریتم از گیر افتادن در بهینه‌های محلی جلوگیری کند و به‌دنبال راه‌حل‌های جدیدی باشد.

۵- ارزیابی: نسل جدید جمعیت، دوباره ارزیابی می شود تا مشخص شود که کدام کروموزوم‌ها برازش بهتری دارند. این روند تا زمانی‌که یک راه حل بهینه و معیار همگرا برای مسئله پیدا شود، تکرار می‌شود.

بر اساس توضیحاتی که پیش‌تر ارائه شد، شکل (۵)، فلوچارت الگوریتم ژنتیک را نمایش می‌دهد. در این فلوچارت، فرآیند الگوریتم ژنتیک با ایجاد جمعیت اولیه آغاز شده و سپس، هر عضو جمعیت بر اساس معیارهای مسئله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا کارایی آن مشخص شود. در مرحله بعد، فرآیند انتخاب (Selection) انجام می‌شود تا بهترین اعضا برای تولید نسل بعدی برگزیده شوند. پس از آن، عملیات تقاطع(Crossover) به‌منظور ترکیب ویژگی‌های افراد منتخب و تولید فرزندان جدید اجرا می‌گردد. در ادامه، عمل جهش (Mutation) برای افزایش تنوع ژنتیکی و جلوگیری از همگرایی زودهنگام اعمال می‌شود. این چرخه تکرار می‌شود تا نسل نهایی تشکیل شده و الگوریتم به مرحله خاتمه برسد.

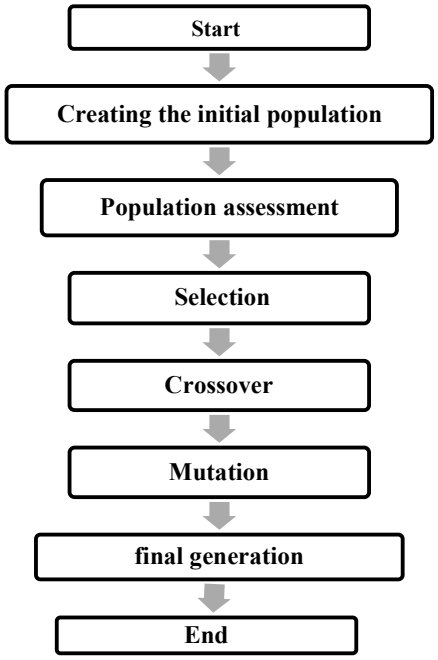


Fig. 5 – Flowchart of the Genetic Algorithm (Achite, et al., 2023)
شکل۵- فلوچارت الگوریتم ژنتیک (Achite, et al., 2023)

توسعه مدل‌ها

در این پژوهش، از دو مدل یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی و رگرسیون بردار پشتیبان برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی استفاده شده است. به منظور دستیابی به بالاترین دقت ممکن، هر دو مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده‌اند. الگوریتم ژنتیک با ایجاد یک جمعیت اولیه از ترکیب‌های مختلف هایپرپارامترها آغاز می‌شود و سپس با اعمال عملگرهای انتخاب، تقاطع و جهش، به تدریج ترکیب‌های بهینه را شناسایی می‌کند. در مورد مدل جنگل تصادفی، هایپرپارامترهای مهمی مانند تعداد درختان، حداکثر عمق درختان و حداقل نمونه‌های مورد نیاز برای تقسیم گره‌ها مورد بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند. برای مدل SVR نیز پارامترهای کلیدی شامل ضریب تنظیم، نوع تابع هسته و پارامترهای مربوط به آن با دقت تنظیم شده‌اند. فرآیند بهینه‌سازی به گونه‌ای طراحی شده است که همزمان با جلوگیری از بیش‌برازش، بالاترین دقت پیش‌بینی را تضمین کند. الگوریتم ژنتیک در این پژوهش با جمعیت اولیه ۵۰ کروموزوم و طی ۱۰۰ نسل اجرا شده است. معیار ارزیابی هر کروموزوم، خطای مربعات میانگین روی داده‌های اعتبارسنجی متقابل بوده است. عملگر تقاطع با احتمال ۰/۸ و عملگر جهش با احتمال ۰/۱ اعمال شده‌اند تا تنوع لازم در جمعیت حفظ شود. پس از تکمیل فرآیند بهینه‌سازی، بهترین ترکیب‌های هایپرپارامتر برای هر مدل انتخاب شده‌اند. در این تحقیق، هایپرپارامترهای مدل‌ها با دقت انتخاب و تنظیم شدند. برای مدل جنگل تصادفی، تعداد درختان (n_estimators) به‌منظور تعادل بین دقت و پیچیدگی محاسباتی، حداکثر عمق درخت(max_depth) برای جلوگیری از بیش‌برازش، حداقل نمونه‌های مورد نیاز برای تقسیم گره(min_samples_split) به‌منظور کنترل رشد درخت‌ها، و تعداد ویژگی‌های در نظر گرفته شده در هر تقسیم (max_features) برای ایجاد تنوع در بین درخت‌ها تنظیم گردیدند. در مدل ماشین بردار پشتیبان، پارامتر تنظیم (C) برای ایجاد تعادل بین دقت مدل و سادگی آن، نوع تابع هسته (kernel) برای مدل‌سازی روابط غیرخطی، ضریب هسته (gamma) برای تعیین میزان تأثیر هر نمونه آموزشی، و مقدار اپسیلون (epsilon) برای تعیین حد تحمل خطا در پیش‌بینی‌ها بهینه‌سازی شدند. در الگوریتم ژنتیک نیز اندازه جمعیت اولیه (population_size)، تعداد نسل‌ها (generations)، احتمال وقوع عملگر تقاطع (crossover_probability) و احتمال وقوع جهش(mutation_probability) به‌ترتیب برای ایجاد تنوع در جواب‌ها، تعیین مدت زمان اجرای الگوریتم، ترکیب مناسب جواب‌ها و جلوگیری از همگرایی زودرس تنظیم گردیدند. مقادیر نهایی این پارامترها بر اساس آزمایش‌های متعدد و روش‌های بهینه‌سازی استاندارد تعیین شدند تا بهترین عملکرد ممکن حاصل شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش هیبریدی منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد مدل‌ها شده است، به‌طوری‌که مدل‌های بهینه‌شده توانسته‌اند با دقت بالاتری تبخیر-تعرق واقعی را پیش‌بینی کنند. این بهبود عملکرد نه تنها در معیارهای ارزیابی عددی، بلکه در توانایی مدل برای تعمیم به داده‌های جدید نیز مشهود بوده است. مقادیر نهایی انتخاب‌شده برای هر یک از پارامترهای GA و SVR در جدول (۲) ارائه شده است.

DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

در این تحقیق، برای برآورد تبخیر–تعرق واقعی، سیزده پارامتر مختلف که شامل FST_1، $FST_{1.6}$، RWS_M، RWS_{ave}، CST_1، $CST_{1.6}$، T، $HFIR_2$، $HFIR_1$، RH، HFR_1، HFR_2، U_2 در قالب هشت سناریو، به‌عنوان ورودی مدل درنظر گرفته شد (جدول ۳). ترتیب سناریوها براساس ضریب همبستگی پیرسون تنظیم شده است، به‌طوری‌که سناریوی اول بیش‌ترین همبستگی و سناریوی آخر کم‌ترین همبستگی را با پارامتر هدف (تبخیر–تعرق واقعی) دارد.

عملکرد الگوریتم‌های SVR، RF، RF-GA و SVR-GA برروی این سناریوها ارزیابی شد. با نرم‌افزار Rapid Miner Studio، ۶۷ درصد داده‌های آماری برای مرحله آموزش و ۳۳ درصد برای مرحله آزمون مدل‌ها درنظر گرفته شد. دقت مدل‌های مورد استفاده در این دو مرحله، براساس شاخص‌های آماری که شامل ضریب همبستگی(R)، که میزان همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد، مقدار R در بازه‌ای بین ۱– تا ۱ تغییر می‌کند، به‌طوری‌که مقدار نزدیک به یک نشان‌دهنده همبستگی خطی قوی، مقدار نزدیک به ۱– نشان‌دهنده رابطه معکوس و مقدار صفر نشان‌دهنده نبود رابطه خطی میان داده‌هاست. استفاده از این شاخص برای سنجش توانایی مدل در پیروی از روند کلی داده‌های مشاهداتی (واقعی) ضروری است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) که بیانگر میزان خطای مدل در پیش‌بینی است، یکی از شاخص‌های متداول برای اندازه‌گیری میزان اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی است. این شاخص به خطاهای بزرگ حساس بوده و مقدار کمتر آن نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است. RMSE در واحد متغیر مورد نظر در اینجا که همان تبخیر–تعرق واقعی است، برحسب میلی‌متر بر روز بیان می‌شود. ضریب نش–ساتکلیف (NS) توانایی مدل در شبیه‌سازی تغییرات مقادیر مشاهده‌شده را ارزیابی می‌کند، مقدار آن بین منفی بی‌نهایت تا یک متغییر است. مقدار۱=NS نشان‌دهنده انطباق کامل مدل با داده‌های مشاهداتی است، درحالی‌که مقدار کمتر از صفر بیانگر آن است که مدل از میانگین داده‌ها عملکرد ضعیف‌تری داشته‌است. این شاخص بیانگر میزان دقت مدل در پیش‌بینی نوسانات زمانی داده‌های واقعی است. (NRMSE)، مقدار RMSE را نسبت به میانگین داده‌های واقعی تنظیم می‌کند تا مقایسه بهتری بین سناریوها فراهم شود. مقدار آن بین صفر و یک می‌باشد. هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است. شاخص توافق ویلموت (Willmott Index) به‌عنوان یک معیار ترکیبی، میزان نزدیکی پیش‌بینی‌ها به مقادیر مشاهداتی را با درنظر گرفتن پراکندگی آن‌ها اندازه‌گیری می‌نماید، مقدار آن بین صفر تا یک می‌باشد. هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر بوده است.

جدول ۲- مقادیر هایپر پارامترهای مورد استفاده برای مدل‌های مورد مطالعه

Table 2 – Input variables used in each scenario

Model	Hyperparameter	Optimal value	Description
RF	n_estimators	150	Number of decision trees in the forest
	max_depth	12	Maximum depth of each tree
	min_samples_split	5	Minimum samples required to split a node
	max_features	'sqrt'	Number of features to consider for best split
SVR	C (Regularization)	10	Trade-off between model simplicity and training accuracy
	kernel	'rbf'	Kernel type (Radial Basis Function)
	gamma	0.01	Kernel coefficient for 'rbf'
	epsilon	0.1	Margin of tolerance where no penalty is given
GA (Optimization)	population_size	50	Number of individuals in each generation
	generations	100	Number of iterations for evolution
	crossover_probability	0.8	Probability of combining parents' features
	mutation_probability	0.1	Probability of random hyperparameter changes

Table 3 – Input variables used in each scenario

جدول ۳- متغیرهای مورد استفاده در هر سناریو

Scenario	Input Variables	output
1	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M	ET_a
2	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}	ET_a
3	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}, CST_1, $CST_{1.6}$	ET_a
4	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}, CST_1, $CST_{1.6}$, T	ET_a
5	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}, CST_1, $CST_{1.6}$, T, $HFIR_2$, $HFIR_1$	ET_a
6	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}, CST_1, $CST_{1.6}$, T, $HFIR_2$, $HFIR_1$, RH	ET_a
7	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}, CST_1, $CST_{1.6}$, T, $HFIR_2$, $HFIR_1$, RH, HFR_1, HFR_2	ET_a
8	FST_1, $FST_{1.6}$, RWS_M, RWS_{ave}, CST_1, $CST_{1.6}$, T, $HFIR_2$, $HFIR_1$, RH, HFR_1, HFR_2, U_2	ET_a

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی دقت روش‌های مورد مطالعه در پیش‌بینی تبخیر-تعرق واقعی، از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R)، خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (Normalized Root Mean Square Error)، ضریب ویلموت (Willmott's Index of Agreement) و شاخص نش-ساتکلیف (NS) مطابق روابط (۵) تا (۹) استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2} \quad (۵)$$

$$R = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})-\frac{1}{N}(P_i-\bar{P})\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})^2\sum_{i=1}^{N}(P_i-\bar{P})^2}} \quad (۶)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (۷)$$

$$WI = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(P_i-\overline{O_i})^2+\sum_{i=1}^{N}(O_i-\overline{O_i})^2}\right] \quad (۸)$$

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(O_i-\bar{O})^2}\right] \quad (۹)$$

در این روابط O_i مقادیر واقعی تبخیر-تعرق واقعی گیاه در منطقه مورد مطالعه، N تعداد داده‌ها، P_i تبخیر-تعرق پیش‌بینی شده با روش‌های مورد مطالعه و $\bar{O}$ میانگین مقادیر واقعی تبخیر-تعرق است که به‌عنوان یک شاخص کلی از داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود. هرچه ریشه میانگین مربعات خطا و خطای جذر میانگین مربعات نرمال‌شده کمتر باشد نمایانگر دقیق‌تر بودن روش می‌باشد. همچنین هرچه میزان ضریب همبستگی، ضریب ویلموت و شاخص نش‌ساتکلیف به عدد یک نزدیکتر باشد، دقت روش بالاتر خواهد بود.

نتایج و بحث

براساس بررسی و مقایسه نتایج حاصل از جدول (۴)، سناریو اول مدل SVR با داشتن ریشه مربعات میانگین خطا به میزان ۲/۵۳۷ (mm/day)، بیش‌ترین خطا را نسبت به سایر سناریوهای این مدل داشته است. در سناریو دوم و سوم به‌ترتیب با کاهش و افزایش ۱۹/۴۳ و ۱/۶۱ درصدی، مقدار RMSE کاهش محسوسی داشته و با افزایش R، عملکرد مدل بهبود نسبی داشته است. در سناریو چهارم مقدار RMSE به ۱/۹۳۲ (mm/day) کاهش یافته است که نشان می‌دهد افزودن پارامتر دما در این سناریو با تأثیر مثبت همراه بوده و منجربه بهبود خطا به‌میزان ۶/۹۸ درصد شده است. درسناریوهای پنجم و ششم تغییرات ناچیز بوده و شاخص‌های ارزیابی مانند ضریب همبستگی و شاخص ویلموت ثابت باقی مانده‌اند. در سناریو هفتم با کاهش مقدار RMSE به میزان ۱/۱۴ درصد در مقایسه با سناریو قبل، دقت مدل افزایش پیدا کرده است. در سناریو هشتم علی‌رغم افزودن پارامتر سرعت باد، مقدار RMSE افزایش یافته است که نشان می‌دهد این متغیر تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش میزان خطا نداشته است. با در نظر گرفتن معیارهای ارزیابی، سناریو هفتم (SVR-7) به‌دلیل داشتن کم‌ترین خطا و بیش‌ترین همبستگی، به‌عنوان بهترین سناریو در میان تمام سناریوهای مدل SVR شناخته شد. افزودن متغیرهای HFR_1 و HFR_2 در این سناریو نقش مؤثری در افزایش دقت مدل داشته است. ارزیابی نتایج SVR-GA نشان می‌دهد که سناریو اول با داشتن RMSE به مقدار ۲/۱۹۹ (mm/day) ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر سناریوهای این مدل داشته است. سناریوهای دوم و سوم با بهبود شاخص RMSE به‌ترتیب به میزان ۲۴/۰۵ و ۳/۵۹ درصدی، عملکرد بهتری نسبت به سناریو قبل خود داشته‌اند. در سناریو چهارم مقدار RMSE با کاهش ۴/۷۸ درصدی نسبت به سناریو سوم، دقت مدل را افزایش داد. در سناریو پنجم نیز با افزوده شدن پارامتر $HFIR_1$ و $HFIR_2$ میزان خطا نسبت به سناریو قبلی حدود ۱۵/۱۳ درصد بهبود یافته است. در سناریوهای ششم و هفتم تغییر محسوسی در مقدار شاخص‌های ارزیابی صورت نگرفته است. در سناریو هشتم، با افزودن متغیر U_2، مقدار RMSE (mm/day) به ۱/۰۱۷ کاهش یافت و نسب به سناریو قبل بهبود ۱۲/۹۲ درصدی را تجربه کرد. افزودن این متغیر تأثیر چشمگیری در کاهش خطا و بهبود دقت پیش‌بینی داشته است. به‌طور کلی، افزودن متغیرهای مختلف باعث بهبود دقت مدل شد، با این حال، افزودن برخی از متغیرها مانند CST_1 و $CST_{1.6}$ تأثیر اندکی بر معیارهای ارزیابی داشتند، درحالی‌که متغیرهایی مانند U_2، $HFIR_1$ و $HFIR_2$ باعث بهبود چشمگیر در دقت پیش‌بینی‌ها شدند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که مدل SVR-GA در طی سناریوهای مختلف پیشرفت چشمگیری را تجربه کرده است. بیش‌ترین میزان بهبود در مقادیر R و کاهش RMSE در سناریوهای ابتدایی مشاهده شده و پس از سناریو پنجم، مدل به پایداری نسبی رسیده است. از سناریو ششم به بعد، تغییرات در عملکرد مدل اندک بوده و نشان‌دهنده بهبود نسبی مدل است. درنهایت در سناریو هشتم، مقدار R در حداکثر مقدار خود و مقدار RMSE در کم‌ترین مقدار ممکن قرار دارد و این سناریو بهترین عملکرد را ارائه داده است. مقایسه نتایج دو مدل نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم ژنتیک باعث بهبود عملکرد مدل SVR شده است و به‌میزان قابل‌توجهی خطای مدل را کاهش داده و دقت پیش‌بینی را افزایش داده است. مقدار RMSE در بهترین سناریوی مدل SVR-GA نسبت به بهترین سناریوی مدل SVR کاهشی به میزان ۴۴/۱۲ درصد داشته است. این کاهش نشان‌دهنده قدرت بالای GA در بهینه‌سازی پارامترهای مدل و افزایش دقت پیش‌بینی می‌باشد. نتایج این تحقیق با نتایج Sharafi et al. (2024) که از مدل ترکیبی SVR-FOA برای پیش‌بینی تبخیر-تعرق در اهواز استفاده کردند، هم‌خوانی دارد. آن‌ها نشان دادند که

DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

ترکیب مدل SVR با یک الگوریتم بهینه‌سازی موجب بهبود دقت پیش‌بینی در مقایسه با مدل مستقل می‌شود. مقایسه سناریوهای اول و دوم مدل RF نشان می‌دهد که جذر ریشه مربعات میانگین خطا حدود ۲۳/۳۰ درصد کاهش یافته و سایر معیارهای ارزیابی نیز به‌صورت قابل‌توجهی بهبود یافته‌اند. دو سناریو سوم و چهارم با کاهش مقدار RMSE معادل ۵/۹۸ درصد و افزایش R همراه بوده‌اند و عملکرد بهتری نسبت به سناریوهای اول و دوم داشته‌اند. افزودن پارامترهای $HFIR_2$، $HFIR_1$ در سناریو پنجم میزان خطای جذر ریشه مربعات میانگین را به میزان ۶/۴۲ درصد کاهش داده است. مقایسه سناریوهای ششم و هفتم نشان می‌دهد که مدل تغییر قابل‌توجهی نداشته و معیارهای ارزیابی به‌صورت تقریباً ثابتی باقی‌مانده است. سناریو اخر(سناریو هشتم) این مدل با کاهش جزئی مقدار RMSE (۰/۱۲ درصد) و افزایش ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده نسبت به سایر سناریوهای مدل RF عملکرد مناسب‌تری داشته است. مقایسه نتایج دو سناریو اول مدل RF-GA نشان می‌دهد که سناریو دوم سبب بهبود شاخص R و RMSE به‌ترتیب به میزان ۱۰/۵ و ۱۷/۱۲ درصد نسبت به سناریو اول شده است. در سناریوهای سوم و چهارم معیار جذر میانگین مربعات خطا حدود ۴/۷۳ درصد کاهش یافته و سایر معیارهای ارزیابی به‌صورت جزئی بهبود یافته‌اند. برای سناریوهای پنجم و ششم مقدار RMSE حدود ۳/۲۴ درصد کاهش یافته و سایر معیارهای ارزیابی تغییر محسوسی نداشته‌اند. بررسی سناریوهای هفتم و هشتم نشان می‌دهد که افزودن پارامترهای HFR_1, HFR_2 در سناریو هفتم موجب کاهش مقدار RMSE و بهبود ۲/۲۵ درصدی شده ولی در سناریو هشتم افزودن پارامتر سرعت باد موجب افزایش آن و کاهش دقت مدل شده است. مقایسه سناریوهای مدل RF-GA نشان داد که سناریو هفتم با داشتن ضریب همبستگی ۰/۹۰، جذر میانگین مربعات خطا (mm/day) ۱/۵۱۶، ضریب نش–ساتکلیف ۰/۷۹۶، جذر میانگین مربعات خطا نرمال‌شده ۰/۱۲۲ و شاخص ویلموت ۰/۹۸ دقت بالاتری را نسبت به سایر سناریوها داشته است. ارزیابی دو مدل RF و RF-GA نشان می‌دهد که استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مدل جنگل تصادفی موجب بهبود دقت مدل شده است. این مدل در اکثر سناریوها RMSE کمتری داشته و شاخص‌های ارزیابی مانند ضریب همبستگی و ضریب ویلموت بهبود یافته‌اند. با این حال، پس از سناریو پنج، تغییرات جزئی‌تر شده و مدل به نقطه بهینه نزدیک شده است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج Monavar Sabegh et al. (2023)، که به برآورد تبخیر–تعرق مرجع روزانه در سه ایستگاه آذربایجان شرقی با استفاده از روش جنگل تصادفی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک پرداختند و نشان دادند که مدل RF-GA با شاخص ویلموت ۰/۹۸۲ و ۰/۹۹۲ به‌ترتیب در سناریو دوم و چهارم برای ایستگاه تبریز عملکرد بهتری از خود نشان داده است، مطابقت دارد.

جدول ٤- نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها در دوره آزمون

Table 4– Performance of the models during the testing period

Model	R	RMSE(mm/day)	NRMSE	NS	WI
SVR-1	0.69	2.537	0.204	0.43	0.74
SVR-2	0.80	2.044	0.164	0.63	0.89
SVR-3	0.80	2.077	0.167	0.62	0.89
SVR-4	0.84	1.932	0.155	0.67	0.92
SVR-5	0.84	1.837	0.148	0.701	0.93
SVR-6	0.84	1.841	0.148	0.70	0.93
SVR-7	0.86	1.820	0.147	0.706	0.93
SVR-8	0.84	1.835	0.148	0.702	0.93
SVR-GA-1	0.76	2.199	0.176	0.572	0.92
SVR-GA-2	0.87	1.670	0.135	0.753	0.97
SVR-GA-3	0.88	1.610	0.130	0.77	0.98
SVR-GA-4	0.89	1.533	0.124	0.792	0.98
SVR-GA-5	0.92	1.301	0.105	0.85	0.99
SVR-G A-6	0.94	1.151	0.093	0.883	0.99
SVR-GA-7	0.94	1.168	0.094	0.879	0.99
SVR-GA-8	0.95	1.017	0.082	0.908	0.99
RF-1	0.72	2.360	0.190	0.504	0.89
RF-2	0.84	1.810	0.146	0.71	0.96
RF-3	0.84	1.821	0.147	0.706	0.96
RF-4	0.86	1.712	0.138	0.74	0.97

Model	R	RMSE(mm/day)	NRMSE	NS	WI
RF-5	0.88	1.602	0.129	0.773	0.98
RF-6	0.88	1.627	0.131	0.765	0.97
RF-7	0.88	1.620	0.130	0.768	0.98
RF-8	0.89	1.618	0.130	0.768	0.98
RF-GA-1	0.76	2.178	0.176	0.580	0.92
RF-GA-2	0.84	1.805	0.146	0.711	0.96
RF-GA-3	0.86	1.755	0.142	0.727	0.96
RF-GA-4	0.87	1.672	0.135	0.752	0.97
RF-GA-5	0.88	1.603	0.129	0.773	0.98
RF-GA-6	0.89	1.551	0.125	0.787	0.98
RF-GA-7	0.90	1.516	0.122	0.796	0.98
RF-GA-8	0.90	1.539	0.124	0.790	0.98

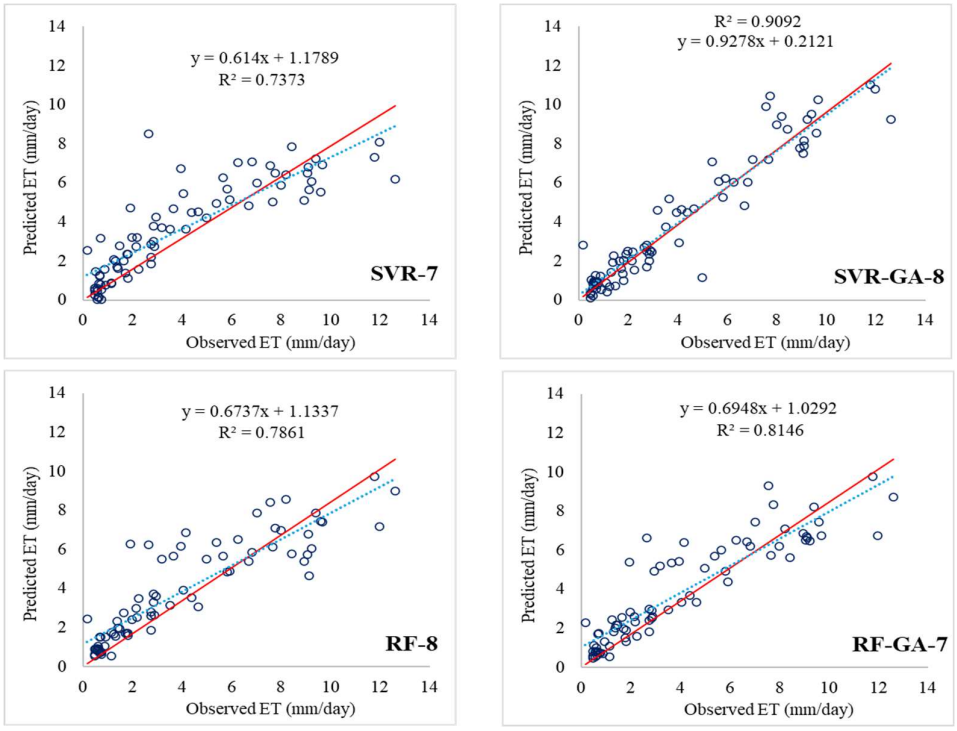


Fig. 6- Scatter plots of observed and predicted evapotranspiration for the best scenario

شکل ٦ – نمودارهای پراکنش مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده تبخیر-تعرق برای بهترین سناریو

نمودار پراکنش مقادیر تبخیر-تعرق واقعی روزانه در شکل (۶) که برای بهترین سناریو هرمدل (SVR-7, SVR-GA-8, RF-8, RF-GA-7) می‌باشد، رسم شده است. مقایسه بین دو مدل SVR-7 وSVR-GA-8 نشان می‌دهد که در مدل SVR-GA-8 داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده، همبستگی بیشتری نسبت به یکدیگر داشته و ضریب تعیین مدل بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک (SVR-GA-8) بیش‌تر از مدل مستقل (SVR-7) بوده است. هم‌چنین مقایسه دو مدل RF-8 و RF-GA-7 نشان می‌دهد، همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده برای مدل RF-GA-7 بیش‌تر از مدل RF-8 بوده و مدل عملکرد بهتری را از خود نشان داده است.

نمودار تغییرات زمانی مقادیر تبخیر-تعرق واقعی روزانه برای بهترین سناریو هر مدل در شکل (۷) قابل ملاحظه می‌باشد. تحلیل نمودار تغییرات زمانی نشان می‌دهد که مدل ترکیبی SVR-GA-8 تقارب بیشتری میان داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی نسبت به مدل منفرد SVR-7 دارد و این تقارب نمایانگر دقت بالای مدل ترکیبی می‌باشد.

DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

همچنین مقایسه نمودار سری زمانی دو مدل RF-8 و RF-GA-7 نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی بهینه شده با الگوریتم ژنتیک توانسته نتایج بهتری در تطابق بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های واقعی نسبت به مدل مستقل خود ارائه دهد و در پیش‌بینی عملکرد بهتری داشته باشد.

شکل (۸) عملکرد مدل‌ها را با استفاده از نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد. مطابق شکل، مدل RF-8 و RF-GA-7 دقت بالاتری را در پیش‌بینی تبخیر–تعرق واقعی روزانه داشته‌اند. مقایسه خط میانه این دو سناریو با خط میانه تبخیر–تعرق واقعی مشاهداتی نشان می‌دهد که این خطوط در یک راستا قرار دارند. علاوه براین، محدوده بین چارکی دو مدل دارای طول یکسان بوده که نشان دهنده پراکنش تقریبا مشابه بین داده‌ها می‌باشد و این موضوع بیانگر آن است که حداقل و حداکثر مقادیری که محدوده توزیع داده‌ها را تعیین می‌کنند، برای مدل مشاهده شده و پیش‌بینی شده تقریبا مشابه می‌باشند. بنابراین می‌توان تفسیر کرد که این دو سناریو عملکرد بهتری را نسبت به سایر سناریوها داشته‌اند. در نمودار مربوط به مدل رگرسیون بردار پشتیبان نیز دو سناریو SVR-7 و SVR-GA-8 تخمین خوبی از تبخیر–تعرق واقعی ارائه داده‌اند. طول بازوی چارکی این دو سناریو به‌طور تقریبی مشابه با مقادیر تبخیر–تعرق مشاهداتی است. به‌علاوه خط میانه این دو سناریو هم‌سو باخط میانه مقادیر مشاهداتی می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که این دو سناریو دقت بالاتری را نسبت به سایر سناریوها داشته‌اند.

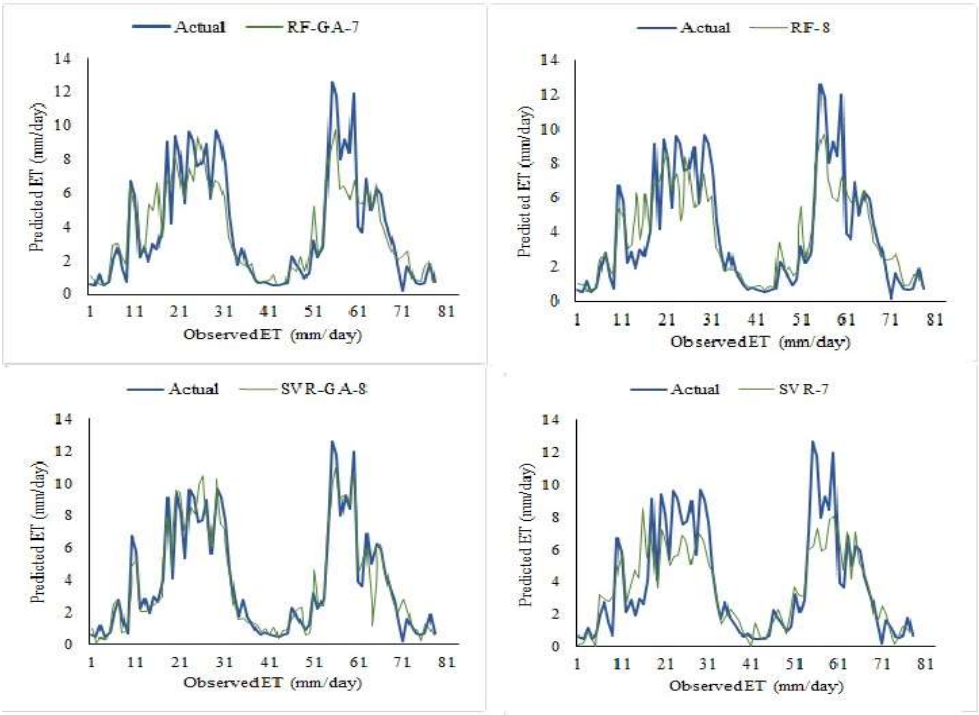


Fig. 7- Actual evapotranpiration time series diagram for the best scenario

شکل۷- نمودار سری زمانی تبخیر-تعرق واقعی برای بهترین سناریو

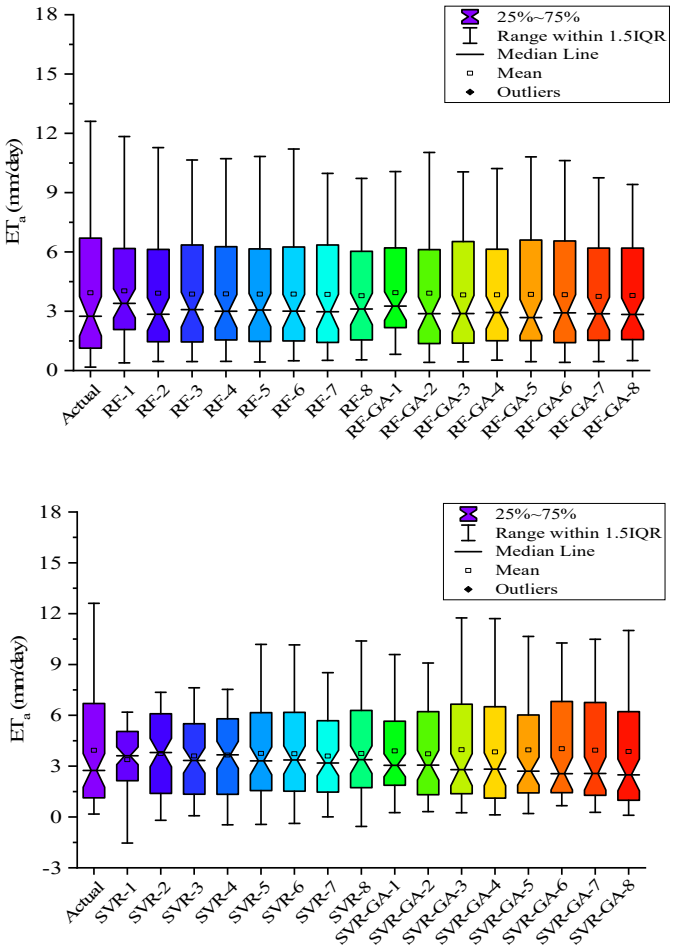


Fig. 8- Box plot predicted values and observed values

شکل ۸- نمودار جعبه‌ای مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهداتی

شکل (۹) دیاگرام‌های تیلور مدل‌های منفرد و هیبریدی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۹)، مقایسه دیاگرام‌های تیلور مربوط به مدل‌های جنگل تصادفی و مدل بهینه‌شده آن‌ها با الگوریتم ژنتیک (RF-GA) نشان می‌دهد که بهینه‌سازی پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک منجربه بهبود قابل‌توجه عملکرد مدل شده است. به‌طوری‌که، مدل‌های RF-GA به نقطه مرجع (Reference) نزدیک‌تر بوده و دارای ضریب همبستگی بالاتر، انحراف معیار کمتر نسبت‌به مدل‌های اولیه RF بوده‌اند. این موارد نشان‌دهنده دقت بالا و عملکرد مطلوب مدل‌های بهینه‌شده است.

از سوی دیگر، بررسی و مقایسه دیاگرام‌های تیلور مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان و مدل بهینه‌شده آن (SVR-GA) نیز نشان‌دهنده بهبود چشمگیر عملکرد مدل‌ها پس از بهینه‌سازی است، به‌گونه‌ای که مدل‌های SVR-GA به نقطه مرجع نزدیک‌تر بوده، ضریب همبستگی بالاتر، انحراف معیار کمتری در مقایسه با مدل منفرد خود دارد. همگرایی بیش‌تر به خط مرجع و ضریب همبستگی بالاتر نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک توانسته پارامترهای مدل را به‌خوبی بهینه کند و مدل‌های قابل اعتمادتری بسازد.

DOI: 10.22055/jise.2025.49823.2165

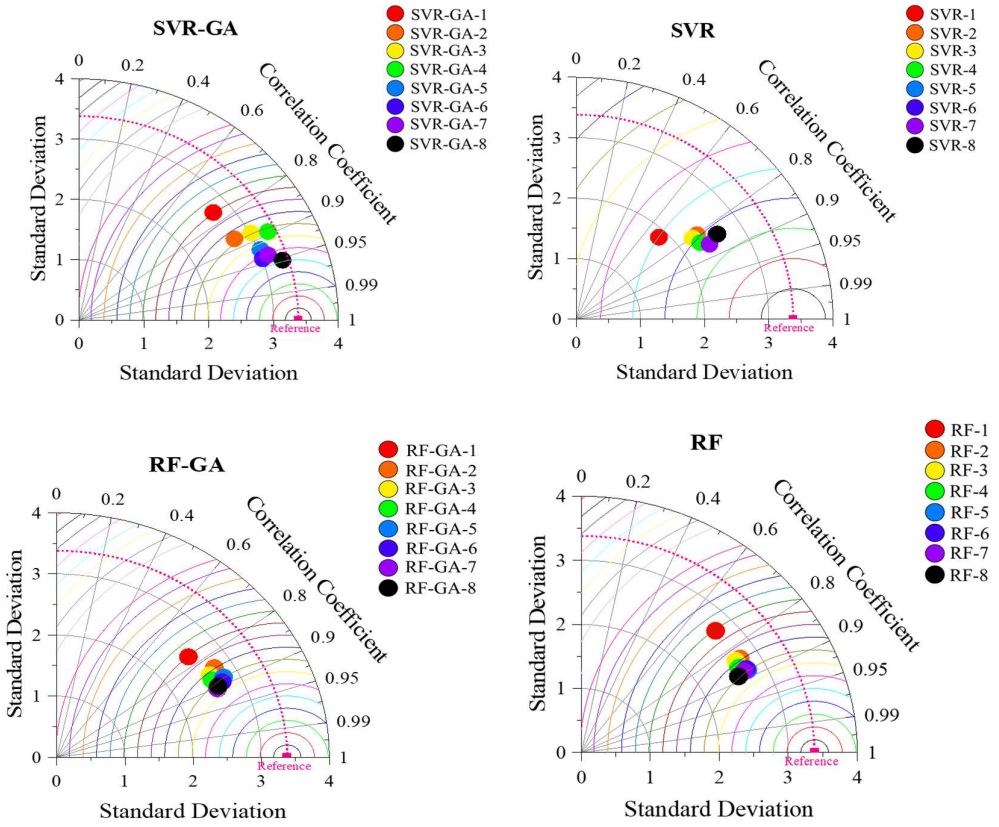


Fig. 9– Taylor diagram of scenarios for observed and predicted values
شکل ۹- دیاگرام تیلور سناریوها برای مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر مشاهداتی

نتیجه‌گیری

کاهش منابع آب و ضرورت مدیریت بهینه در بخش کشاورزی، اهمیت اندازه‌گیری تبخیر–تعرق واقعی را افزایش داده است. یکی از ابزارهای اندازه‌گیری تبخیر–تعرق واقعی لایسیمتر است، اما محدودیت دسترسی به آن موجب ایجاد چالش و کمبود داده‌های ET_a شده است. این پژوهش به توسعه یک مدل دقیق برای پیش‌بینی تبخیر–تعرق واقعی می‌پردازد که می‌تواند جایگزین ابزاری مانند لایسیمتر شود. در این راستا مدل های SVR، SVR-GA، RF و RF-GA با استفاده از داده‌های در دسترس دو لایسیمتر در بوشلند تگزاس نظیر دمای عمق‌های مختلف خاک، شار حرارتی خاک، ذخیره نسبی آب، رطوبت نسبی و سرعت باد می‌باشد که در هشت سناریو و برای سال ۲۰۱۲-۲۰۱۱ ارزیابی شدند. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل‌های بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک بالاترین دقت را در پیش‌بینی تبخیر–تعرق واقعی داشته و کم‌ترین مقدار میانگین جذر مربعات خطا (۱/۵۱۶و ۱/۰۱۷) را ارائه داده است. . هم‌چنین در این پژوهش، تأثیر پارامترهای ورودی مختلف بر دقت پیش‌بینی تبخیر–تعرق واقعی با بهره‌گیری از مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، جنگل تصادفی (RF) و مدل‌های بهینه‌شده آن‌ها با الگوریتم ژنتیک (SVR-GA، RF-GA) به طور جامع مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای پایه شامل میانگین دمای روزانه خاک در عمق‌های مختلف داخل و خارج لایسیمتر، ذخیره نسبی آب در لایسیمتر در نیمه‌شب، میانگین ذخیره نسبی و رطوبت نسبی، اگرچه نقش مهمی در مدل‌سازی دارند، اما به تنهایی برای دستیابی به دقت قابل قبول کافی نیستند. افزودن پارامتر دمای هوا تأثیر چشم‌گیری در کاهش خطا و بهبود ضریب همبستگی داشت. هم‌چنین پارامترهای شار حرارتی خاک، چه در ردیف‌ها و چه در فاصله بین ردیف‌ها ($HFIR_{1,2}$ و $HFR_{1,2}$)، نقش مؤثری در بهبود دقت پیش‌بینی ایفا کردند. سرعت باد به عنوان پارامتری با تأثیر متغیر، در مدل‌های بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک موجب افزایش دقت شد، اما در مدل‌های مستقل اثر قابل توجهی نداشت و در برخی موارد حتی موجب افزایش خطا گردید. مقایسه بین نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های مستقل دارند.هم‌چنین با تنظیم بهینه پارامترها می‌توان از این مدل‌ها برای پیش‌بینی دقیق تبخیر–تعرق واقعی با استفاده از داده‌های در دسترس بهره برد و وابستگی به روش‌های پرهزینه را کاهش داد. در پژوهش‌های آتی، می‌توان از روش‌های پیشرفته‌تر اعتبارسنجی مانند اعتبارسنجی متقاطع برای ارزیابی پایدارتر مدل‌ها استفاده کرد. این روش‌ها به‌ویژه در مواردی

که حجم داده‌ها محدود است (مانند داده‌های لایسیمتری)، می‌توانند اطمینان بیشتری از عدم وابستگی نتایج به تقسیم‌بندی خاص داده‌ها ایجاد کنند. همچنین، استفاده از تقسیم‌بندی سه‌گانه (Train-Validation-Test) می‌تواند به بهینه‌سازی دقیق‌تر هایپرپارامترها و ارزیابی بی‌طرفانه‌تر مدل‌ها بینجامد. افزودن این روش‌ها در کنار گزارش معیارهای ارزیابی روی داده‌های مستقل آزمون، می‌تواند اعتبار علمی پژوهش را افزایش دهد.

تضاد منافع نویسندگان

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

منابع مالی

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

دسترسی به داده‌ها

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

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.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: سعیده محمدزاده، نگارش مقاله.

نویسنده دوم: وحید رضاوردی نژاد، بررسی محتوای مقاله و اصلاحات.

نویسنده سوم: جواد بهمنش، بررسی محتوای مقاله و اصلاحات.

نویسنده چهارم: میلاد شرفی، بررسی نتایج و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، بررسی محتوای مقاله و اصلاحات علمی و نگارشی.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از آزمایشگاه حفاظت و تولید USDA-ARS، واحد تحقیقات مدیریت آب و خاک در بوشلند، تگزاس به‌دلیل فراهم سازی داده‌های یک‌ساله لایسیمتر وزنی گیاه آفتابگردان برای این پژوهش، قدردانی می‌شود.

References

1- Achite, M., Samadianfard, S., Elshaboury, N. and Sharafi, M., 2023. Modeling and optimization of coagulant dosage in water treatment plants using hybridized random forest model with genetic algorithm optimization. *Environment, Development and Sustainability*, *25*(10), pp.11189-11207.doi: 10.1007/s10668-022-02523-z.

2- Achite, M., Samadianfard, S., Elshaboury, N., Toubal, K.A., Abdelkader, E.M. and Sharafi, M., 2024. A combined support vector regression with a firefly algorithm for prediction of energy consumption in wastewater treatment plants. *Water Science & Technology*, *90*(10), pp.2747-2763. doi: 10.2166/wst.2024.375.

3- Bayat, V.M., Zare, A.H., Maroufi, S., Sabziparvar, A.A. and Soltani, F., 2009. Simulation of reference evapotranspiration using artificial neural method and empirical methods and comparison with experimental lysimeter data in cold semi-arid climate of hamedan.

4- Breiman, L. 2001. Random forests. *Machine learning*. *45*: 5-32. doi: 10.1023/A:1010933404324.

5- Chiew, FHS., Kamaladasa, NN., Malano, H.M. and McMahon, T.A. 1995. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agricultural Water Management. 28*:9–21. doi: 10.1016/0378-3774(95)01172-F.

6- Choudhury, B. 1999. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model. *Journal of Hydrology. 216*(1-2): 99-110. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00293-5

7- Cimen, M. 2008. Estimation of daily suspended sediments using support vector machines. *Hydrological Sciences Journal. 53*(3): 656-666. doi: 10.1623/hysj.53.3.656

8- Da Silva Junior, J.C., Medeiros, V., Garrozi, C., Montenegro, A. and Gonçalves, G. E. (2019). Random forest techniques for spatial interpolation of evapotranspiration data from Brazilian's Northeast. *Computers and electronics in agriculture*. 166(1): 1-10. Doi: 10.1016/j.compag.2019.105017

9- Dong, Y. and Hansen, H. 2023. Development and design of an affordable field scale weighing lysimeter using a microcontroller system. *Smart Agricultural Technology. 4*(1): 1-8. doi: 10.1016/j.atech.2022.100147.

10- Evett, S,R,, Copeland, K.S., Ruthardt, B.B., Marek, G.W., Colaizzi, P.D., Brauer, D.K. and Howell, T.A. 2022. The Bushland Maize for Grain Datasets: A Machine-readable Resource. 2022 ASABE Annual International Meeting. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. 1*(1): 28-41. doi: 10.13031/aim.202201078.

11- Evett, S. R., Howell, T. A., Todd, R. W., Schneider, A. D. and Tolk, J. A. 2000. Alfalfa reference ET measurement and prediction. *In Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium. 17*(1): 14-16.

12- Evett, S.R., Marek, G.W., Copeland, K.S. and Colaizzi, P.D. 2018. Quality management for research weather data: USDA-ARS, Bushland, TX. Agrosystems, *Geosciences & Environment. 1*(1): 1-18. doi: 10.2134/age2018.09.0036

13- Feng, K. and Tian, J. 2021. Forecasting reference evapotranspiration using data mining and limited climatic data. *European Journal of Remote Sensing. 54*(2): 363-371. doi: 10.1080/22797254.2020.1801355.

14- Feng, Y., Cui, N., Gong, D., Zhang, Q. and Zhao, L. 2017. Evaluation of random forests and generalized regression neural networks for daily reference evapotranspiration modelling. *Agricultural Water Management. 193(*1): 163-173. doi: 10.1016/j.agwat.2017.08.003.

15- Gunn, S.R. 1998. Support vector machines for classification and regression, *ISIS Technical Report. 14* (1): 5–16.

16- Hashemian AH, Manochehri S, Afshari D, Manochehri Z, Salari N and Shahsavari S, 2019. Prognosis of multiple sclerosis disease using data mining approaches random forest and support vector machine based on genetic algorithm. *Tehran University Medical Journal 77(1): 33-40.* doi: magiran.com/p1974089

17- Holland, JH. 1992. Adaptation in natural and artificial systems: *an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press. doi: 10.7551/mitpress/1090.001.0001.

18- Jha, S.K. and Hayashi, K. 2014. A novel odor filtering and sensing system combined with regression analysis for chemical vapor quantification. *Sensors and Actuators B: Chemical. 200*(1): 269-287. doi: 10.1016/j.snb.2014.04.022

19- Jing, W., Yang, Y., Yue, X. and Zhao, X. 2015. Mapping Urban Areas with Integration of DMSP/OLS Nighttime Light and MODIS Data Using Machine Learning Techniques. *Remote Sensing. 7*(9): 12419-12439. doi: 10.3390/rs70912419.

20- Khosravi, K., Daggupati, P., Alami, M. T., Awadh, S. M., Ghareb, M. I., Panahi, M. and Yaseen, Z.M. 2019. Meteorological data mining and hybrid data-intelligence models for reference evaporation simulation: A case study in Iraq. *Computers and Electronics in Agriculture. 167*(1): 105-121. doi: 10.1016/j.compag.2019.105041.

21- Kumar, P. Singh, A.K. 2022. A comparison between MLR, MARS, SVR, and RF techniques: Hydrological time-series modeling. *Journal of Human, Earth, and Future. 3*(1): 90-98. doi: 10.28991/HEF-2022-03-01-07.

22- Lamm, F.R., Aiken, R.M. and Aboukheira, A.A. 2011. Irrigation research with sunflowers in Kansas. In: Proc. *23rd Annual Central Plains Irrig. Conf., 23rd, Burlington, 17*: 169–180.

22- Marek, G.W., Evett, S.R., Gowda, P.H., Howell, T.A., Copeland, K.S. and Baumhardt, R.L., 2014. Post-processing techniques for reducing errors in weighing lysimeter evapotranspiration (ET) datasets. *Transactions of the ASABE*, *57*(2), pp.499-515.doi: 10.13031/trans.57.10433.

23- Mokari, E., DuBois, D., Samani, Z., Mohebzadeh, H. and Djaman, K. 2022. Estimation of daily reference evapotranspiration with limited climatic data using machine learning approaches across different climate zones in New Mexico. *Theoretical and Applied Climatology. 147*(1): 575-587. doi: 10.1007/s00704-021-03855-y.

24- Monavar Sabegh, S. , Zarehaghi, D. , Samadianfard, S. , Neishabouri, M. R. and Mikaeili, F. 2023. Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using Random Forest Optimized by Genetic Algorithm. *Water and Soil Science*, *33*(4), 33-53 (In Persian). doi: 10.22034/ws.2021.48756.2449.

25- Saravi, B., Hassel, F., Ülkümen, S., Zink, A., Shavlokhova, V., Couillard-Despres, S. and Lang, G.M. 2022. Artificial intelligence-driven prediction modeling and decision making in spine surgery using hybrid machine learning models. *Journal of Personalized Medicine. 12*(4): 509-524. doi: 10.3390/jpm12040509.

26- Sharafi, M. , Besharat, S. and Zeinalzadeh, K. 2024. A comparative study using a data-driven method versus a hybrid approach to estimate daily reference evapotranspiration in Ahvaz. *Irrigation Sciences and Engineering*, *47*(2), 53-68 (In Persian). doi: 10.22055/jise.2023.43524.2065.

27- Sharafi, M. and Samadianfard, S. 2024. Prediction of daily evaporation values using support vector regression coupled with firefly algorithm in the coastal areas of Iran. *Water and Soil Science*, *34*(1), 39-53 (In Persian). doi: 10.22034/ws.2023.54178.2500.

28- Shiri, N. , Kazemi, M. H. and Shiri, J. 2021. Application of empirical and random forest models in estimating reference evapotranspiration of humid regions. *Water and Soil Science*, *31*(2), 1-11 (In Persian). doi: 10.22034/ws.2021.12356.

29- Smola, A. J. and Schölkopf, B. 2004. A tutorial on support vector regression. *Statistics and computing. 14*(1): 199-222. doi: 10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88.

30- Talukdar, S., Mallick, J., Sarkar, S. K., Roy, S. K., Islam, A. R. M. T., Praveen, B. and Sobnam, M. 2022. Novel hybrid models to enhance the efficiency of groundwater potentiality model. *Applied Water Science. 12*(4): 62-75. doi: 10.1007/s13201-022-01571-0.

31- Tolk, J.A. and Howell, T.A. 2012. Sunflower water productivity in four Great Plains soils. *Field Crops Research. 127*(2): 120-128. doi: 10.1016/j.fcr.2011.11.012.

32- Tyralis, H., Papacharalampous, G. and Langousis, A. 2019. A brief review of random forests for water scientists and practitioners and their recent history in water resources. *Water. 910*(1):15-36. doi: 10.3390/w11050910.

33- Wang, S., Lian, J., Peng, Y. and Chen. H. 2019. Generalized reference evapotranspiration models with limited climatic data based on random forest and gene expression programming in Guangxi, China. *Agricultural Water Management. 221*(1): 220-230. doi: 10.1016/j.agwat.2019.03.027.

34- Wu, L., Huang, G., Fan, J., Ma, X., Zhou, H. and Zeng, W. 2019. Hybrid extreme learning machine with meta-heuristic algorithms for monthly pan evaporation prediction. *Computers and Electronics in Agriculture. 168*(1): 105-115. doi: 10.1016/j.compag.2019.105115.

35- Xiong, Y.J., Chen, X., Tang, L. and Wang, H. 2022. Comparison of surface renewal and Bowen ratio derived evapotranspiration measurements in an arid vineyard. *Journal of Hydrology. 613*(1): 22-37. doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128474.

36- Yoon, H., Jun, S.C., Hyun, Y., Bae, G.O. and Lee, K.K. 2011. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. *Journal of hydrology. 396*(1-2): 128-138. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.11.002

37- Zouzou, Y. and Citakoglu, H. 2023. General and regional cross-station assessment of machine learning models for estimating reference evapotranspiration. *Acta Geophysica. 71*(2): 927-947. doi: 10.1007/s11600-022-00939-9.

In The Name of God

Irrigation Sciences and Engineering

(Scientific)

Vol. 49 (2) **Summer 2026**

Board of Editors

AkhondAli, A. M.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Ghomeshi, M	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Heydarpour, M.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology**
Kashefipour, S. M.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Liaghat, A. M.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, University of Tehran**
Hosseinzadeh Dalir, A.	**Professor**	**Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran.**
Naseri, A. A.	**Professor**	**Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran**
Zand Parsa, Sh.	**Professor**	**Faculty of Agriculture, Shiraz University of Technology**
Pagliara, Stefano.	**Professor**	**Department of Civil Engineering, University of Pisa,Italy**
Sai Hin, L.	**Associate Professor**	**Department Of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Malaya, Maliysia**
Ahmadian, R.	**Professor**	**Department of Civil Engineering, School of Engineering, Cardiff University, UK**
Ritzema, H.	**Associate Professor**	**Water Resources Management Group, Environmental Sciences Group, Wageningen University & Research, Netherland**

Published by: Shahid Chamran University of Ahvaz, Faculty of Water Sciences Engineering, Ahvaz, Iran.
Director: BoromandNasab, S.
Editor-in-Chief: Kashefipour, S.M.
Editorial Manager: Yazdani, N
Type Setting: Yazdani, N.

E–mail: JISE.Water@Scu.ac.ir
JISE.Water@yahoo.com

Publication license of the Ministry of Culture and Islamic Guidance No. 10362/124 on 29/12/1998 and license of the Journal Review Office of the Ministry of Science, Research and Technology No. 11/3/1264 on 21/10/2009 for the Journal of Irrigation Sciences and Engineering.

Journal of
Irrigation Sciences and Engineering(JISE)
(Scientific)
ISSN 2588-5952
Iranian Hydraulic Association
Shahid Chamran University of Ahvaz
Faculty of Water Sciences Engineering
Vol. 49 (2) Summer 2026

Contents

Title	Authors	Page
Experimental investigation of the effect of single-row dentate baffles on the length of vertical drop structure	Jamshidi, M. Shafai Bejestan, M. Bahrami Yarahmadi and M. Rahmanshahi	**1**
Investigating the effect of changing the cropping pattern on Water Resources in Molla Sadra Dam Basin using the System Dynamics method	A. Laghbdost arani, H. Zarei, F. Radmanesh, A. Solgi and M. Zarghami	**15**
Generation of Unstructured Grids based on Sedimentation Data Obtained from the Map of Erosion and Sedimentation (Case Study: Dez Dam Watershed)	A. Daneh-Dezfuli and S.S. Bahrainian	**33**
Evaluation of the accuracy of LarsWG models and precipitation forecasting in the Karkheh Basin	M. AryaSadr and D. Rahimi	**51**
Studying the effect of different fertilization strategies on the output nitrate of irrigation network using SWAT model (Case study: Dez irrigation and drainage network)	A. Bakhtiarifar, M. Albaji, M. Golabi, S. Boroomandnasb and A. Shahnazari	**73**
Identifying Key Factors Influencing Runoff and Simulating Rainfall-Runoff with the SWAT Hydrological Model: A Case Study of the Khersan Watershed	K. Shahedi, S.H. Roshun, A. Shahnazari and M. Ghorbanifard	**89**
Determining The Wetted Perimeter and Water Flow Cross-Section in Furrow Irrigation Using Different Methods	A. Rahimi	**105**
Evaluation of Optimized Hybrid SVR and RF Models for Predicting Actual Evapotranspiration of Sunflower Crop	S. Mohammadzadeh, V. Rezaverdinejad, J. Bahmanesh and M. Sharafi	**119**