Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Effects of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater on the content and distribution of heavy metals in faba bean plant (*Vicia faba* L.)

Houshang Ghamarnia [1], Mohammad Rasoul Abbasi [2]✉, Milad Farmanifard [3]

[1] Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir

[2] Corresponding Author, Postdoctoral fellowship, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.abasi@razi.ac.ir

[3] Ph.D. graduated of Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: milad.farmanifard@gmail.com

ABSTRACT

The reduction of renewable water resources in arid and semi-arid regions of the world and on the other hand, the increase in the demand for high-quality water resources has forced the dicision makers to allocate water resources of higher quality for urban and drinking purposes and water resources of lower quality (such as municipal reclaimed wastewater) to be allocated for purposes such as agriculture, industry and green spaces. However, the situation of accumulation of heavy metals in various parts (tissues) of crops irrigated with wastewater is still unclear and due to the risk of these metals entering the human food cycle, it should be measuered and monitored regularly. In this research, the effects of irrigation with treated municipal wastewater on the accumulation of heavy metals in the roots, aerial parts and seeds of the faba bean plant (*Vicia faba* L.) were investigated and compared with concentration of heavy metals in the faba bean plant irrigated with well water (as a control treatment).The results showed that the concentration of all the heavy metals in different parts of the faba bean plant under the wastewater treatment was significantly higher than the well water treatments, so that the concentration of iron and cadmium in the root (non-edible part) of the faba bean plant was higher than the standards' limits. The concentration of copper and manganese in different parts of faba beans was lower than the permissible limits. The concentration of cadmium and zinc in the grain is higher than the standards' limits, so measures should be taken to reduce the concentrations of these metals in the effluent.

Key.words: Environmental pollution, Treated wastewater, Unconventional waters, Water resources crisis, Accumulation of copper, Iron, Zinc, Cadmium and Manganese in plants

Article Type: Research Article
Article history: Received: 03 January 2024 **Revised:** 10 March 2024 **Accepted:** 21 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

On the one hand, like the arid and semi-arid regions of the world, Iran is facing a decrease in renewable water resources and on the other hand an increase in the demand for high-quality water.This has forced the dicision makers to preserve better quality water resources for urban and drinking purposes and less quality water resources (such as municipal reclaimed wastewater) to be allocated for purposes such as irrigation of agricultural crops, vegetables and green spaces. In the meantime, the situation of the accumulation of heavy metals in different parts of the crops and vegetables irrigated with reclaimed wastewater, is still unclear. Therefore, the concentration of these metals in plants should be measured and monitored, regularly due to their risk of entering the human food cycle and bringing about diseases. Therefore, in this study, the effects of irrigation with treated municipal wastewater on the accumulation of heavy metals in the roots, aerial parts and seeds of the faba bean plant (*Vicia faba* L.) were investigated and compared with concentration of heavy metals in the faba bean plant irrigated with well water (as a control treatment).

2. Methodology

2.1. Experimental site and Kermanshah municipal wastewater treatment plant

This research was conducted in Kermanshah city with a semi-arid-cold climate. The average long term annual temperature and precipitation of this city is 14.3 degrees Celsius and 444 mm, respectively, where most of the precipitation occurs between the months of November and May. Kermanshah municipal wastewater treatment plant is located in the southwest of the city with an area of 78 hectares. This treatment plant collects waste water from a population of 400,000 people, so that its daily discharge capacity is 60,000 cubic meters. The treatment process in this waste water treatment plant is a conventional activated sludge method, which includes primary, secondary and tertiary treatment stages. In this research, the fields under faba bean cultivation were located at the downstream of the treatment plant, each with an area of nearly 5 hectares. The lands under irrigation with treated waste water were always irrigated with the effluents of the treatment plant using the traditional surface irrigation method for nearly 10 years, and the control treatments, were also irrigated with well water for many years.

2.2. Collecting and preparing plant samples

At the time of crop harvesting, a number of whole faba bean plants (roots, aerial parts and seeds) from different parts of each treatment (farm) were randomly harvested in three replicates. Afterwards, the different parts of each plant were washed with "triple distilled water" in order to

eliminate possible pollutants. After the washing process, the drying process of the plant samples was carried out in the vicinity of the open air. Then, different parts of each plant, such as the seeds, aerial parts and roots were crushed and ground and packed in plastic bags as plant samples.

2.3. Measurement of heavy metal concentration

Plant samples were digested using the method described by Batarse et al. (2011). An atomic absorption device (Spectra AA 220 model) [made by VARIAN factory in Australia] was used to measure the concentration of heavy metals in each sample.

2.4. Statistical Analysis Statistical Analysis

The statistical analysis was carried out in the form of a completely randomized design (CRD) with three replications and two irrigation treatments viz, treated waste water and well water (as control). The measured parameters were analyzed and evaluated using MiniTab 17.0, SAS 9.1 and MSTATC statistical softwares. After performing the test of normality of the data, comparison of means tests was performed at 1 and 5 percent of probability levels using Duncan's method.

3. Results and discussion

The results showed that the concentration of all the heavy metals in different parts of the faba bean plant under the wastewater treatment was significantly higher than the well water treatments, so that the concentration of iron and cadmium in the root (non-edible part) of the faba bean plant was higher than the standards' limits. The concentration of copper and manganese in different parts of faba beans was lower than the permissible limits. The concentration of cadmium and zinc in the grain is higher than the standards' limits, so measures should be taken to reduce the concentrations of those metals in the effluent.

4. Conclusions

Understanding the accumulation of heavy metals in plant tissues is critical to address environmental and food safety concerns. By comparing the concentration of heavy metals with existing standards, potential risks can be identified and strategies can be developed to minimize the impact of heavy metal pollution. This research is very important and necessary to maintain the health of the ecosystem and human well-being in the face of increasing demand for the use of non-conventional water in arid and semi-arid regions due to successive droughts and the crisis of water resources. Efforts to reduce the pollution of heavy metals cadmium and zinc in the effluent of treated wastewater, which in this research were found to be hazardous to human health, include specific and additional treatment of these two metals from the effluent, implementation of appropriate waste management practices, improvement of industrial processes, regulating the use of specific products and using effective technologies for wastewater treatment. Supervisory and management measures are also necessary to control the release of heavy metals in water resources.

5. References

Batarseh, M. I.., Rawajfeh, A., Ioannis, K. K., & Prodromos, K. H. (2011). Treated municipal wastewater irrigation impact on olive trees (*Olea Europaea* L.) at Al-Tafilah, Jordan. Water, Air, & Soil Pollution, 217, 185-196. https://www.academia.edu/6357678/Treated_Municipal_Wastewater_Irrigation_Impact_on_Olive_Trees_Olea_Europaea_L_at_Al_Tafilah_Jordan

6. Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank Razi University for providing the facilities to carry out the lysimetric and laboratory experiments of this study.

Cite this article: Ghamarnia, H., Abbasi, M.R., & Farmanifard, M. (2024). Effects of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater on the content and distribution of heavy metals in faba bean plant (*Vicia faba* L.), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 1-18, DOI: 10.22126/atwe.2024.10069.1070

Publisher: Razi University

© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری کرمانشاه بر غلظت و توزیع فلزات سنگین در گیاه باقلا

هوشنگ قمرنیا[۱]، محمد رسول عباسی[۲]✉، میلاد فرمانی‌فرد[۳]

[۱] استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hghamarnia@razi.ac.ir

[۲] نویسنده مسئول، پژوهشگر پسادکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.abasi@razi.ac.ir

[۳] دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: milad.farmanifard@gmail.com

چکیده

کاهش منابع آب تجدیدپذیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا از یک‌سو و افزایش حجم تقاضا برای دستیابی به آب باکیفیت از سویی دیگر سبب شده است که منابع آب باکیفیت مناسب‌تر برای مصارف شهری و شرب حفظ‌شده و منابع آب باکیفیت پایین‌تر (مثل فاضلاب تصفیه‌شده) برای مصارفی همچون کشاورزی، صنعت و فضای سبز بکار گرفته شوند. اما وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات زراعی آبیاری شده با پساب همچنان نامشخص است و به دلیل خطر ورود این فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی پایش شود. در این پژوهش اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد بر تجمع فلزات سنگین در ریشه، اندام هوایی و دانه گیاه باقلا بررسی شد. نتایج نشان داد که تجمع تمام فلزات سنگین در اندام‌های گیاه باقلا تحت تیمار پساب به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمارهای آب چاه بود که حتی غلظت آهن و کادمیوم در ریشه (اندام غیرخوراکی) باقلا بالاتر از استانداردها قرار داشت. غلظت مس و منگنز در اندام‌های مختلف باقلا پایین تر از حدود مجاز بود. غلظت کادمیوم و روی در دانه بالاتر از استاندارد بود که در صورت مصرف مکرر توسط انسان برای سلامتی خطرساز خواهد شد و لزوماً باید تمهیداتی برای کاهش این دو فلز در پساب اندیشید.

واژه‌های کلیدی: آلودگی محیطزیست، فاضلاب تصفیه‌شده، آب‌های نامتعارف، بحران منابع آب، تجمع مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز در گیاه

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۳ دی ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۲۰ اسفند ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۰۲ فروردین ۱۴۰۳ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: قمرنیا، ه.، عباسی، م.ر.، و فرمانی‌فرد، م. (۱۴۰۳). اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده فاضلاب شهری کرمانشاه بر غلظت و توزیع فلزات سنگین در گیاه باقلا ، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۱-۱۸، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10069.1070

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

CC BY NC

مقدمه

منابع آب شیرین برای حفظ حیات و حمایت از اکوسیستم‌های مختلف، کشاورزی، صنعت و فعالیت‌های انسانی حیاتی هستند. اهمیت منابع آب شیرین را نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا آب برای آشامیدن، بهداشت، تولید غذا، تولید انرژی و حفظ تعادل اکولوژیکی ضروری است. بااین‌حال، با رشد فزاینده جمعیت، شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی، تقاضا برای آب به‌طور پیوسته در حال افزایش است و بر منابع آب شیرین موجود فشار وارد می‌کند. به‌طوری‌که استفاده جهانی از آب شیرین از سال ۱۹۰۰ شش برابر شده است (سانتوس و همکاران [۱]، ۲۰۲۳). در سال ۲۰۱۴، حدود ۴ تریلیون مترمکعب از منابع آب شیرین جهان برای کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی استفاده شد (ریچی و رزر[۲]، ۲۰۲۳). بااین‌حال، برای حفظ سطوح پایدار این منبع حیاتی، میزان برداشت آب شیرین باید کمتر از نرخ تجدید طبیعی باشد. در این میان ایران نیز مانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به دلیل افزایش جمعیت، خشک‌سالی‌های پیاپی و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب شیرین با چالش کاهش و کمبود منابع آب شیرین برای آبیاری محصولات کشاورزی مواجه شده است (عباسی و سپاس خواه[۳]، ۲۰۲۲).

از منظر استفاده مجدد از آب، امکان بازیابی آب از منابع مختلف و تصفیه و استفاده مجدد از آن برای اهداف مفید و احیای محیطزیست وجود دارد. این استراتژی می‌تواند منابع آب جایگزینی برای تأمین آب موردنیاز فراهم کرده و امنیت و پایداری آب را بهبود بخشد. منابع آب واجد شرایط برای استفاده مجدد عبارت‌اند از فاضلاب شهری، فاضلاب صنعتی، آب‌های شوری که توسط سیستم‌های مختلف آب‌شیرین‌کن نمک‌زدایی شده‌اند، استحصال آب باران و رواناب کشاورزی و منابع طبیعی (سازمان حفاظت محیطزیست آمریکا[۴]، ۲۰۲۲ و کریستنسن و همکاران[۵]، ۲۰۱۸). لذا، از این میان یکی از راهکارها برای مقابله با چالش کمبود و کاهش منابع آب شیرین می‌تواند بهره‌برداری مؤثر از منابع آب غیرمتعارف همچون فاضلاب تصفیه‌شده شهری برای آبیاری گیاهان زراعی، باغات و فضای سبز باشد. تقریباً تخمین زده می‌شود که حدود ۲۰ میلیون هکتار از زمین‌های زراعی در سطح جهان با فاضلاب آبیاری می‌شود که تقریباً ۱۰ درصد از زمین‌های کشاورزی آبی دنیا را تشکیل می‌دهد (گویال[۶]، ۲۰۱۶) که با توجه به روند صعودی کاهش منابع آب شیرین در بخش کشاورزی می‌توان پیش‌بینی کرد که در سال‌های آتی اقبال جهانی برای استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده به‌عنوان یک‌راه حل پایدار برای جبران کمبود آب در بخش کشاورزی افزایش یابد (انسینک و همکاران[۷]، ۲۰۰۲ و کیزیلوغلو و همکاران[۸]، ۲۰۰۸). با این نرخ افزایشی استفاده از پساب‌های تصفیه‌شده خانگی برای آبیاری محصولات کشاورزی مقداری از مشکلات آلودگی حال حاضر آب‌های سطحی که ناشی از رهاسازی فاضلاب به درون آن‌ها است کاهش پیدا می‌کند چراکه حجم و غلظت کمتری از فاضلاب و آلاینده‌های آن به درون آب‌های سطحی ریخته می‌شود که نه‌تنها به حفظ منابع آب شیرین کمک می¬کند بلکه امکان استفاده از مواد مغذی موجود در پساب (عمدتاً نیتروژن (N) و فسفر (P)) جهت پرورش محصولات کشاورزی که به‌نوبه خود منافع اقتصادی زیادی برای کشاورزان (درنتیجه استفاده کمتر از کودهای شیمیایی) دارد را فراهم می‌آورد (گروه اروپایی[۹]، ۲۰۲۰). همچنین سایر مواد ریزمغذی باارزش و مواد آلی موجود در پساب مزایای بسیاری را برای اراضی کشاورزی خواهند داشت (پیوتروسکا و همکاران[۱۰]، ۲۰۰۶)؛ اما از سویی دیگر در کنار مزایای استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی نگرانی‌هایی همچون حضور احتمالی میکروارگانیسم‌ها، فلزات سنگین بالقوه سمی و میکروپلاستیک‌ها در فاضلاب به‌عنوان یک خطر بالقوه برای سلامتی انسان و دام وجود دارد (سانتس[۱۱]، ۲۰۲۰؛ و لانگاس[۱۲]، ۲۰۲۰). در این میان، فلزات سنگین که به دلیل ماندگاری و سمی بودن شناخته می‌شوند، می‌توانند در اندام‌های مختلف محصولات

---

[1] Santos et al
[2] Ritchie and Roser
[3] Abbasi and Sepaskhah
[4] US EPA
[5] Kristensen et al
[6] Goyal
[7] Ensink et al
[8] Kiziloglu et al
[9] European Comission
[10] Piotrowska et al
[11] Santos
[12] Langaas

کشاورزی آبیاری شده با پساب خانگی انباشته شوند و خطراتی جدی برای سلامت انسان و محیطزیست به وجود آورند (حسن و همکاران[1]، ۲۰۱۵). لذا، برای مدیریت صحیح آبیاری محصولات کشاورزی با پساب شهری به جهت حفظ سلامت انسان و محیطزیست بسیار حیاتی است که وضعیت تجمع و توزیع فلزات سنگین در بافت‌ها و اندام‌های مختلف گیاهی به‌ویژه قسمت خوراکی آن‌ها (چه برای انسان و چه دام) به‌صورت پژوهش‌های محلی برای هر گیاه سنجش و ارزیابی شود.

معمولاً فاضلاب آلوده به عناصر نادر و کمیابی همچون مس، روی، آهن، کادمیم، منگنز، بر، کبالت، آرسنیک و سرب است که تعداد زیادی از این عناصر برای رشد گیاه غیر ضرری هستند (موچووتی و همکاران[2]، ۲۰۰۶). فلزات سنگین در فاضلاب می‌تواند از منابع مختلفی ازجمله فاضلاب خانگی که حاوی مواد شوینده، بقایای ناشی از خوردگی سیستم‌های لوله‌کشی فرسوده و محصولات آرایشی و بهداشتی است، رواناب ناشی از نزولات جوی که در مسیر خود از منابع آلوده به فلزات سنگین مثل جاده‌ها، پشت‌بام‌ها و سایر سطوح غیرقابل نفوذ عبور نموده، تخلیه صنعتی پساب کارخانه‌ها و شهرک‌های صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی همچون استفاده از کودها و آفت‌کش‌ها که مقادیر قابل‌توجهی فلزات سنگین در ترکیبات خوددارند، هوازدگی سنگ‌ها و فعالیت‌های آتش‌فشانی منشأ بگیرد (آفتاب و همکاران[3]، ۲۰۲۳).

تلاش برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در فاضلاب شامل اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت پسماند، بهبود فرآیندهای صنعتی، تنظیم استفاده از محصولات خاص و به‌کارگیری فناوری‌های مؤثر تصفیه فاضلاب است. اقدامات نظارتی و مدیریتی نیز برای کنترل رهاسازی فلزات سنگین در منابع آبی ضروری است. به کار بردن طولانی‌مدت پساب تصفیه‌شده برای آبیاری می‌تواند منجر به جذب و تجمع مقادیر متناهی از فلزات سنگین در خاک و اندام‌های گیاهی شود که در صورت وارد شدن این فلزات به زنجیره غذایی انسان از طریق مصرف طولانی این محصولات کشاورزی ممکن است سلامت را تهدید نماید (قویش و همکاران[4]، ۲۰۱۲) زیرا که این آلاینده‌ها در بدن غیرقابل تجزیه هستند و تجمع آن‌ها در بدن باعث ایجاد بیماری خواهد شد (کریستو و همکاران[5]، ۲۰۱۴).

ورود فلزات سنگین به درون گیاه عمدتاً از طریق ریشه صورت می‌گیرد و این فلزات بسته به نوع فلز سنگین می‌توانند در آوندهای گیاهی حرکت کرده و به دیگر اندام‌های گیاه همچون اندام هوایی و بخش‌های خوراکی مثل میوه و دانه منتقل شوند (یونس و همکاران[6]، ۲۰۱۶). با بالا رفتن تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی احتمال کاهش جذب مواد مغذی ضروری در گیاه بالا می‌رود که درنهایت این مسئله می‌تواند منجر به کاهش کیفیت محصول شود (خان و همکاران[7]، ۲۰۱۶). بااین‌حال نرخ تجمع فلزات سنگین در گیاهان بستگی به نوع گیاه، واریته، غلظت این فلزات در آب آبیاری و خاک دارد.

در پژوهش حاضر تجمع فلزات سنگین همچون مس، آهن، روی، کادمیم و منگنز در اندام‌های مختلف گیاهی (ریشه، اندام هوایی و دانه) گیاه باقلا (که در منطقه موردبررسی به‌صورت وسیع کشت می‌شود) تحت آبیاری با تیمار پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با تیمار آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد (کنترل) در سه تکرار و قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی‌شده است که نتایج آن پس از مقایسه با استانداردهای بهداشتی و پژوهش‌های پیشین در مدیریت صحیح استفاده از پساب شهری برای آبیاری گیاه باقلا برای حفظ سلامتی انسان و دام بسیار حائز اهمیت است و می‌تواند خلأ موجود در پژوهش‌های پیشین را در این رابطه پر نماید.

---

[1] Hasan et al
[2] Muchuweti et al
[3] Aftab et al
[4] Ghosh et al
[5] Christou et al
[6] Younis et al
[7] Khan et al

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در مورداستفاده از آب بازیافتی برای آبیاری اراضی کشاورزی انجام‌شده است. در این مطالعات از پساب تصفیه‌شده برای بهبود رشد محصول و درعین‌حال حفظ خاک و کیفیت محصول نهایی استفاده کرده‌اند. طبق مطالعه انجام‌شده توسط بدبابیس و همکاران[1] (۲۰۱۵) استفاده از آب بازیافتی باعث افزایش PH و مقدار مواد آلی، مواد درشت مغذی، نمک‌ها و فلزات بالقوه سمی (Mn، Zn و Fe) در خاک می‌شود. بااین‌حال، مقدار فلزات سنگین منگنز، روی و آهن از استانداردهای مجاز ارائه‌شده توسط دولت تونس تجاوز نکرد. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل عناصر غذایی مقوی موجود در فاضلاب، زمان رسیدن میوه زیتون با افزایش شوری خاک سریع‌تر شد. مطالعه تجمع کروم، آهن، منگنز، مس، نیکل، روی، کبالت و سرب در سبزی‌های خوراکی همچون گوجه‌فرنگی، بادمجان، سیر و پیاز نشان داد که انباشت این فلزات در سبزی‌های آبیاری شده با فاضلاب به‌طور معنی‌داری بیش از تیمار آب چاه است که در بسیاری از موارد مقادیر این فلزات در گیاه بالاتر از مقادیر بیشینه مجاز ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی و فائو بود (رینولدز و همکاران[2]، ۲۰۰۹). فرمانی فرد و همکاران (۱۳۹۵) تجمع فلزات سنگین را در اندام‌های مختلف گیاهان ذرت، جو، بامیه و جعفری را که با استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری شهر کرمانشاه آبیاری می‌شدند بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر آبیاری با پساب بر تجمع فلزات سنگین آهن، روی و کادمیم در تمام‌اندام‌های محصولات موردبررسی به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد آبیاری با آب چاه بود بطوریکه غلظت برخی از فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی بالاتر از حدود مجاز استانداردهای توصیه‌شده قرار داشت. علاوه بر این تجمع فلزات سنگین در ریشه بیش از اندام‌های دیگر گزارش شد. خان و همکاران [3] (۲۰۲۳) اثرات آبیاری با منابع مختلف فاضلاب بر تجمع فلزات سنگین در نمونه‌های نارنگی پاکستانی و گریپ‌فروت و خطرات سلامتی ناشی از مصرف آن‌ها را بررسی کردند. در این مطالعه غلظت سرب، کروم، کادمیوم و نیکل در قسمت‌های خوراکی گریپ‌فروت و نارنگی آبیاری شده با آب فاضلاب، آب چاه و آب کانال اندازه‌گیری شد. غلظت تمام فلزات موردمطالعه در میوه نارنگی و گریپ‌فروت آبیاری شده با فاضلاب نسبت به نمونه‌های آبیاری شده با آب چاه و آب کانال بیشتر بودند. غلظت سرب در محدوده ۰/۰۲۳ تا ۰/۱۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم تعیین شد. محدوده کروم از ۰/۰۵۴ تا ۰/۷۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم متغیر بود. محدوده کادمیوم از ۰/۰۱۲ تا ۰/۱۳۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم متغیر بود. دامنه نیکل از ۰/۰۲۸ تا ۱/۴۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در نمونه‌های میوه هر دو رقم متغیر بود. ضریب غلظت زیستی، فاکتور غنی‌سازی، دریافت روزانه فلز و مقادیر شاخص خطر سلامتی برای همه فلزات در محدوده‌های مجاز بود که نشان‌دهنده عدم خطرات فوری سلامتی مرتبط با مصرف این میوه‌ها است. نتایج بررسی مقادیر انباشت فلزات سنگین در گیاهان علوفه‌ای آبیاری شده با فاضلاب در جنوب تهران نشان داد که مقدار فلزات سنگین تجمع یافته در بوتهٔ ذرت تحت تیمار آبیاری با فاضلاب ۱/۵ برابر بوتهٔ ذرت آبیاری شده با آب چاه است. به‌غیراز روی و منگنز انباشت سایر فلزات در بوته ذرت بیش‌ازحد استاندارد مجاز و در دانه و بلال ذرت مقادیر کروم، سرب، نیکل و روی کمتر از حد استاندارد مجاز و منگنز و کادمیم بیشتر از حد استاندارد مجاز گزارش شد (یارقلی، ۱۳۸۷).آنجِلوا و همکاران[4] (۲۰۰۴) و جیناداسا و همکاران[5] (۱۹۹۷)، در مطالعات خود برای مقایسه مقدار فلزات سنگین انباشت شده در گونه‌ها و واریته های مختلف گیاهی تحت شرایط مشابه زیست‌محیطی نتیجه گرفتند که توانایی گیاهان در جذب و تجمع فلزات سنگین متفاوت است و این تفاوت بین اندام‌های مختلف گیاهان نیز وجود دارد.

---

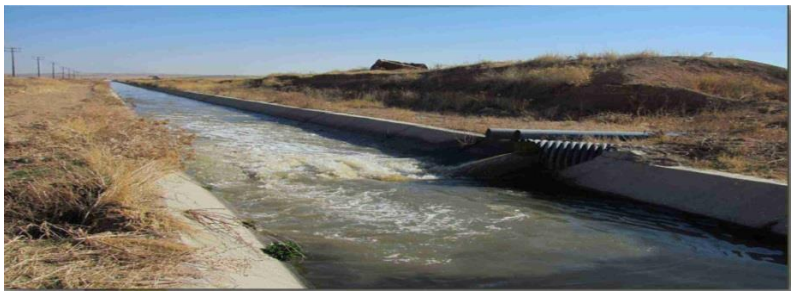
[1] Bedbabis et al
[2] Reynolds et al
[3] Khan et al
[4] Angelova et al
[5] Jinadasa et al

روش پژوهش

مشخصات منطقه موردپژوهش و تصفیه‌خانه فاضلاب شهری کرمانشاه

این پژوهش در شهر کرمانشاه با ارتفاع متوسط ۱۲۹۱ متر از سطح دریا که بر اساس تقسیم‌بندی آمبرژه اقلیم آن نیمه‌خشک – سرد است انجام شد. میانگین دما و بارش سالانه این شهر به ترتیب ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد و ۴۴۴ میلی‌متر است که بیشتر بارش‌ها بین ماه‌های آبان تا اردیبهشت رخ می‌دهد. تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر کرمانشاه در جنوب غربی شهر با مساحتی در حدود ۷۸ هکتار و مختصاتی به طول جغرافیایی ‘‘۲۷ ‘۱۸ °۳۴ و عرض جغرافیایی ‘‘۱۸ ‘۰۸ °۴۷ واقع‌شده است. این تصفیه‌خانه، فاضلاب جمعیتی برابر ۴۰۰ هزار نفر را جمع‌آوری می‌نماید به‌طوری‌که ظرفیت دبی روزانه آن ۶۰ هزار مترمکعب است. فرآیند تصفیه در این تصفیه‌خانه به روش لجن فعال از نوع متعارف است که شامل مراحل تصفیه‌های مقدماتی، اولیه و ثانویه و در پایان گندزدایی پساب است. دبی فاضلاب تصفیه‌شده این تصفیه‌خانه ۷۰۰ لیتر در ثانیه یا ۶۰ هزار مترمکعب در روز است. شکل (۱)، کانال جمع‌آوری و خروجی آب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه کرمانشاه را نشان می‌دهد.

در این پژوهش که در شرایط واقعی انجام شد اراضی تحت کشت باقلا چه در حالت آبیاری با پساب چه در حالت آبیاری با آب چاه (شاهد) هر یک مساحتی نزدیک به ۵ هکتار، در پایین‌دست تصفیه‌خانه واقع‌شده بود. دراین‌بین اراضی تحت آبیاری با پساب در یک‌سوی رودخانه قره‌سو واقع‌شده بود که به مدت‌زمانی نزدیک به ۱۰ سال همیشه با پساب خروجی تصفیه‌خانه به روش سنتی و سطحی آبیاری و اراضی شاهد (کنترل) که دقیقاً در آن‌سوی دیگر رودخانه قره‌سو و درست روبروی اراضی تحت آبیاری با پساب واقع گردیده نیز از سال‌های دور همیشه با آب چاه آبیاری شده بود. مشخصات فیزیکی خاک اراضی موردمطالعه در جدول (۱) و غلظت فلزات سنگین موجود در آب پساب و آب چاه و مقایسه آن‌ها با حدود استانداردهای معتبر در جدول (۲) ارائه‌شده است. استانداردهای جهانی ارائه‌شده در جدول (۲) مربوط به سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO)، سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) در رابطه باکیفیت مجاز پساب ازلحاظ غلظت فلزات سنگین برای آبیاری است. شکل (۲)، موقعیت تصفیه‌خانه و تیمارهای موردنظر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. کانال جمع‌آوری و خروجی آب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه کرمانشاه

شکل ۲. موقعیت تصفیه‌خانه و تیمارهای موردنظر

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک اراضی موردمطالعه

تیمار آبیاری	لایه خاک، cm	ρ_b, g cm^{-3}	Ks, mm h^{-1}	η , %	کلاس بافت خاک
پساب تصفیه‌شده	۰ – ۳۰	۱/٦٤	۳۸/۰۲	۳۵/۸۳	Sandy Loam
	۳۰ – ٦۰	۱/۵۸	۳٤/۱۸	۲۷/۱۱	Sandy Clay Loam
	٦۰ – ۹۰	۱/۷۲	۳٦/۰٦	۳۳/۱۹	Sandy Loam
آب چاه	۰ – ۳۰	۱/۷۰	۱۸/۱۹	۳۷/۰۰	Sandy Loam
	۳۰ – ٦۰	۱/۸۰	۲۷/۱٦	۲۹/۹۰	Sandy Loam
	٦۰ – ۹۰	۱/٦۹	۲۰/٦۰	۲۵/۷۳	Sandy Loam

جدول ۲. غلظت فلزات مختلف در تیمارهای آب بکار رفته برای آبیاری و مقایسه با حدود بالایی استانداردهای معتبر

عنصر	غلظت در آب (mg l^{-1})						
	قبل از اولین آبیاری		بعد از آخرین آبیاری		EPA[۳]	WHO[۲]	FAO[۱]
	پساب	چاه	پساب	چاه			
مس (Cu)	۰/۰۳	۰/۰	۰/۱۱	۰/۰	۰/۲	۰/۲	۰/۲
آهن (Fe)	۱۵/۷	۱/۳۲	۳٦/۲	۱/۰٦	۵	۵	۵
روی (Zn)	۱/۲۵	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۷	۱	۲	۲
کادمیم (Cd)	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱
منگنز (Mn)	۲/۱	۰/۰۰	۱۱/۱	۰/۰۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲

[۱] استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی (FAO).

[۲] استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO).

[۳] استاندارد ارائه‌شده توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA).

جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

در زمان رسیدن و برداشت محصول، تعدادی بوته کامل (ریشه، اندام هوایی و دانه) از قسمت‌های مختلف هر مزرعه (هر تیمار) به‌طور تصادفی و در سه تکرار انتخاب و برداشت شد. پس از جمع‌آوری نمونه‌های گیاهی و ریختن آن‌ها در کیسه‌های پلی‌اتیلن و انتقال آن‌ها به آزمایشگاه، اندام‌های مختلف هر گیاه با آب مقطر سه بار تقطیر شستشو داده شد تا از وجود آلاینده‌های احتمالی موجود در آب‌وخاکی که در تماس با گیاه بوده زدوده شوند. پس از فرایند شستشو فرایند خشک‌کردن نمونه‌ها گیاهی در مجاورت هوای آزاد انجام شد که پس‌ازآن قسمت‌های مختلف گیاه اعم از دانه، اندام هوایی و ریشه خرد و آسیاب شد و در پلاستیک‌های نایلونی کوچک برای اندازه‌گیری فلزات سنگین به آزمایشگاه منتقل شد (باتارسه و همکاران[۱]، ۲۰۱۱).

[1] Batarseh et al

هضم نمونه‌های گیاهی و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین

برای هضم نمونه‌های گیاهی مقدار ۲ گرم از هر نمونه آسیاب شده را داخل بالون ته گرد ریخته و سپس به آن به ترتیب ۴ میلی‌لیتر اسید پرکلریک غلیظ، ۲ میلی‌لیتر اسیدسولفوریک غلیظ و ۲۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ اضافه شد و سپس محلول را جوشانده تا حجم کل آن کم شود. در مرحله بعد به آن ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه کرده تا رسوبات حل شوند و مجدداً حرارت داده شد تا حجم کل کم گردد. سپس محلول با استفاده از کاغذ صافی شماره ۴۱ واتمن صاف شد و در ادامه حجم آن با آب مقطر به ۲۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد (باتارسه[1] و همکاران، ۲۰۱۱). در پایان برای سنجش غلظت هر فلز در هر نمونه از دستگاه جذب اتمی مدل Spectra AA 220 (ساخت کارخانه VARIAN کشور استرالیا) استفاده گردید.

تجزیه‌وتحلیل آماری

تجزیه‌وتحلیل آماری مربوط به مطالعه تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه باقلا در قالب یک طرح آماری کاملاً تصادفی (CRD) در سه تکرار با دو تیمار آبیاری با پساب تصفیه‌شده و آب چاه (به‌عنوان تیمار شاهد) انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزارهای آماریMiniTab 17.0، SAS 9.1 و MSTATC تحلیل و ارزیابی شدند. پس از انجام تست نرمال بودن داده‌ها آزمون مقایسه میانگین در سطوح احتمالی ۱ و ۵ درصد به روش دانکن انجام شد.

یافته‌ها

نتایج تحلیل آماری غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه باقلا

جدول ۳ خلاصه‌ای از جدول آنالیز واریانس (ANOVA) را برای تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری بر غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف گیاه باقلا (ریشه، اندام هوایی و دانه) به تصویر کشیده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اثر تیمار کیفیت آب آبیاری (پساب و آب چاه) بر روی غلظت فلزات سنگین در گیاه باقلا در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بوده است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مختلف این گیاه به‌صورت معنی‌داری ($p=0.01$) با یکدیگر متفاوت بوده است. علاوه بر این، اثر متقابل این دو عامل (تیمار کیفیت آب و اندام گیاهی) بر غلظت فلزات سنگین معنی‌دار شد.

[1] Batarseh

جدول ۳. خلاصه جدول آنالیز واریانس (ANOVA) برای غلظت فلزات سنگین در اندام مختلف باقلا تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار	درجه آزادی	میانگین مربعات اصلاح‌شده (Adj. MS)				
		مس	آهن	روی	کادمیوم	منگنز
آب	۱	٤۰۳٥**	٥٦۱۹٤۱**	۱۰۳۰٤**	۰/۲۹۹**	۲٥٥۷٤**
خطا	٤	۲۲/۳۸	٥٤٥٤	٦۰/۳۸	۰/۰۰٥	۱۸/٤۰
اندام گیاهی	۲	۲٤٦۰**	۳٤۸۷٦۳**	۱٥۲۰**	۰/۷۱۸**	٦۱۲۷**
آب* اندام گیاهی	۲	۳۲۱/۳**	۱٦۹٤۳۹**	۱۲۸/۲**	۰/۰۱۸**	۳۲٥۷**
خطا	۸	۸/٥۲۱	۱٥۷٦	۱۳/۸٤	۰/۰۰۱	۷۱/۹۱
ضریب تغییرات (٪)	–	۹/۹۸	۱٤/۲۷	۸/٦۷	۸/۳٥	۱٦/۰۰

** نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ازنظر آماری در سطح یک درصد به روش دانکن است.

جدول (۴) مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین مختلف را در اندام‌های مختلف گیاه باقلا را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌های به‌دست‌آمده برای این گیاه، غلظت هر یک از فلزات سنگین (مس، آهن، روی، کادمیوم و منگنز) در تمام‌اندام‌های گیاه باقلای تحت تیمار آبیاری پساب به‌صورت معنی‌داری ($p=0.01$) بیشتر از غلظت همان فلز در تیمار آب چاه بوده است. با توجه به جدول (۴) مشاهده می‌شود که در هر دو تیمار آبیاری (پساب و آب چاه) بیشترین غلظت فلزات سنگین آهن و کادمیوم (۸۹۸ و ۰/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای آهن و کادمیوم در پساب و ۱۷۴ و ۰/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم برای تیمار آب چاه) در ریشه گیاه باقلا اتفاق افتاده است به‌طوری‌که غلظت این دو فلز در ریشه گیاه باقلای آبیاری شده با پساب بسیار بیشتر از حدود استانداردهای موجود (جدول (۵)) است. با توجه به نتایج (جدول (۴)) می‌توان مشاهده نمود که غلظت کادمیوم و روی در دانه بالاتر از استاندارد (جدول (۵)) است (۰/۴۶ و ۸۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای کادمیوم و روی).

بیشترین مقدار غلظت مس و منگنز در هر دو تیمار آبیاری در قسمت هوایی باقلا مشاهده شد (۷۲ و ۱۳۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای مس و منگنز در پساب و ۲۹ و ۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای مس و منگنز در تیمار آب چاه) و کمترین مقدار منگنز در هر دو تیمار آبیاری دردانه باقلا (۲۹ و ۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم به ترتیب برای تیمارهای پساب و آب چاه) و کمترین غلظت فلز مس برای تیمارهای پساب و آب چاه به ترتیب ۲۲ و ۳/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در ریشه باقلا به‌دست‌آمده است.

جدول ٤. مقایسه میانگین‌های غلظت فلزات سنگین در اندام‌های مورد مطالعه گیاه باقلا تحت تاثیر تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	اندام گیاهی	مس ($mg\ kg^{-1}$)	آهن ($mg\ kg^{-1}$)	روی ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	منگنز ($mg\ kg^{-1}$)
پساب	ریشه	۲۲/۳۳$^{c+}$	۸۹۸/۱^{a}	٦٥/۸۸^{b}	۰/۹۳^{a}	۱۰۷/۲^{b}
	اندام هوایی	۷۲/۱۷^{a}	۳۷٤/۱^{b}	٤٦/۹۱^{c}	۰/۲۰^{d}	۱۳۵/۷^{a}
	دانه	۳۵/۱۳^{b}	۹۲/۵۳^{de}	۸۷/۷۷^{a}	۰/٤٦^{c}	۲۹/۲۰^{c}
آب چاه	ریشه	۳/٦۰^{d}	۱۷٤/۲^{c}	۲۰/۳۳^{d}	۰/٦٥^{b}	۱۳/٦۰^{cd}
	اندام هوایی	۲۸/٦۷^{bc}	۱۰۵/۹^{cd}	٦/۹۳۳^{e}	۰/۰٦^{e}	۲۵/۵۳^{c}
	دانه	۱۰/۵۳^{d}	۲٤/٤۷^{e}	۲۹/۷۳^{d}	۰/۱۰^{e}	٦/۷۷^{d}

+ در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حداقل یک حرف مشترک باشند با هم اختلاف معنی‌داری ندارند ($P < ۰/۰۵$).

بررسی تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی در مقایسه با استانداردهای موجود

هدف از این قسمت از پژوهش مقایسه غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاه باقلا با استانداردها و دستورالعمل‌های موجود است. با انجام این کار می‌توان خطرات بالقوه مرتبط با سطوح بالای غلظت فلزات سنگین در گیاه باقلا را بهتر درک نموده و پایه‌ای را برای توسعه استراتژی‌های کاهش خطر سمیت این فلزات ایجاد کرد؛ زیرا که نظارت و درک انباشت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی برای ارزیابی بهداشت محیط و اطمینان از ایمنی مواد غذایی بسیار مهم است. برای ارزیابی خطرات احتمالی تجمع فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی، سازمان‌های مختلف ملی و بین‌المللی استانداردها و دستورالعمل‌هایی را ایجاد کرده‌اند. این استانداردها معمولاً باهدف حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست، محدودیت‌های مجاز را برای غلظت فلزات سنگین خاص در محیط‌های مختلف ازجمله خاک، آب و گیاه تعیین می‌کنند. با مقایسه غلظت فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی با این استانداردها پژوهشگران و سیاست‌گذاران می‌توانند خطرات احتمالی را ارزیابی نموده و اقدامات مناسب را برای کاهش اثرات نامطلوب انجام دهند. در این پژوهش غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در هر یک از اندام‌های گیاه باقلا با استانداردهای مندرج در جدول ۵ مورد مقایسه قرارگرفته است.

جدول ۵. حدود بالایی استانداردهای مجاز برای هر فلز در بافت‌های گیاهی

استاندارد	مس ($mg\ kg^{-1}$)	آهن ($mg\ kg^{-1}$)	روی ($mg\ kg^{-1}$)	کادمیم ($mg\ kg^{-1}$)	منگنز ($mg\ kg^{-1}$)
FAO/WHO (2007)	٤۰	٤۵۰	٦۰ – ۱۰۰	۰/۲	۵۰۰
FAO/WHO (2001)	۷۳	NL	۱۰۰	۰/۱	NL
EU (2006)	٤۰	٤۲۵	٦۰	۰/۰۵ – ۰/۲	NL
SEPA (2005)	۲۰	NL	۱۰۰	۰/۲	NL

FAO/WHO کمیته مشترک سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد و سازمان بهداشت جهانی.

EU مجله رسمی اتحادیه اروپا.

SEPA اداره حفاظت از محیط‌زیست ایالتی چین.

NL محدودیتی ندارد (Not limited).

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر (جدول (۴)) با حدود مجاز در استانداردهای ارائه‌شده (جدول (۵)) نشان می‌دهد که سطوح غلظت مس در اندام‌های مختلف باقلا پایین‌تر از مقادیر حداکثر پیشنهادی FAO/WHO بوده و تنها مقدار تجمع این فلز در اندام هوایی باقلا بالاتر از استاندارد SEPA و EU است.

برای آهن به‌استثنای مقادیر بالای آن برای گیاهان سمیتی گزارش نشده است. تنها FAO/WHO و EU به ترتیب حدود پیشنهادی ۴۵۰ و ۴۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم را برای غلظت آهن در اندام‌های گیاهی ارائه کرده‌اند و استانداردهای دیگر حدومرزی برای این فلز ارائه ننموده‌اند (جدول (۵)). ولی اگر قرار باشد که گیاه به مصرف تغذیه دام برسد غلظت آستانه سمیت این فلز در گیاه ۱۰۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم پیشنهادشده است (آلووی[1]، ۱۹۹۵). در پژوهش حاضر مقایسه میزان غلظت آهن اندازه‌گیری شده در گیاه باقلا نشان می‌دهد که مقدار تجمع این فلز در ریشه باقلای آبیاری شده با پساب تصفیه‌شده بالاتر از حد مجاز استانداردها است؛ اما با توجه به پایین بودن مقدار آن در دانه (۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) این گیاه که در جیره غذایی انسان نقش دارد نگرانی خاصی وجود ندارد.

در تیمار آبیاری با پساب تصفیه‌شده مقدار تجمع روی در گیاه باقلا پایین‌تر از حدود پیشنهادی استانداردهای SEPA و FAO/WHO به دست آمد؛ اما غلظت این عنصر در ریشه و دانه گیاه باقلای تحت تیمار آبیاری با پساب بالاتر از حداکثر مجاز استاندارد EU است. این در حالی است که در خاک‌های ایران با کمبود روی مواجه هستیم (هاشمی نصب و همکاران[2]، ۲۰۲۳) و شاید این موضوع زیاد نگران‌کننده نباشد.

در مورد منگنز نیز نتایج نشان‌دهنده شرایط مناسبی از غلظت این فلز در اندام‌های گیاه باقلا است بطوریکه مقدار غلظت منگنز در این گیاه بسیار کمتر از حد پیشنهادی توسط استانداردFAO/WHO (۲۰۰۷) است. اگرچه شاید مهم‌ترین دلیل برای عدم تعیین حدود مجاز برای غلظت فلز منگنز در گیاهان زراعی کم‌خطر بودن این فلز در صورت تجمع در بافت‌های گیاهی باشد.

در پژوهش حاضر مهمترین عنصر در میان پنج فلز سنگین موردمطالعه قرارگرفته کادمیوم است. بالا بودن غلظت این عنصر در آب آبیاری، خاک و درنتیجه جذب و تجمع آن در اندام‌های گیاهی نگران‌کننده است. به‌طورکلی در بین فلزات سنگین تعدادی از آن‌ها همچون مس، روی در غلظت‌های مناسب و مجاز ازنظر استانداردها برای بیشتر سیستم‌های بیولوژیکی همچون انسان لازم و ضروری هستند (آدریانو[3]، ۲۰۰۱) درحالی‌که تعدادی از فلزات

[1] Alloway
[2] Hasheminasab et al
[3] Adriano

سنگین همچون کادمیم، آرسنیک و سرب برای انسان‌ها، حیوانات و گیاهان بسیار خطرناک و سمی هستند (کاباتاپندیاس و پندیاس[1]، ۲۰۰۱ و لین و همکاران[2]، ۲۰۰۴). نتایج اندازه‌گیری غلظت کادمیوم انباشت شده در اندام‌های مختلف باقلا نشان می‌دهد که میزان تجمع کادمیوم در تمام‌اندام‌های تیمار آبیاری شده با پساب تصفیه‌شده و حتی در ریشه باقلا در تیمار آب چاه بیشتر از حدود مجاز در استانداردهای پیشنهادشده است. بطوریکه؛ غلظت بسیار بالای این فلز در ریشه و دانه باقلا (به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم) نگران‌کننده و خطرناک است زیرا که کادمیوم به‌عنوان یک عامل سرطان‌زا در سلامت انسان شناخته‌شده است (واکس[3]، ۲۰۰۳ و تورکدوغان و همکاران[4]، ۲۰۰۳) و به نظر می‌رسد عاملی اثرگذار در ایجاد بیماری‌های قلبی و عروقی و فشارخون نیز باشد (ادموندز و سمدلی[5]، ۱۹۹۶).

میزان کادمیوم جذب‌شده توسط گیاه به مقدار کل کادمیوم موجود در خاک و قابلیت جذب این فلز در خاک و گیاه بستگی دارد. دیویس و کارلتون اسمیت[6] (۱۹۸۰) نشان دادند که کرفس، کاهو، اسفناج و کلم تمایل زیادی به جذب و تجمع کادمیوم در اندام‌های خوددارند در صورتیکه ذرت، سیب‌زمینی، لوبیا و نخود فقط مقدار کمی کادمیوم در خود انباشت می‌کنند.

بحث

از یک‌سو با کاهش منابع آب تجدیدشونده در مناطق خشک و نیمه¬خشک دنیا که کشور ایران از آن مستثنا نیست و از سویی دیگر افزایش حجم تقاضا برای دستیابی به آب باکیفیت سبب شده است که منابع آب باکیفیت بهتر برای مصارف شهری و شرب حفاظت‌شده و منابع آب باکیفیت پایین‌تر (مثل فاضلاب تصفیه‌شده) برای مصارفی مانند کشاورزی، صنعت و فضای سبز بکار گرفته شوند؛ اما در صورت استفاده از پساب تصفیه‌شده برای آبیاری اراضی کشاورزی همچنان وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات زراعی و باغی آبیاری شده با پساب همچنان نامشخص و در هاله‌ای از ابهام قرار داشته و به دلیل خطر ورود این فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی دائماً مقادیر این فلزات در پساب، خاک و اندام‌های مختلف گیاهی رصد و پایش شود. این پژوهش باهدف بررسی اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد بر تجمع فلزات سنگین در ریشه، اندام هوایی و دانه گیاه باقلا انجام شد. لذا برای انجام این پژوهش غلظت فلزات سنگین (مس، آهن، روی، کادمیوم و منگنز) در اندام‌های مختلف گیاه باقلا که در اراضی کشت‌شده زیردست تصفیه‌خانه فاضلاب شهر کرمانشاه قرار داشت و توسط پساب تصفیه‌شده این تصفیه‌خانه آبیاری می‌شد اندازه‌گیری و با غلظت فلزات سنگین تجمع یافته در اندام‌های مختلف گیاه باقلا که با آب چاه آبیاری شده بود و در همان منطقه و در زیردست تصفیه‌خانه مذکور قرار داشت مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، غلظت اندازه‌گیری شده تمام فلزات سنگین در اندام¬های گیاه باقلا تحت تیمار پساب به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمارهای آب چاه بود که این نتیجه دور از ذهن نبوده زیرا که غلظت این فلزات در پساب استفاده‌شده برای آبیاری بسیار بیشتر از غلظت این فلزات در آب چاه استفاده‌شده برای آبیاری بود (جدول (۲)). همچنین بالاتر بودن غلظت فلزات سنگین در تیمار پساب می‌تواند به دلیل اثر تجمعی آبیاری‌های مکرر با پساب در بالابردن تجمعی غلظت این فلزات در خاک یا به علت مصرف بیش‌ازاندازه کودهای شیمیایی ازته و فسفاته که عموماً حاوی این نوع فلزات سنگین هستند (تانگ و همکاران[7]، ۲۰۲۲) باشد که نهایتاً سبب بالا رفتن و تجمع تدریجی این فلزات در محلول خاک و درنتیجه در دسترس قرار گرفتن این فلزات برای جذب شدن توسط ریشه گیاه و درنهایت تجمع آن‌ها در اندام‌های گیاهی باشد. لذا درصورتی‌که غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهی از حدود مجاز استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان‌ها و اورگان‌های مربوطه تجاوز نماید، در صورت تکرر مصرف این اندام‌های گیاهی توسط انسان می‌تواند برای سلامتی خطرساز شود. نتایج این قسمت با نتایج پژوهش‌های فرمانی‌فر و همکاران (۱۳۹۵) بر روی ذرت، جو، بامیه و جعفری

---

[1] Kabata-Pendias and Pendias
[2] Lin et al
[3] Waalkes
[4] Türkdoğan et al
[5] Edmunds and Smedley
[6] Daivis and Carlton-Smith
[7] Tang

و نتایج خان و همکاران [1] (۲۰۲۳) بر روی نارنگی پاکستانی و گریپ‌فروت هم‌راستا بود که در هر دو پژوهش مذکور غلظت فلزات سنگین در تیمارهای آبیاری با پساب تصفیه‌شده بیشتر از تیمارهای آب چاه گزارش‌شده است.

علاوه بر این در هر دو تیمار آبیاری (پساب و آب چاه) بیشترین غلظت فلزات سنگین آهن و کادمیوم در ریشه گیاه باقلا اتفاق افتاده است به‌طوری‌که غلظت این دو فلز در ریشه گیاه باقلای آبیاری شده با پساب بسیار بیشتر از حدود استانداردهای موجود (جدول (۵)) است. ولی ازآنجاکه ریشه به مصرف تغذیه انسان نمی‌رسد در یک نگاه ساده‌انگارانه اولیه شاید چنین به نظر برسد که بالا بودن فلزات کادمیوم و آهن در ریشه در کوتاه‌مدت نمی‌تواند ازنظر مصرف تغذیه‌ای برای انسان مشکل‌ساز باشد ولی در طولانی‌مدت در اثر آبیاری‌های متوالی با پساب ممکن است این فلزات به سمت اندام‌های هوایی و دانه انتقال پیداکرده و در آن‌ها انباشت شود که در صورت تکرر مصرف اندام‌های خوراکی گیاه باقلا برای انسان خطرساز خواهد شد.

علاوه بر این غلظت کادمیوم و روی دردانه نیز بالاتر از استانداردهای توصیه‌شده بود و ازآنجاکه دانه باقلامستقیما به مصرف تغذیه انسان می‌رسد لزوماً باید تمهیداتی برای کاهش این دو فلز در پساب فاضلاب تصفیه‌شده شهری اندیشید؛ زیرا که در صورت تکرار آبیاری با این پساب در طولانی‌مدت احتمال افزایش و انتقال بیشتر این فلزات به اندام خوراکی دانه این گیاه و ایجاد خطرات جدی برای سلامت انسان در صورت مصرف آن افزایش می‌یابد. تلاش برای کاهش آلودگی فلزات سنگین در فاضلاب شامل اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت پسماند، بهبود فرآیندهای صنعتی، تنظیم استفاده از محصولات خاص و به‌کارگیری فناوری‌های مؤثر تصفیه فاضلاب است. همچنین اقدامات نظارتی و مدیریتی نیز برای کنترل رهاسازی فلزات سنگین در منابع آبی ضروری است.

بیشترین مقدار غلظت منگنز در هر دو تیمار آبیاری در قسمت هوایی باقلا مشاهده شد ولی مقدار آن بسیار کمتر از استانداردهای موجود است. لذا تجمع این فلز در درون بافت ها و اندام‌های گیاهی باقلا هیچ‌گونه تهدیدی را برای سلامتی انسان ایجاد نمی‌کند.

بیشترین مقدار غلظت مس نیز در هر دو تیمار آبیاری در قسمت هوایی باقلا مشاهده شد که مقدار آن در تیمار پساب بیشتر از برخی حدود ذکرشده استانداردهای موجود است. هرچند اندام هوایی گیاه باقلا به‌صورت مستقیم به مصرف انسان نمی‌رسد ولی درصورتی‌که از اندام هوایی این گیاه در طولانی‌مدت برای تغذیه دام مصرف شود می‌تواند وارد چرخه غذایی انسان شده و سلامت او را به خطر اندازد. در این مقوله گزارش‌شده است که اولین منبع برای ورود فلزات سنگین به درون بافت گیاهان خاک اطراف ریشه است و هر چه غلظت این فلزات در محیط خاک بیشتر باشد برای گیاه نیز بیشتر در دسترس بوده و احتمال جذب شدن توسط ریشه گیاه بالاتر می‌رود (دی پائولو و رینالدی[2]، ۲۰۰۸).

در تیمار آبیاری با پساب، غلظت کادمیوم در تمام‌اندام‌های گیاه باقلا بالاتر از حدود استانداردهای موجود است. لذا استفاده مکرر از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری شهر کرمانشاه برای آبیاری اراضی کشت باقلا منجر به تجمع بیش‌ازحد نرمال این فلز سنگین در اندام‌های گیاه باقلا می‌شود که به جد سلامت انسان را به خطر انداخته و می‌بایستی برای این مسئله تمهیدات و راه‌حل‌هایی مناسب همچون تصفیه‌های تکمیلی برای زدودن و یا جلوگیری از ورود این عنصر به درون پساب خروجی از تصفیه‌خانه و همچنین مدیریت مصرف کودهای شیمیایی ازته و فسفاته از سوی کشاورزان برگزید.

ازنظر مقدار غلظت مجاز آهن در گیاه بر طبق تمام استانداردهای سلامت موجود، به‌غیراز ریشه (اندام غیرخوراکی) در بقیه اندام‌های گیاه باقلا غلظت آهن انباشت شده در محدوده مجاز قرار داشت که نتیجه با نتایج فرمانی‌فرد و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت داشت. این پژوهشگران نیز بیشترین میزان غلظت آهن را برای ذرت، جو، بامیه و جعفری در اندام ریشه این گیاهان گزارش نمودند.

غلظت روی نیز در اندام‌های مختلف باقلا عموماً پایین‌تر از حدود مجاز بود؛ که ازنظر سلامت برای انسان مشکلی ایجاد نخواهد کرد. ضمناً باید خاطرنشان کرد که افزایش غلظت یک فلز در گیاه باقلا نشان‌دهنده تحرک بالای آن فلز در خاک و تمایل بالای گیاه به جذب آن عنصر است. آلن و همکاران[3] (۱۹۹۵) نشان دادند که نوع گونه گیاهی و مدت‌زمان قرارگیری گیاه در معرض فلزات سنگین بر غلظت آلاینده¬ها در گیاه اثرگذار بوده و درنتیجه بر شاخص انتقال گیاهی این عناصر اثر می‌گذارد.

---

[1] Khan et al
[2] Di Paolo & Rinaldi
[3] Allen et al

در این بررسی‌ها و تحلیل‌ها باید این نکته را در نظر داشت که فلزات سنگین می‌توانند از یک منبع به محیطی دیگر منتقل و در محصولات کشاورزی تجمع یابند. لذا حتی اگر غلظت این فلزات در محصول مصرفی زیر حداکثر محدوده مجاز استانداردها باشد، برآورد کلی از دریافت روزانه این فلزات از کل منابع غذایی مصرفی لازم و ضروری است (اسماعیلی و همکاران[1]، ۲۰۱۴).

نتیجه‌گیری

ایران مانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به دلیل افزایش جمعیت، خشک‌سالی‌های پیاپی و بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب شیرین با چالش کاهش و کمبود منابع آب شیرین برای آبیاری محصولات کشاورزی مواجه شده است. یکی از راهکارها برای مقابله با چالش کمبود و کاهش منابع آب شیرین می‌تواند بهره‌برداری مؤثر از منابع آب نامتعارف همچون فاضلاب تصفیه‌شده شهری برای آبیاری گیاهان زراعی، باغات و فضای سبز باشد.

اما وضعیت تجمع فلزات سنگین در اندام‌های مختلف محصولات زراعی آبیاری شده با پساب همچنان نامشخص است و به دلیل خطر ورود این فلزات به چرخه غذایی انسان بایستی دائماً مقدار غلظت آلاینده‌ها در پساب تصفیه‌شده و اندام‌های گیاهی اندازه‌گیری، رصد و پایش شود. درک انباشت فلزات سنگین در بافت های گیاهی برای رسیدگی به نگرانی‌های زیست‌محیطی و ایمنی مواد غذایی حیاتی است. با مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای موجود، می‌توان خطرات بالقوه را شناسایی کرده و استراتژی‌هایی برای به حداقل رساندن تأثیر آلودگی فلزات سنگین ایجاد نمود. این پژوهش برای حفظ سلامت اکوسیستم و رفاه انسان در مواجهه با افزایش تقاضا برای استفاده از آب‌های نامتعارف در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل خشک‌سالی‌های پیاپی و بحران منابع آب بسیار مهم و ضروری است. لذا در این مطالعه اثرات آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری تصفیه‌خانه شهر کرمانشاه در مقایسه با آب چاه به‌عنوان تیمار شاهد (کنترل) بر تجمع فلزات سنگین در ریشه، اندام هوایی و دانه گیاه باقلا بررسی شد. نتایج نشان داد که تجمع تمام فلزات سنگین در اندام‌های گیاه باقلا تحت تیمار آبیاری با پساب تصفیه‌شده به‌صورت معنی‌داری بیشتر از تیمار آبیاری با آب چاه بود که حتی غلظت آهن و کادمیوم در ریشه (اندام غیر خوراکی) گیاه باقلا بالاتر از استانداردهای توصیه‌شده برای سلامت تغذیه‌ای محصولات کشاورزی قرار داشت. غلظت مس و منگنز در اندام‌های مختلف باقلا پایین‌تر از حدود مجاز بود. همچنین غلظت کادمیوم و روی دردانه بالاتر از استاندارد بود که در صورت مصرف مکرر توسط انسان برای سلامتی خطرساز خواهد شد و لزوماً باید تمهیداتی برای کاهش این دو فلز در پساب اندیشید.

در این بررسی و تحلیل‌ها باید این نکته را در نظر داشت که فلزات سنگین می‌توانند از یک منبع به محیطی دیگر منتقل و در محصولات کشاورزی تجمع یابند. لذا حتی اگر غلظت این فلزات در محصول مصرفی زیر حداکثر محدوده مجاز استانداردها باشد، برآورد کلی از دریافت روزانه این فلزات از کل منابع غذایی مصرفی لازم و ضروری است.

درک انباشت فلزات سنگین در بافت های گیاهی برای رسیدگی به نگرانی‌های زیست‌محیطی و ایمنی مواد غذایی حیاتی است. با مقایسه غلظت فلزات سنگین با استانداردهای موجود، می‌توان خطرات بالقوه را شناسایی کرده و استراتژی‌هایی برای به حداقل رساندن تأثیر آلودگی فلزات سنگین ایجاد نمود. این پژوهش برای حفظ سلامت اکوسیستم و رفاه انسان در مواجهه با افزایش تقاضا برای استفاده از آب‌های نامتعارف در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل خشک‌سالی‌های پیاپی و بحران منابع آب بسیار مهم و ضروری است. تلاش برای کاهش آلودگی فلزات سنگین کادمیوم و روی در خروجی فاضلاب تصفیه‌شده که در این پژوهش برای سلامت انسان خطرساز تشخیص داده شد، شامل تصفیه اختصاصی و تکمیلی این دو فلز از فاضلاب خروجی، اجرای شیوه‌های مناسب مدیریت پسماند، بهبود فرآیندهای صنعتی، تنظیم استفاده از محصولات خاص و به‌کارگیری فناوری‌های مؤثر تصفیه فاضلاب است. اقدامات نظارتی و مدیریتی نیز برای کنترل رهاسازی فلزات سنگین در منابع آبی ضروری است.

تقدیر و تشکر

از گروه مهندسی آب دانشگاه رازی برای فراهم نمودن امکانات و شرایط لازم برای انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌گردد.

[1]Esmaeili et al

منابع

فرمانی فرد، میلاد.، قمرنیا، هوشنگ.، پیرصاحب، مقداد.، و فتاحی، نظیر. (۱۳۹۵). مطالعه تجمع فلزات سنگین در محصولات مختلف تحت تاثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده شهری کرمانشاه. مدیریت آب و آبیاری، ۶(۲)، ۳۶۵-۳۴۷. https://sid.ir/paper/240087/fa

یارقلی، بهمن. (۱۳۸۷). بررسی میزان جذب کادمیم از محیط ریشه و میزان تجمع آن در اندام محصولات زراعی. رساله دکتری، دانشگاه تهران، ایران.

References

Abbasi, M. R., & Sepaskhah, A. R. (2022). Evaluation of saffron yield affected by intercropping with winter wheat, soil fertilizers and irrigation regimes in a semi-arid region. International Journal of Plant Production, 16(3), 511-529. https://doi.org/10.1007/s42106-022-00194-4

Adriano, D.C. (2001). Bioavailability of Trace Metals. Trace Elements in Terrestrial Environments. 61-89. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21510-5_3

Aftab, K., Iqbal, S., Khan, M. R., Busquets, R., Noreen, R., Ahmad, N., & Ouladsmane, M. (2023). Wastewater-irrigated vegetables are a significant source of heavy metal contaminants: toxicity and health risks. Molecules, 28(3), 1371. https://doi.org/10.3390/molecules28031371

Allen, H.E., Huang, C.P., Bailey, G.W., & Bowers, A.R. (1995). Metal Speciation and Contamination of Soil. Lewis Publishers, USA. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=7uGkJ5APOrkC&oi=fnd&pg=IA7&dq=Allen,+H.E.,+Huang,+C.P.,+Bailey,+G.W.+and+Bowers,+A.R.+(1995).+Metal+Speciation+and+Contamination+of+Soil.+Lewis+Publishers,+USA.&ots=LY2STEdLZF&sig=o_XbgV7flWHE4YvD9S1S8qBmEKk#v=onepage&q=doi&f=false

Alloway, B. J. (1995). Heavy metals in soils. Blackie Academic and Professional. An Imprint of Chapman & Hall, Glasgow. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1984896

Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). Ind. Crops. Prod, 19(3), 197–205. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.001

Batarseh, M. I., Rawajfeh, A., Ioannis, K. K., & Prodromos, K. H. (2011). Treated municipal wastewater irrigation impact on olive trees (Olea Europaea L.) at Al-Tafilah, Jordan. Water, Air, & Soil Pollution, 217, 185-196. https://www.academia.edu/6357678/Treated_Municipal_Wastewater_Irrigation_Impact_on_Olive_Trees_Olea_Europaea_L_at_Al_Tafilah_Jordan

Bedbabis, S., Trigui, D., Ahmed, C. B., Clodoveo, M. L., Camposeo, S., Vivaldi, G. A., & Rouina, B. B. quality. Agricultural Water Management, 160, 14-21. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.023

Christou, A., Maratheftis, G., Eliadou, E., Michael, C., Hapeshi, E., & Fatta-Kassinos, D. (2014). Impact assessment of the reuse of two discrete treated wastewaters for the irrigation of tomato crop on the soil geochemical properties, fruit safety and crop productivity. Agriculture, ecosystems & environment, 192, 105-114. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.007

Di Paolo, E., & Rinaldi, M. (2008). Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. Field Crops Research, 105(3), 202-210. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.004

Edmunds, W.M., & Smedley, P.L. (1996). Environmental Geochemistry and Health. London: Geological Society, 113, 91-105. https://people.wou.edu/~taylors/es420_med_geo/med_geo/edmunds_smedley_1996.pdf

Ensink, J. H., Van Der Hoek, W., Matsuno, Y., Munir, S., & Aslam, M. R. (2002). Use of untreated wastewater in peri-urban agriculture in Pakistan: Risks and opportunities. IWMI, 64. https://www.iwmi.cgiar.org/Publications/IWMI_Research_Reports/PDF/pub064/Report64.pdf

Esmaeili, A., Moore, F., Keshavarzi, B., Jaafarzadeh, N., & Kermani, M. (2014). A geochemical survey of heavy metals in agricultural and background soils of the Isfahan industrial zone, Iran. Catena, 121, 88-98. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.003

EU, (2006). Commission regulation (EC) No. 1881/2006, setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Official Journal of the European Union, 364, 5-24. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1115775

European Comission. (2020). Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on Minimum Requirements for Water Reuse. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741

FAO/WHO, (2001). Codex Alimentarius Commission, Food additives and contaminants. Geneva: Joint FAO/WHO Food Standards Program. https://www.fao.org/input/download/report/27/Al0112Ae.pdf

FAO/WHO, (2007). Joint FAO/WHO, Food Standard Programme Codex Alimentarius Commission, 13th Session. Report of the Thirty Eight Session of the Codex Committee on Food Hygiene. Houston, TX, USA. https://www.fao.org/input/download/report/116/al03_13e.pdf

Farmanifard, M., Ghamarnia, H., Pir-saheb, M., & Fattahi, N. (2015). Study of the accumulation of heavy metals in different crops under the influence of irrigation with Kermanshah municipal reclaimed wastewater. Journal of Water and irrigation management, 6(2), 347-365. https://sid.ir/paper/240087/fa [In Persian]

Ghosh, A. K., Bhatt, M. A., & Agrawal, H. P. (2012). Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. Environmental monitoring and assessment, 184, 1025-1036. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2018-6

Goyal, M. R. (Ed.). (2016). Wastewater management for irrigation: principles and practices. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b18967

Hasan, H., Battikhi, A., & Qrunfleh, M. (2015). Impacts of treated wastewater reuse on some soil properties and production of Gladiolus communis. Jordan Journal of Agricultural Sciences, 11(4). https://archives.ju.edu.jo/index.php/jjas/article/view/11040

Hasheminasab, K. S., Shahbazi, K., Marzi, M., Zare, A., Yeganeh, M., Bazargan, K., & Kharazmi, R. (2023). A study on wheat grain zinc, iron, copper, and manganese concentrations and their relationship with grain yield in major wheat production areas of Iran. Journal of Agriculture and Food Research, 100913. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100913

Jinadasa, K.B.P.N., Milham, P.J., Hawkins, C.A., Cornish, P.S., Williams, P.A. & Kaldor, C.J. (1997). Survey of cadmium levels in vegetables and soils of Greater Sydney, Australia. J. Environ. Qual, 26(4), 924–933. https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600040002x

Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Trace elements in soils and plants. 3rd ed., CRC Press, Boca Raton, FL. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1544363

Khan, A., Khan, S., Alam, M., Khan, M. A., Aamir, M., Qamar, Z., & Perveen, S. (2016). Toxic metal interactions affect the bioaccumulation and dietary intake of macro-and micro-nutrients. Chemosphere, 146, 121-128. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.014

Khan, Z. I., Haider, R., Ahmad, K., Alrefaei, A. F., Mehmood, N., Memona, H., & Ugulu, I. (2023). The Effects of Irrigation with Diverse Wastewater sources on Heavy Metal Accumulation in Kinnow and Grapefruit samples and Health Risks from Consumption. Water, 15(19), 3480. https://doi.org/10.3390/w15193480

Kiziloglu, F.M., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y., & Dursun, A. (2008). Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica olerecea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica olerecea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. Agricultural Water Management, 95, 716 -724. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.008

Kristensen, P., Whalley, C., Zal, F. N. N., & Christiansen, T. (2018). European waters assessment of status and pressures. EEA Report. https://www.eea.europa.eu/publications/state-of-water

Langaas, S. (2020). Microplastics (MP) in Sewage Sludge and Agriculture. Available online: https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-meeting-sludge-2018/ESPP-4-12-2018-Langaas.pdf

Lin, C., Shacahr, Y., & Banin, A. (2004). Heavy metal retention and partitioning in a large-scale soil-aquifer treatment (SAT) system used for wastewater reclamation. Chemosphere, 57(9), 1047-1058. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.08.049

Muchuweti, M., Birkett, J. W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M. D., & Lester, J. N. (2006). Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. Agriculture, ecosystems & environment, 112(1), 41-48. https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.028

Piotrowska, A., Iamarino, G., Rao, M.A., & Gianfreda L. (2006). Short-term effects of olive mill waste water (OMW) on chemical and biochemical properties of semi-arid Mediterranean soil. Soil Biology and Biochemistry, 38, 600-610. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.06.012

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma, 152(3-4), 252-263. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009

Ritchie, H., & Roser, M. (2022). Water Use and Stress. Available online: https://ourworldindata.org/water-use-stress

Santos, A. F., Alvarenga, P., Gando-Ferreira, L. M., & Quina, M. J. (2023). Urban wastewater as a source of reclaimed water for irrigation: barriers and future possibilities. Environments, 10(2), 17. https://doi.org/10.3390/environments10020017

Santos, A.F., Santos, C.P., Matos, A.M., Cardoso, O., & Quina, M.J. (2020). Effect of Thermal Drying and Chemical Treatments with Wastes on Microbiological Contamination Indicators in Sewage Sludge. Microorganisms, 8(3), 376. https://doi.org/10.3390/microorganisms8030376

SEPA, (2005). The limits of pollutants in food. China: State Environmental Protection Administration. GB2762-2005. https://www.codeofchina.com/standard/GB2762-2005.html

Tang, G., Zhang, X., Qi, L., Li, L., Guo, J., Zhong, H., & Huang, J. (2022). Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Increases the Uptake of Soil Heavy Metal Pollutants by Plant Community. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 109(6), 1059-1066. https://doi.org/10.1007/s00128-022-03628-x

Türkdoğan, M. K., Kilicel, F., Kara, K., Tuncer, I., & Uygan, I. (2003). Heavy metals in soil, vegetables and fruits in the endemic upper gastrointestinal cancer region of Turkey. Environmental toxicology and pharmacology, 13(3), 175-179. https://doi.org/10.1016/S1382-6689(02)00156-4

US EPA. (2022). Basic Information about Water Reuse. Available online: https://www.epa.gov/waterreuse/basic-information-about-water-reuse

Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 533(1-2), 107-120. https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2003.07.011

Yargholi, B. (2007). Investigating the amount of cadmium absorption from the root environment and its accumulation in the different parts of the crops. doctoral dissertation, University of Tehran, Iran. [in Persian]

Younis, U., Malik, S. A., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Shah, M. H. R., & Ahmad, N. (2016). Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (Spinacia oleracea) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes. Environmental Science and Pollution Research, 23, 21385-21394. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7344-3

Advanced Technologies in Water Efficiency

homepage:https://atwe.razi.ac.ir Online ISSN:2783-4964

Evaluating the methods of estimating the runoff input to the reservoir and factors affecting calculation errors (a case study of Gilan Gharb dam, Kermanshah province)

Naser Farzi [1], Mohammad Reza Sharifi [2]✉, Ali Mohammad Akhundali [3]

[1] Ph.D. Student of Depatment Water&amp, Hydrology Faculty of water and Environmental Chamran University Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: nfarzi6@ gmail.com

[2] Corresponding Author, Associate Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: msharifi@Scu.ac.ir

[3] Professor, Department of Hydrology and Water Resources, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: aliakh@Scu.ac.ir

ABSTRACT

Gilan-e Gharb Reservoir Dam in Gilan-e Gharb County in the southwest of Kermanshah Province is one of the dams designed to provide agricultural water to downstream lands in a hot and dry region. This dam is one of the structures where the calculation errors in the estimation of the water entering the reservoir have caused the failure of the planned goals in such a way that to compensate for this calculation error and to supply agricultural water to the Gilan-e Gharb dyke area in front of the Gilan-e Gharb spring flow, it was designed and was executed After 25 years of dewatering this dam, the volume of the reservoir has not yet reached the estimated value. The studying consulting engineers company mentioned the reason for this failure due to the quality of the reservoir dam inlet station, the quality of statistics and information, the occurrence of drought, and finally the effects of watershed operations in the catchment area of this dam. The main purpose of this research is to evaluate the methods of estimating the inflow to the Gilan-e Gharb dam reservoir and to investigate the factors affecting the calculation errors by using HEC-HMS software to analyze the runoff rainfall model of the Gilan-e Gharb dam reservoir and to investigate the effect of water management operations on the productive runoff and peak flood discharge. In this study, maps of land use, geology, vegetation and soil hydrological groups were prepared along with field assessments, and then the CN map of the basin was prepared from the integration of the said maps using GIS software. According to the historical record of the statistics and information of the inlet station of the Gilan-e Gharb Reservoir Dam in recent periods and even before the construction of the Reservoir Dam, the volume of the reservoir due to several reasons such as the low amount of incoming runoff, the existence of karst formations that collect most of the runoff, the volume of runoff with the amount 17 million cubic meters does not match. The results of this research showed that the estimation of the dam inlet was accompanied by gross errors due to the lack of knowledge of the hydrological conditions of the reservoir dam area. Taking into consideration that the watershed operations in the carried-out periods have also had an impact on the water intake of the mentioned reservoir dam, the watershed cannot be the main obstacle for not reaching the predicted watershed.

Keywords: Runoff estimation, CN map, HEC-HMS, Gilan Gharb dam

Article Type: Research Article
Article history: Received: 16 January 2024 **Revised:** 05 March 2024 **Accepted:** 23 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

Experience has shown that the application of experimental methods of watershed estimation from watersheds without knowing and obtaining the required parameters and their appropriate estimation and without considering the studied watershed system has not led to acceptable results. In addition, the restoration and extension of the data using the statistics and information of watersheds which have nothing in common with the studied watershed, do not yield reliable results. In many cases, consultants of contracting parties of employing companies use hydrological models and generalization and extension of data to analyze water structures, to evaluate water resources. Determining the amount of runoff and the shape of the flood water feature, while being used in determining the flood process in a basin for the design of flow control structures, organizing the river and designing other water structures, will indicate the response of the basin to rainfall. Among the different hydrology models, the HEC-HMS model is more useful in hydrology evaluations for the design of hydraulic structures. The main purpose of this research is to evaluate the methods of estimating the inflow to the Gilangreb dam reservoir and to investigate the factors affecting the calculation errors by using HEC-HMS software to analyze the runoff rainfall model of the Gilangreb dam reservoir and to investigate the effect of water management operations on the productive runoff and peak flood discharge. In this study, maps of land use, geology, vegetation and soil hydrological groups were prepared along with field assessments, and then the CN map of the basin was prepared from the integration of the said maps using GIS software. One of the reasons for choosing the Gilangreb Reservoir Dam in order to carry out pathological studies on the estimation of the inflow and design discharge of the mentioned spillway is the significant difference between the long-term inflow of the dam and the design flow.

2. Methodology

In this survey, the statistics and information of the studied catchment area and its adjacent areas were used (Tables No. 1 and 2). Considering

the statistical gaps in the water and meteorological stations in the region, especially due to the imposed war, it was tried to use the recorded statistics and information to repair the statistical gaps, and to use the statistics and information of other stations whose catchment areas are not similar. It does not have a hydrological relationship with the study area and should not be used. However, in view of this, in inevitable cases, the rainfall statistics of Kermanshah synoptic station, which is more reliable than other stations in the region, and the statistics and information of Qasr Shirin stability rain gauge station and the number of rainy days of this station and the mentioned parameter and the maximum 24, 48 and 72 rain gauge stations of Pol Shah and Qasr Shirin were used. Also, by using digital maps (DEM) and satellite images, various thematic maps (Figure No. 3) were created in order to use the results in the Hec-Hms model (Figure No. 4 A).) is presented.

3. Results and discussion

The results of the trend test are based on the existence of a trend in the data in irrigation, although in the case of some data such as monthly irrigation, the results of the Kendall test and the turning point were not the same. Also, using the available statistics of the water measuring station at the entrance of Gilangharb dam, the water level of some years, such as the water years of 70-71, 72-71, 74-73, 77 and 98, 97, is different from other years. The outlier test has been used, and according to the recommendation of the American Water Resources Association in 1981, considering that the skewness coefficient is greater than 0.4, the outlier data test has been performed for large values. Based on this test and considering the k value of the test, the upper limit of 22.74 and the lower limit of 0.44 have been calculated as 2.448, except for the water year of 89-90, when the volume of water produced is 0.35 million. Yes, no outliers have been observed in the data. In addition, with field observations and the use of satellite images, watershed operations were also investigated. Due to the limitation of surface and nderground water resources, as well as the border and exclusion of the studied area, in the initial approach and field visits during 30 years, a major change in land use, which is mainly pasture agricultural land, oak forests and villages located in the area No major change has been achieved (Figure No. 4).

4. Conclusions

Before the management and development and review and analysis of water resources systems, it is necessary that its infrastructures are prepared in the form of basic studies of water resources, and with the advancement of technology, the monitoring quality of the water resources measurement network is improved both from the quantitative and It should also be done from a qualitative point of view. In addition, it is necessary to know and study methods in the form of systematic and integrated management of water resources, development studies without considering the above levels may cause a waste of time, cost and opportunities, and at the time of occurrence Natural phenomena such as droughts and floods and even climate changes make management difficult and sometimes impossible. In the study area, by establishing a water measuring station and exploiting it, important facts and facts of the area were determined that the use of empirical relationships and the restoration and extension of statistics using the information of areas that have no hydrological commonality with the study area. It does not work, it is useless and non-technical. The studied area up to the Gilangreb Reservoir Dam, based on the documentation in the past and in normal time conditions, had a runoff potential of 7 to 8 million cubic meters (in the form of floods), which in the current dry period (at least in the last ten years) and the events that happened in the area (watershed operations) on the one hand and on the other hand the poor potential of the underground water in the basin (which has caused a negligible base flow in it) and possible uses on a case-by-case basis, the river's drainage has reached less than 2 million cubic meters. This is despite the fact that according to the conditions of the study basin, the river reaches the super-alashare water level only in normal years, when the annual rainfall in the basin is more than 600 mm and there are high intensity showers in a few days. that the probability is low every year. The analysis carried out shows that the watershed operation has not completely reduced the water level and the volume of floods in the Gilangarb reservoir dam area, and the water level has alternated between wet and dry periods, and there have been no continuous wet or dry periods. The volume of floods and flooding has decreased by 43% and 34% respectively. The error that happened from the previous studies was that the runoff was not available for at least 100 square kilometers of the catchment area, which is made of karst formation (mainly limestone) and has had a preventive effect on the real area and the topographical area. The results of this study showed that the methods of estimating the water input to the Gilangreb dam reservoir due to the use of statistical relationships and its extension could not be in accordance with the basin realities and the construction of this dam with high costs actually did not reach the pre-designed goals.

5. References

Arekhi, S. (2012). Runoff Modeling by HEC-HMS Model, Case Study: Kan Watershed, Iran. Journal of Agriculture and Crop Sciences, 4(23), 1807-1811. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131681817

Razi, M. M., Ariffin, J., Tahir, W., & Arish, N. A. M. (2010). Flood estimation studies using hydrologic modeling system (HEC-HMS) for Johor River, Malaysia. Journal of Applied Sciences, 10(11), 930-939. https://doi.org/10.3923/jas.2010.930.939

Yusop, Z., Chan, C. H., & Katimon, A. (2007). Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. Water Science and Technology, 56(8), 41-48. http://dx.doi.org/10.2166/wst.2007.690

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors of this article are grateful for the good cooperation of the National Meteorological Organization and Kermanshah Regional Water Company for providing some of the statistics and information of this research.

Cite this article: Farzi, N., Sharifi, M.R., & Akhundali, A.M. (2024). Evaluating the methods of estimating the runoff input to the reservoir and factors affecting calculation errors (a case study of Gilan Gharb dam, Kermanshah province), *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 19-39. DOI: 10.22126/atwe.2024.10300.1107

Publisher: Razi University

© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

ارزیابی روش‌های تخمین آبدهی ورودی به مخزن و عوامل مؤثر بر خطاهای محاسباتی (مطالعه موردی سد گیلان غرب در استان کرمانشاه)

ناصر فرضی[۱]، محمدرضا شریفی[۲]✉، علی‌محمد آخوند علی[۳]

[۱] دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکده مهندسی آب و محیطزیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: nfarzi6@ gmail.com

[۲] نویسنده مسئول، دانشیار دانشکده مهندسی آب و محیطزیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: msharifi@Scu.ac.ir

[۳] استاد دانشکده مهندسی آب و محیطزیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: aliakh@Scu.ac.ir

چکیده

سد مخزنی گیلان غرب ازجمله سازه‌هایی است که اشتباهات محاسباتی در برآورد آب ورودی به مخزن باعث عدم موفقیت در اهداف طرح‌شده است به‌گونه‌ای که برای جبران این اشتباه محاسباتی و تأمین آب کشاورزی منطقه، دایک گیلان غرب در مسیر جریان چشمه گیلان غرب (چشمه مورد) طراحی و اجرا گردید. بعد از ۲۵ سال از آبگیری این سد، حجم مخزن هنوز به مقدار برآورد شده نرسیده است. شرکت مهندسین مشاور مطالعه کننده این سد، این عدم موفقیت را ناشی از کیفیت ایستگاه ورودی سد مخزنی، کیفیت آمار و اطلاعات و وقوع خشک‌سالی و نهایتاً اثرات عملیات آبخیزداری حوضه آبریز این سد ذکر نموده است. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی روش‌های تخمین آبدهی ورودی به مخزن سد گیلان غرب و بررسی عوامل مؤثر بر خطاهای محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS برای تحلیل مدل بارش رواناب حوضه سد و بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر رواناب تولیدی و دبی اوج سیلاب است. در این بررسی نقشه‌های کاربری اراضی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک به همراه ارزیابی‌های صحرایی تهیه و سپس نقشه CN حوضه از ادغام نقشه‌های گفته‌شده با استفاده از نرم‌افزار GIS تهیه گردید. با توجه به ثبت تاریخی آمار و اطلاعات ایستگاه ورودی سد مخزنی گیلان غرب در دوره‌های اخیر و حتی قبل از احداث سد مخزنی حجم مخزن به دلایل متعددی همچون کم بودن میزان رواناب ورودی، وجود سازندهای کارستی که بیشتر رواناب‌ها را جذب می‌کند حجم رواناب با میزان ۱۷ میلیون مترمکعب پیش‌بینی‌شده همخوانی ندارد. نتایج این پژوهش نشان داد که تخمین آورد ورودی سد (از ۲۵ به ۱۹ و از ۱۹ به ۱۷ میلیون مترمکعب) به دلیل عدم شناخت شرایط هیدرولوژیکی حوزه سد مخزنی با خطاهای فاحشی همراه بوده است. با در نظر گرفتن اینکه عملیات آبخیزداری در دوره‌های انجام‌شده نیز بر آبدهی ورودی سد مخزنی مذکور تأثیرگذار بوده است آبخیزداری نمی‌تواند مانع اصلی برای عدم رسیدن به آبدهی پیش‌بینی‌شده باشد.

واژه‌های کلیدی: تخمین ورودی به مخزن سد، نقشه CN، HEC-HMS، سد گیلان غرب

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۱۵ اسفند ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۰۴ فروردین ۱۴۰۳ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: فرضی، ن.، شریفی، م.ر.، و آخوند علی، ع.م. (۱۴۰۳). ارزیابی روش‌های تخمین آبدهی ورودی به مخزن و عوامل مؤثر بر خطاهای محاسباتی (مطالعه موردی سد گیلان غرب در استان کرمانشاه)، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۳۹-۱۹، شناسه دیجیتال:10.22126/atwe.2024.10300.1107

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

CC BY NC

مقدمه

تحلیل سیستم‌های منابع آب در مقیاس‌های مختلف بدون وجود داده و اطلاعات معتبر امکان‌پذیر نیست. ایجاد شبکه‌های سنجش آب و هواشناسی و پایش مستمر آن به‌عنوان پایه تحلیل منابع آب نقش اساسی داشته و بدون بررسی همه‌جانبه و نگرش سیستمی نمی‌توان تحلیل درستی از منابع آب و رفتارهای آن داشت. علاوه بر این عدم شناخت کافی از عملکرد سیستم در مقیاس‌های مختلف و فقدان جامع‌نگری منابع آب، موجب تولید داده و اطلاعات غلط شده و این داده‌های تعمیم داده‌شده باعث اشتباه فاحش در تصمیم‌گیری می‌شوند. چنین روندی نه‌تنها موجب هدر رفتن زمان و اتلاف سرمایه می‌گردد بلکه منجر به از دست رفتن فرصت‌ها و اطمینان زدایی از ذی‌نفعان این پروژه‌ها می‌گردد. در شرایط طبیعی (خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها) و غیرطبیعی (دخالت انسان بر کمیت و کیفیت منابع آب در حوضه‌های آبریز اصلی و فرعی) تحلیل‌های منابع آب که بدون در نظر گرفتن واقعیت‌های زمین‌شناسی/هیدرولوژیکی انجام‌شده است موفقیت پروژه را با ابهام مواجه می‌سازد. صرف‌نظر از ایجاد شبکه سنجش آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوضه‌های آبریز اصلی و فرعی و لزوم پایش منظم آن و بهنگام سازی آماربرداری‌های سراسر منابع آب، لازم است که در طرح‌ها و پروژه‌های توسعه منابع آب حداقل از زمان شروع مطالعات ولو با نصب یک اشل ساده، با اندازه‌گیری‌ها و نمونه‌برداری‌های منظم شناخت بهتری از منابع آب حوضه آبریز موردمطالعه به دست آورد.

تجربه نشان داده است که اعمال روش‌های تجربی برآورد آبدهی از حوزه‌های آبریز بدون شناخت و دست‌یابی به پارامترهای موردنیاز و برآورد مناسب آن و بدون توجه به سیستم حوزه آبریز موردمطالعه منجر به نتایج قابل قبولی نشده است. ضمن اینکه از ترمیم و تطویل داده‌ها با استفاده از آمار و اطلاعات حوزه‌های آبریزی که هیچ‌وجه مشترکی با حوزه آبریز موردمطالعه را ندارد، نتایج مطمئنی حاصل نمی‌گردد. در بسیاری از موارد مشاورین طرف قرارداد شرکت‌های کارفرمایی برای تحلیل سازه‌های آبی، برای ارزیابی‌های منابع آب از مدل‌های هیدرولوژی و تعمیم و تطویل داده‌ها استفاده می‌کنند. تعیین میزان رواناب و شکل آبنمود سیل، ضمن کاربرد در تعیین چگونگی روند سیل در یک حوضه برای طراحی سازه‌های کنترل جریان، ساماندهی رودخانه و طراحی سایر سازه‌های آبی، حاکی از عکس‌العمل حوضه در مقابل بارش خواهد بود. از میان مدل‌های هیدرولوژی مختلف، مدل HEC-HMS کاربرد بیشتری در ارزیابی‌های هیدرولوژی برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارد (شقاقی، ۱۳۸۰.، و خسروشاهی و ثقفیان، ۱۳۷۳). محققان مختلفی در ایران برای بررسی‌های هیدرولوژی از این مدل استفاده کرده‌اند (موسوی ندوشنی و داننده مهر، ۱۳۸۴.، آورند و همکاران، ۱۳۸۶.، محمودی و همکاران،۱۳۸۶.، افتخاری و همکاران، ۱۳۸۸.، چامه، ۳۸۹.،؛ اردلان خواه، ۱۳۹۰.، یمانی و مهرجونژاد، ۱۳۹۱.، عشقی زاده و همکاران، ۱۳۹۲.، پروانه، ۱۳۹۵.، گراوند و همکاران، ۱۴۰۰.، و نعیمی هوشمند و احمدزاده کلیبر، ۱۴۰۱).

برای تحلیل مدل بارش رواناب حوضه سد مخزنی و بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر رواناب تولیدی و دبی اوج سیلاب می‌توان از نرم‌افزار HEC-HMS استفاده نمود (یوساپ و همکاران[1]، ۲۰۰۷.، رازی و همکاران[2]، ۲۰۱۰.، و آرخی[3]، ۲۰۱۲). هدف اصلی این پژوهش ارزیابی روش‌های تخمین آبدهی ورودی به مخزن سد گیلان غرب و بررسی عوامل مؤثر بر خطاهای محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS برای تحلیل مدل بارش رواناب حوضه سد مخزنی گیلان غرب و بررسی تأثیر عملیات آبخیزداری بر رواناب تولیدی و دبی اوج سیلاب است. در این بررسی نقشه‌های کاربری اراضی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک به همراه ارزیابی‌های صحرایی تهیه و سپس نقشه CN حوضه از ادغام نقشه‌های گفته‌شده با استفاده از نرم‌افزار GIS تهیه شد. از دلایل انتخاب سد مخزنی گیلان غرب به‌منظور انجام مطالعات آسیب‌شناسی برآورد آبدهی ورودی و دبی طراحی سرریز مذکور اختلاف فاحش میزان آبدهی ورودی درازمدت سد با میزان آورد طراحی در نظر گرفته‌شده است.

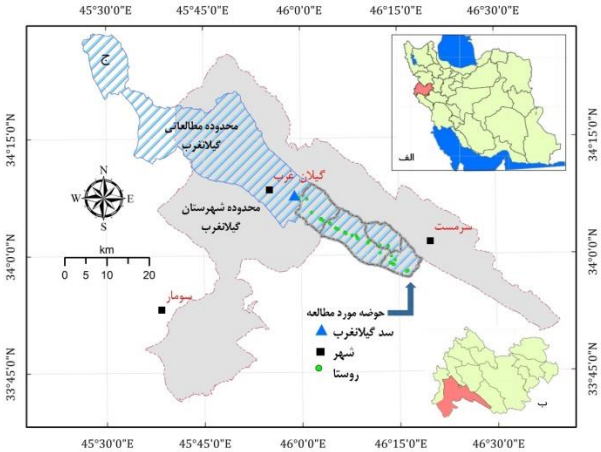
مبانی نظری و پیشینه پژوهش

سد گیلان غرب در جنوب غربی شهر گیلان غرب و بر روی رودخانه گیلان غرب در ۵ کیلومتری شرق شهرستان گیلان غرب (با مختصات جغرافیایی محل سد در ' ۵۸-۰۴۵ طول جغرافیایی و '۰۷-۰۳۴ عرض جغرافیایی) و در ۱۶۰ کیلومتری غرب استان کرمانشاه واقع‌شده است. ارتفاع بستر رودخانه در محل سد ۸۸۸ متر از سطح دریا است. متوسط ارتفاع دشت گیلان غرب از سطح دریا ۷۵۰ متر و عرض متوسط دشت ۳/۵ کیلومتر و طول آن حدود ۲۴ کیلومتر است. مساحت دشت در حدود ۸۴ کیلومترمربع بوده که رودخانه گیلان غرب دشت را

[1] Yusop et al
[2] Razi et al
[3] Arekhi

به دو ساحل چپ و راست تقسیم می‌نماید. مسیر جریان رودخانه در دشت مذکور از جنوب شرقی به‌طرف شمال غربی است. رودخانه در امتداد طولی دشت جریان می‌یابد. بخش اعظم اراضی دشت گیلان غرب در ساحل چپ رودخانه واقع‌شده است.

داده‌های آب‌شناسی حوزه موردمطالعه شامل آمار و اطلاعات ایستگاه آب‌سنجی نصرآباد بر روی رودخانه تنگاب (گیلان غرب) که قبل از الصاق به رودخانه الوند در سال آبی ۱۳۳۸ تأسیس و آماربرداری گردیده و در سال آبی ۵۹–۵۸ به دلیل وقوع جنگ تحمیلی عملاً تعطیل گردید و مجدداً در سال ۱۳۸۶ در محل سابق احداث و آماربرداری‌های جدید شروع‌شده است. اندازه‌گیری‌های سراب (چشمه مورد) گیلان غرب نیز به‌صورت ماهانه از سال آبی ۶۲–۶۱ قابل‌دسترسی بوده (صرف‌نظر از چند ماه خلأ اندازه‌گیری در سال‌های آبی ۸۱–۸۰ و ۸۲–۸۱ و ۸۷–۸۸) و آماربرداری و اندازه‌گیری چشمه‌ها و سراب‌های مهم و مجاور آن نیز در همان سال آبی شروع‌شده اما از زمان شروع عملیات اجرایی دایک و مخزن گیلان غرب و حتی در زمان بهره‌برداری با توجه به تعدد آبگیرها اندازه‌گیری از دقت لازم برخوردار نیست. با شروع مطالعات سد مخزنی گیلان غرب از سال آبی ۱۳۷۰–۱۳۶۹ با نصب اشل در محل سد (کاسه‌گران و کلاشک) اندازه‌گیری‌های موردی انجام و با تأسیس ایستگاه درجه‌یک در سال ۱۳۷۶ تداوم یافت. پس از دخل و تصرفات و شرایط نامساعد مقطع اندازه‌گیری به دلیل تعریض جاده اصلی دسترسی به گیلان غرب محل جدید ایستگاه درجه‌یک در سال ۱۳۸۵ به‌عنوان ورودی سد احداث و با لوازم مدرن اندازه‌گیری تجهیز گردیده است. شبکه سنجش آب‌های زیرزمینی که عمدتاً اندازه‌گیری پیزومترها را شامل می‌گردد در سال‌های اخیر تکمیل‌شده است. دشت پاچله (حوزه سد مخزنی) به دلیل فقر آب زیرزمینی فاقد شبکه سنجش است که در شکل (۱) نشان داده‌شده است.



شکل ۱. موقعیت استان کرمانشاه: الف) در ایران، ب) شهر گیلان غرب در استان کرمانشاه، ج) محدوده مطالعاتی گیلان غرب

به‌طورکلی به دلیل خلأهای آماری ناشی از هشت سال جنگ تحمیلی و پس‌ازآن تعیین محل‌های جدید ایستگاه‌های آب و هواشناسی مرزی که خود مستلزم پاک‌سازی از میدان‌ها مین بوده و چند سال نیز صرف احداث و تکمیل شبکه سنجش آب‌های سطحی و زیرزمینی (در جداول (۱) و (۲) مشخصات ایستگاه‌های مورداستفاده در این پژوهش ارائه گردیده است) در منطقه گردیده مطالعه منابع آب حوزه‌های آبریز مرزی را با دشواری همراه نموده است. آبگیری سد مخزنی گیلان غرب پس از خاتمه عملیات اجرایی در اسفندماه ۱۳۸۳ و به‌صورت رسمی در اواسط بهمن‌ماه سال ۱۳۸۴ شروع گردید. عملیات آبخیزداری در سرشاخه‌های رودخانه گیلان غرب با احداث کانال‌های خاکی با طول در حدود ۱۷ کیلومتر در سمت چپ و راست ارتفاعات مشرف به دشت پاچله توسط سازمان جهاد کشاورزی استان کرمانشاه در بازه‌های زمانی مختلف و در چهار محدودهٔ اصلی در حوزه سد مخزنی گیلان غرب از سال ۱۳۷۵ لغایت ۱۳۹۳ انجام‌شده است که در جدول (۳) نشان داده‌شده است. بررسی نقطه‌ای اثر تغییرات آب و هوایی در منطقه و حوزه که تاکنون انجام‌نشده است به نظر می‌رسد این پدیده درشدت و مدت خشک‌سالی‌های منطقه تأثیر داشته باشد. بررسی تأثیر موارد بالا در تعدیل میزان رواناب مبهم بوده و نیاز به مطالعات دقیق‌تر و وسیع‌تر دارد بااین‌حال آنچه مسلم است، تأثیر خشک‌سالی‌های اخیر بر منابع آب مشخص‌شده و در ادامه تحلیل آبدهی رودخانه موردمطالعه سعی گردیده است که با تأثیر عوامل فوق و در نظر گرفتن اثرات آن تحلیل مذکور صورت پذیرد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه موردمطالعه و حوزه‌های آبریز مجاور آن

نام رودخانه	امکانات ایستگاه			سال تأسیس	سطح حوزه تا محل ایستگاه km ۲	ارتفاع ایستگاه به متر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
	پل تلفریک	لمینگراف	اشل					
گیلان غرب	*	*	*	۱۳۷۴	۲۷۸	۹۷۰	۶۰۰-۳۴	۳۳-۴۶
زمکان		*	*	۱۳۵۳	۱۴۱۰	۱۱۰۰	۶۰-۳۴	۱۶-۴۶
زمکان	*		*	۱۳۴۹	۲۳۵۶	۵۸۰	۰۱-۳۵	۵۵-۴۵
الوند	*	*		۱۳۴۰	۲۶۱۲	۲۸۰	۲۲-۳۴	۲۳-۴۵
الوند	*	*	*	۱۳۳۱	۱۵۲۸	۳۵۰	۳۱-۳۴	۲۵-۴۵
کرند	*	*	*	۱۳۵۳	۲۵۰	۱۳۷۱	۱۰-۳۴	۲۲-۴۶
دیره	*		*	۱۳۳۹	۷۰۰	۷۲۰	۱۷-۳۴	۵۵-۴۵
چم راوند	*	*	*	۱۳۷۱	۱۰۹۷	۱۲۷۴	۵۷-۳۳	۴۵-۴۶
زمکان		*	*	۱۳۵۳	۳۴۲	۱۵۵۳	۱۲-۳۴	۲۱-۴۶
ماهیت				۱۳۳۶	۱۹۰	۵۷۵	۲۸-۳۴	۵۳-۴۵
دیره			*	۱۳۳۸	۸۴۴	۵۳۰	۲۷-۳۴	۴۸-۴۵
امام حسن			*	۱۳۳۶	۱۷۹	۲۸۰	۲۴-۳۴	۲۶-۴۵
ماهیت			*	۱۳۵۳	۱۶۲	۷۰۰	۲۶-۳۴	۵۷-۴۵
تنگاب			*	۱۳۳۸	۷۶۸	۲۳۰	۲۲-۳۴	۳۳-۴۵
آب نفت			*	۱۳۴۸	۵۴۸	۱۶۰	۰۰-۳۴	۳۰-۴۵

پیشینه ارزیابی‌های آورد ورودی به مخزن سد گیلان غرب

از ابتدای شروع مطالعات هیدرولوژی سد مخزنی گیلان غرب تا زمان بهره‌برداری میزان آبدهی ویرایش و توجیهات مختلفی توسط شرکت مطالعه کننده صورت گرفته که گزارش‌های مطالعات شناخت و مرحله اوّل برآورد ۲۵-۲۱ میلیون مترمکعب در سال اشاره دارد. بعد از بررسی‌های کارشناسی و کارفرمایی و به دلیل فقر آمار و اطلاعات رودخانه‌های مرزی، طراحی سد مخزنی بر اساس آورد ۱۹ میلیون مترمکعب نهایی گردید. در طول دورهٔ ساخت و حتی بهره‌برداری با توجه به‌اندازه گیری های آورد ورودی و جابجایی ایستگاه هیدرومتری و ارتقاء کیفیت آمار و اطلاعات آبدهی، اختلاف فاحش در میزان آورد و تخصیص آب به سد گیلان غرب آشکار شد. به‌طوری‌که شرکت مطالعه کننده سد، علت این اختلاف را به دوره‌های خشک‌سالی، کیفیت نامناسب آمار و اطلاعات ایستگاه ورودی سد مخزنی و درنهایت انجام عملیات آبخیزداری در حوزه آبریز ربط داد. علاوه بر این در گزارشی با عنوان نتایج مطالعات هیدرولوژی نهایی و برنامه‌ریزی منابع آب که مشاور مطالعه کننده سد گیلان غرب در اردیبهشت سال ۱۳۸۴ منتشر نمود آورد سالانه ورودی به سد ۱۷ میلیون مترمکعب در سال برآورد گردید که عملاً حجم آب ورودی به این احجام نرسید. برای جبران این نقیصه و به‌منظور جبران بخشی از نیاز آب کشاورزی در پائین‌دست محل احداث سد و در خارج از

حوضه آن، با خاک‌برداری و احداث دایک خاکی به حجم ۸/۲ میلیون مترمکعب در پایاب چشمه سراب گیلان غرب اقدام گردید. در مطالعه پیش رو مبانی محاسبات تخمین آورد ورودی سد به چالش کشیده شده و مشخص گردید که توجیهات شرکت مطالعه کننده سد مخزنی گیلان غرب در مورد علل ناکافی بودن دبی ورودی سد مبنای منطقی و علمی ندارد.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در منطقه موردمطالعه و حوزه‌های آبریز مجاور آن

نام رودخانه	امکانات ایستگاه			سال تأسیس	سطح حوزه تا محل ایستگاه km ۲	ارتفاع ایستگاه به متر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
	پل تلفریک	لمینگراف	اشل					
گیلان غرب	*	*	*	۱۳۷۴	۲۷۸	۹۷۰	۶۰۰-۳۴	۳۳-۴۶
زمکان		*	*	۱۳۵۳	۱۴۱۰	۱۱۰۰	۶۰-۳۴	۱۶-۴۶
زمکان	*		*	۱۳۴۹	۲۳۵۶	۵۸۰	۰۱-۳۵	۵۵-۴۵
الوند	*	*		۱۳۴۰	۲۶۱۲	۲۸۰	۲۲-۳۴	۲۳-۴۵
الوند	*	*	*	۱۳۳۱	۱۵۲۸	۳۵۰	۳۱-۳۴	۲۵-۴۵
کرند	*	*	*	۱۳۵۳	۲۵۰	۱۳۷۱	۱۰-۳۴	۲۲-۴۶
دیره	*		*	۱۳۳۹	۷۰۰	۷۲۰	۱۷-۳۴	۵۵-۴۵
چم راوند	*	*	*	۱۳۷۱	۱۰۹۷	۱۲۷۴	۵۷-۳۳	۴۵-۴۶
زمکان		*	*	۱۳۵۳	۳۴۲	۱۵۵۳	۱۲-۳۴	۲۱-۴۶
ماهیت				۱۳۳۶	۱۹۰	۵۷۵	۲۸-۳۴	۵۳-۴۵
دیره			*	۱۳۳۸	۸۴۴	۵۳۰	۲۷-۳۴	۴۸-۴۵
امام حسن			*	۱۳۳۶	۱۷۹	۲۸۰	۲۴-۳۴	۲۶-۴۵
ماهیت			*	۱۳۵۳	۱۶۲	۷۰۰	۲۶-۳۴	۵۷-۴۵
تنگاب			*	۱۳۳۸	۷۶۸	۲۳۰	۲۲-۳۴	۳۳-۴۵
آب نفت			*	۱۳۴۸	۵۴۸	۱۶۰	۰۰-۳۴	۳۰-۴۵

در این بررسی از آمار و اطلاعات حوزه آبریز موردمطالعه و مناطق مجاور آن استفاده گردید که در جداول (۱) و (۲) ارائه شد. با توجه به خلأهای آماری ایستگاه‌های آب و هواشناسی منطقه بخصوص ناشی از جنگ تحمیلی، سعی گردید که جهت ترمیم خلأهای آماری از آمار و اطلاعات ثبت‌شده استفاده و از آمار و اطلاعات سایر ایستگاه‌هایی که حوزه‌های آبریز مرتبط آن هیچ‌گونه شباهت هیدرولوژیکی با حوزه موردمطالعه ندارد استفاده نگردد. بااین‌همه با توجه به این امر در مواردی ناگزیر از آمار بارش‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه که دارای اعتبار بیشتری به سایر ایستگاه‌های منطقه است و آمار و اطلاعات ایستگاه باران‌سنجی ثبات قصر شیرین و تعداد روزهای بارانی این ایستگاه و پارامتر مذکور و حداکثرهای بارش ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ایستگاه باران‌سنجی پل شاه و قصر شیرین استفاده گردید. همان‌طور که در شکل (۴، الف) نشان داده‌شده است، با استفاده از نقشه‌های رقومی (DEM) و تصاویر ماهواره‌ای نقشه‌های مختلف مطابق شکل (۳) به‌منظور استفاده از نتایج در مدل Hec-Hms ایجاد گردید روند نمای مراحل پژوهش در شکل (۲) ارائه گردیده است. برای تست روند و همگنی داده‌ها از روش کندال، نقطه برگشت و ران تست استفاده گردیده است، برای انجام آزمایش‌های فوق از ماکروهای نوشته‌شده در محیط صفحه گسترده Excel (XlsTat)و نرم‌افزار spss و Minitab استفاده شد. به‌منظور برآورد آبدهی حوزه‌های آبریز و با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی آن و وجود یا عدم وجود شبکه سنجش می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود که شامل روش ضریب جریان، روش دبی و مساحت، روابط منطقه‌ای (آبدهی و بارش و پارامترهای فیزیوگرافی حوزه آبریز) روش آبدهی- بارش- مساحت، روش‌های تجربی و آمار و اطلاعات ایستگاه آب‌سنجی به شرح زیر استفاده گردید:

ضریب جریان ضریب جریان رودخانه گیلان غرب در ایستگاه تنگاب ۰/۱۵ محاسبه گردیده است (رابطه منطقه‌ای دبی و مساحت) رابطه منطقه‌ای ۱/۲۸۹۵ ^Q/۰۰۰۶A۰ با R2=۰/۹۴۱۶ که از ایستگاه‌های منطقه رودخانه ماهیت در میانکل، دیره در پل شاه، الوند در قصر شیرین، کنگیر در شرفشاه، چم امام حسن در سیف‌اله، آب نفت در نفت شهر و الوند در گرصدف و تنگاب در نصرآباد استفاده گردیده است.

روش‌های تجربی انجمن زراعی هند و جاستین این روش تقریباً در تمامی مراجع هیدرولوژی وجود دارد؛ و با توجه به تغییرات ضریب روابط مذکور نتایج مختلفی به دست می‌آید و تعیین ضرایب دقیق‌تر مستلزم تحقیق کامل‌تری در حوزه است ضمناً بارش و دمای متوسط حوزه که در روابط فوق استفاده گردیده است از آمار سایت سازمان هواشناسی و گزارش‌های مطالعات قبلی حوزه موردمطالعه استفاده گردیده است. اساس روش تجربی جاستین در برآورد ارتفاع رواناب حوضه‌های فاقد آمار، بر عملکرد مشابه حوضه‌ها استوار است. در این روش علاوه بر خصوصیات اقلیمی، شرایط فیزیوگرافی حوضه هم در نظر گرفته می‌شود؛ و از معادله (۱) محاسبه قابل‌محاسبه است:

$$R=\frac{KS^{0.155}P^2}{1.8T+32} \quad (۱)$$

که در آن، R ارتفاع رواناب سالانه برحسب سانتی‌متر، S شیب حوضه برحسب درصد، P ارتفاع بارندگی متوسط سالانه حوضه برحسب سانتی‌متر، T درجه حرارت متوسط سالانه برحسب سانتی‌گراد و K ضریب منطقه‌ای جاستین است. شیب حوضه از معادله (۲) به دست می‌آید:

$$S=\frac{H_{max}-H_{min}}{\sqrt{A}} \quad (۲)$$

که در آن مساحت حوضه به کیلومترمربع A ارتفاع حداقل حوضه به کیلومتر وHmin ، ارتفاع حداکثر حوضه به کیلومتر.Hmax است.

روش انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان مدلی است که توسط انجمن تحقیقات کشاورزی هندوستان به‌دست‌آمده و از رابطه (۳) تعیین می‌گردد.

$$R=KP^{1.44}/T^{1.34}A^{0.0613} \quad (۳)$$

که در آن R ارتفاع رواناب سالانه به سانتیمتر، P ارتفاع بارندگی سالانه به سانتیمتر و A مساحت حوضه به کیلومترمربع و Tدرجه حرارت متوسط سالانه به سانتی‌گراد و K ضریب ایکار است.

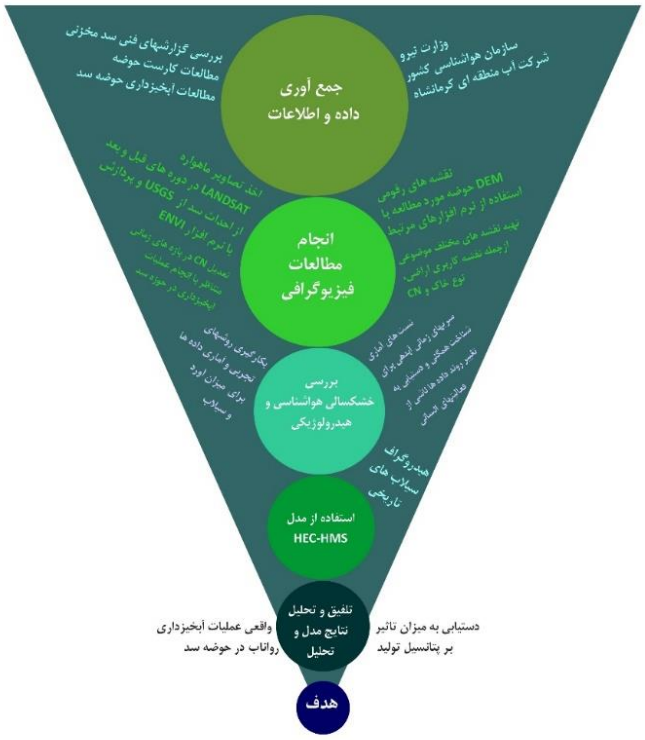
روش کتاین بر مبنای میزان کمبود جریان در حوضه، استوار است و رابطه این روش به‌صورت زیر است:

$$D=P-\lambda P^2 \quad (۴)$$

$$\lambda=\frac{1}{0.8+0.14T} \quad (۵)$$

$$R=P-D=\lambda P^2 \quad (۶)$$

که در آن، P میانگین بارندگی سالانه حوضه به متر، T دمای متوسط حوضه به سانتی‌گراد، D کمبود جریان سالانه به متر، λ ضریب کتاین و R ارتفاع رواناب سالانه حوضه به متر است.



شکل ۲. روند نمای انجام مراحل پژوهش

مدل مصرفی آب در حوزه در این مدل آبریز در محل تنگاب، میزان آب خروجی از سراب و آمار و اطلاعات بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ی کرمانشاه و در نظر گرفتن میزان آب برگشتی ناشی از آبیاری‌ها و به‌صورت معکوس میزان آبدهی حوزه سد گیلان غرب برآورد گردیده است.

نسبت حجمی در این روش تناسب مساحت و بارش و آبدهی در محل تنگاب و محل ایستگاه ورودی سد برقرار گردیده است.

داده‌های ایستگاه آب‌سنجی ورودی سد در این روش از میانگین بیست‌وسه سال آمار مثبت شده استفاده گردیده است.

استفاده از روش تجربی کتاین در این روش محاسبه تبخیر واقعی کمبود جریان و رواناب به دست می‌آید. پارامترهای دما و بارش نیز مطابق روابط تجربی جاستین و انجمن زراعی هند است که در جدول (۵) ارائه‌شده است. علاوه بر بازدیدهای میدانی ثبت مختصات گونه‌های گیاهی و مرتع و زمین‌های کشاورزی، (طبقه‌بندی نظارت‌شده) از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث و لند ست و تحلیل‌های ذی‌ربط در محیط نرم‌افزار ENVI تصاویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ تهیه و پس از انجام روند انجام طبقه‌بندی (انتخاب روش، اعمال الگوریتم طبقه‌بندی انجام پس پردازش موردنیاز و ارزیابی طبقه‌بندی) نقشه کاربری اراضی و تغییرات آن احصا گردید.

جدول ۳: مشخصات و دوره‌های زمانی اجرای عملیات آبخیزداری

نام حوزه	تعداد کانال‌ها	مساحت $(km)^z$	مساحت بالادست کانال $(km)^z$	طول کانال (km)	حجم کانال $(1000km)^3$	دورهٔ عملیات اجرایی شمسی – میلادی
چشمه نظامی	۴۳	۴۷	۴/۸	۸/۶	۴۸/۴	[1977-2003]–[1375-1381]
شاعران	۱۴۲	۴۴	۹/۱	۱۶/۳	۹۱/۹	[2004-2006]–[1382-1384]
کلاه دراز	۴۶۸	۹۴	۱۴/۷	۲۶/۵	۱۴۹/۹	[2007-2008]–[1385-1386]
کلاشک*	–	۹۱	–	–	–	[2008-2015]–[1386-1393]
جمع	۶۵۳	۲۷۶	۲۸/۶	۵۱/۴	۲۹۰/۲	[1977-2015]–[1375-1393]

* در محدوده کلاشک بجای احداث کانال بند گابیونی و چک دم بر روی آبراهه ها احداث گردیده است.

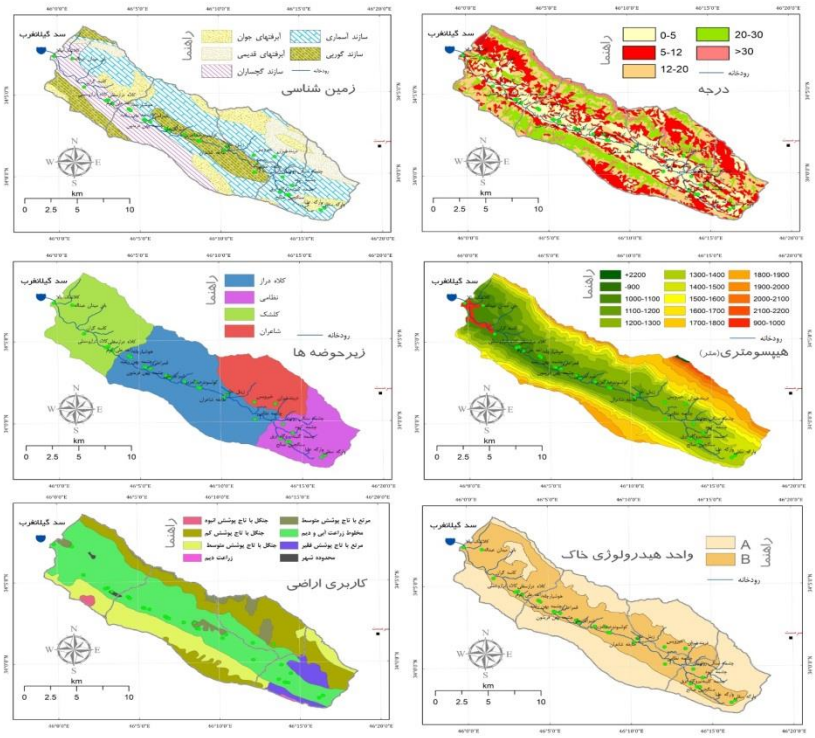
جدول ٤. (الف) CN هر محدود و کل حوزه آبریز سد مخزنی گیلان غرب در بازه‌های زمانی مطالعاتی و عملیاتی آبخیزداری (ب) پارامترهای موردنیاز جهت دست‌یابی به هیدرو گراف واحد حوزه سد مخزنی گیلان غرب در تفکیک قبل و بعد از انجام عملیات آبخیزداری

الف

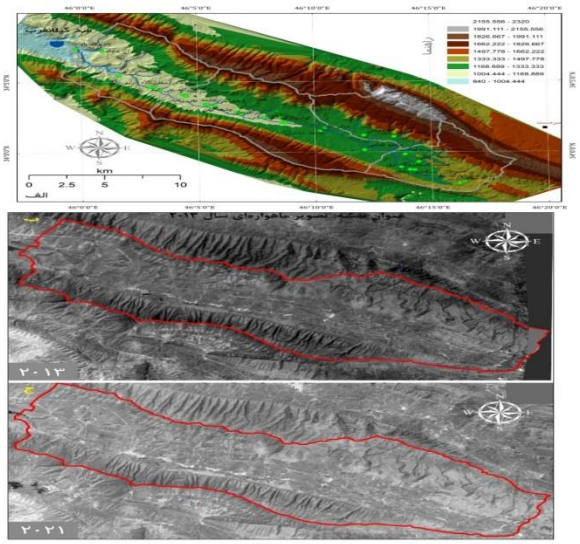
دوره مطالعاتی و عملیاتی آبخیزداری از حوزه آبریز سد مخزنی گیلان غرب	نام محدوده	CN هر محدوده (اصلاحی)	CN حوزه
۱۳۷۵-۱۳۸۱	چشمه نظامی	۶۳	۶۳
۱۳۸۲-۱۳۸۴	شاعران	۵۰	۶۱
۱۳۸۵-۱۳۸۶	کلاه دراز	۵۶	۵۸
۱۳۸۶-۱۳۹۳	کلاشک	۵۳	۵۵

ب

پارامتر دوره	T_f (hr)	T_c (hr)	T_p (hr)	Q_p (m^3/s)	CN
قبل از انجام آبخیزداری	۴/۶۹	۷/۷۹	۵/۱۴	۷/۲۸	۶۵
بعد از انجام آبخیزداری	۷/۱۹	۱۱/۹۳	۷/۸۷	۴/۷۶	۵۵



شکل ۳. نقشه‌های موضوعی مختلف که به‌تناسب در این بررسی مورداستفاده و استناد قرارگرفته‌اند



. شکل ٤. الف) تصویر مدل ارتفاعی حوضه موردبررسی؛ ب و ج) تصاویر ماهواره‌ای لندست از سایت USGS در بازه‌های زمانی ۲۰۱۳ و ۲۰۲۱ که نشان می‌دهد در کاربری اراضی حوزه سد مخزنی گیلان غرب تغییر محسوسی حاصل نشده است (ب و ج)

یافته‌ها

نتایج تست روند، مبنی بر وجود روند درداده در آبدهی است اگرچه در مورد برخی داده‌ها مثل آبدهی‌های ماهانه، نتیجه تست کندال و نقطه برگشت مشابه نبوده است. همچنین با استفاده آمار موجود ایستگاه آب‌سنجی ورودی سد گیلان غرب برخی از سال‌ها مثل سال‌های آبی ۷۱-۷۰، ۷۲-۷۱، ۷۴-۷۳، ۷۷ و ۹۸، ۹۷ میزان آبدهی با سایر سال‌ها تفاوت دارد که دراین‌باره از تست کنترل مقادیر حدی (out lier test) استفاده گردیده است که با توجه به توصیه انجمن منابع آب امریکا در سال ۱۹۸۱ نظر به اینکه ضریب چولگی از ۰/۴ بیشتر است آزمون داده‌های پرت برای مقادیر زیاد انجام‌گرفته است. بر اساس این تست و در نظر گرفتن مقدار k تست به میزان ۲/۴۴۸ حد بالا ۲۲/۷۴ و حد پایین ۰/۴۴ محاسبه گردیده است که غیر از سال آبی ۹۰-۸۹ که عدد حجم آب تولیدشده ۰/۳۵ میلیون متر مکعب است، داده پرتی در داده‌ها مشاهده نگردیده است.

علاوه بر این با مشاهدات میدانی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای عملیات آبخیزداری نیز بررسی گردید. با توجه به محدودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی و همچنین مرزی بودن و محرومیت منطقه موردمطالعه در برخورد اولیه و بازدیدهای میدانی در طول ۳۰ سال تغییر عمده‌ای در کاربری اراضی که عمدتاً زمین‌های کشاورزی مرتع، جنگ‌های بلوط و روستاهای واقع در حوزه تغییر عمده‌ای حاصل نشده است که در شکل (۴) نشان داده‌شده است.

در جدول (۵) کاربرد روش‌های برآورد آبدهی حوزه آبریز بدون در نظر گرفتن سیستم حوزه آبریز موردمطالعه ارائه‌شده است. همان‌گونه که از نتایج حاصل از اعمال روش‌های مختلف استنباط می‌گردد، تشتت و ابهام در نتیجه‌گیری وجود دارد بااین‌حال نتیجه آمار ثبت‌شده تاریخی از تمامی نتایج معتبرتر است.

جدول ۵. نتایج کاربرد روش‌های برآورد آبدهی رودخانه گیلان غرب تا محل ایستگاه ورودی سد

روش	**آبدهی** (میلیون مترمکعب)
ضریب جریان	۵/۱
رابطه منطقه‌ای دبی و مساحت	۳/۵۹
روش‌های تجربی انجمن زراعی هند و جاستین	۹
مدل مصرفی آب در حوزه	۱۰
نسبت حجمی	۵/۸
داده‌های ایستگاه آب‌سنجی ورودی سد	۶/۶ (۹/۵ پس از حذف روند)
کتاین	۱۳

ضریب جریان رودخانه گیلان غرب در ایستگاه تنگاب ۰/۱۵ محاسبه گردیده است. رابطه منطقه‌ای $Q=۰/۰۰۰۶A^{۱/۲۸۹۵}$ با $R^2=۰/۹۴۱۶$ که از ایستگاه‌های منطقه رودخانه ماهیت در میانکل، دیره در پل شاه، الوند در قصر شیرین، کنگیر در شرفشاه، چم امام حسن در سیف‌اله، آب نفت در نفت شهر و الوند در گرصدف و تنگاب در نصرآباد استفاده گردیده است.

روابط تجربی جاستین و انجمن زراعی هند تقریباً در تمامی مراجع هیدرولوژی وجود دارد؛ و با توجه به تغییرات ضریب روابط مذکور نتایج مختلفی به دست می‌آید و تعیین ضرایب دقیق‌تر مستلزم تحقیق کامل‌تری در حوزه است ضمناً بارش و دمای متوسط حوزه که در روابط فوق استفاده گردیده است از آمار سایت سازمان هواشناسی و گزارش‌های مطالعات قبلی حوزه موردمطالعه استفاده گردیده است.

در مدل مصرفی میزان آب خروجی از حوزه آبریز در محل تنگاب، میزان آب خروجی از سراب و آمار و اطلاعات بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ی کرمانشاه و در نظر گرفتن میزان آب برگشتی ناشی از آبیاری‌ها و به‌صورت معکوس میزان آبدهی حوزه سد گیلان غرب برآورد گردیده است. تناسب مساحت و بارش و آبدهی در محل تنگاب و محل ایستگاه ورودی سد برقرار گردیده است. از میانگین بیست‌وسه سال آمار مثبت شده استفاده گردیده است. با استفاده از روش تجربی کتاین و محاسبه تبخیر واقعی کمبود جریان و رواناب به دست می‌آید.

بر اساس نتایج مطالعات شناسایی و نتیجه تفضیلی سازندهای سخت که در حوزه موردمطالعه انجام گردیده حدود ۱۰۰ کیلومترمربع از حوزه آهک آسماری است که تقریباً هیچ روانابی را ایجاد نمی‌نماید و به‌واقع این تشکیلات آبدهی سراب گیلان غرب را تأمین می‌نماید. بر اساس میانگین‌های متحرک رسم شده آمار بارش در مورد ایستگاه سنپوتیک کرمانشاه که در منطقه از اعتبار بالایی برخوردار است و آمار بارش ایستگاه گیلان غرب حداقل از ده سال اخیر حوزه در دوره خشک‌سالی قرار دارد، بنابراین به نظر منطقی می‌رسد که قبل از وقوع خشک‌سالی‌های اخیر دوره‌ای موردمحاسبه قرار گیرد که حداقل یک دوره‌تر و یک دوره خشک را در برداشته باشد و اثر احتمالی تغییرات آب و هوایی در آن کم باشد. رواناب عبوری از ایستگاه نصرآباد ۲۴ میلیون مترمکعب در سال برآورد می‌گردد و (در دوره نرمال) $\frac{182}{654} \times \frac{600}{500} \times 24 \simeq 8\ MCM$ (میزان حجم آب در ایستگاه کلاشک بدون احتساب مصارف در حوزه سد که در حدود یک‌میلیون مترمکعب در سال است) بنابراین آبدهی متوسط حوزه سد گیلان غرب در یک دوره نرمال ۷ MCM در این شرایط خواهد شد.

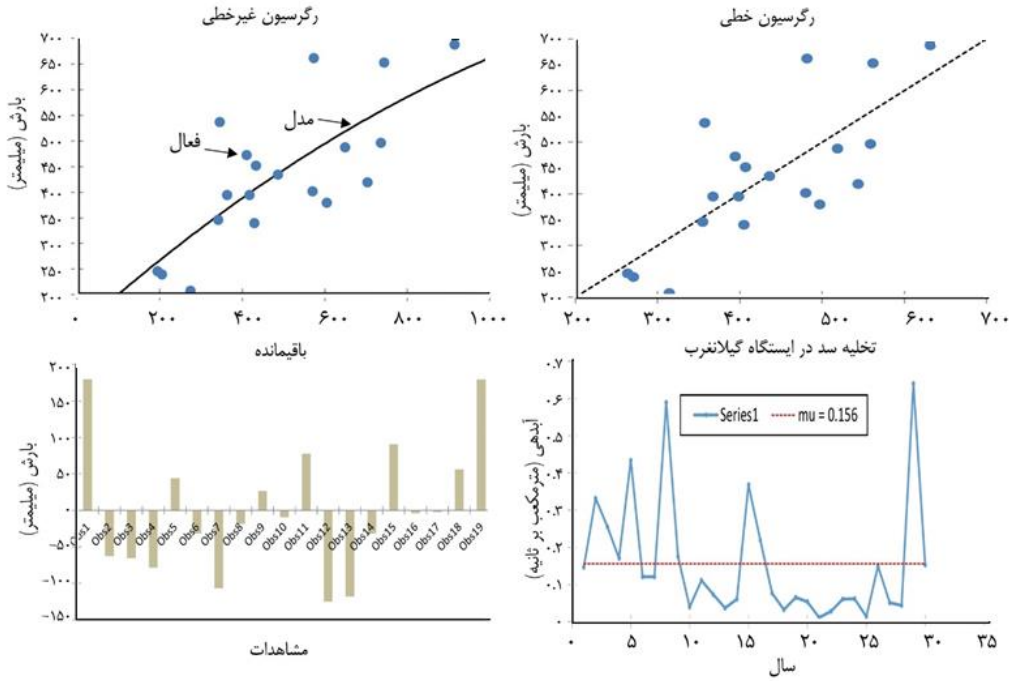
مطابق اشکال (۵) و (۶) میانگین‌های متحرک سه و پنج و هفت و نه‌ساله ۶۵ سال بارش ایستگاه گیلان غرب که از طریق همبستگی معنی‌دار با داده‌های درازمدت ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه ایجاد گردیده است. نشان‌دهنده عدم استمرار دوره‌های تر و خشک در دوره‌های ثبت داده بوده است که در شکل (۷) نشان داده‌شده است. حتی اگر فرضاً دوره بهره‌برداری از ایستگاه رودخانه گیلان غرب در محل نصرآباد آبدهی سراب گیلان غرب را نیز در دوره پرآبی سالیان گذشته قائل می‌شویم، با این مفروضات آبدهی ایستگاه ورودی سد گیلان غرب برآورد شده و با توجه به دوره خشک‌سالی‌های اخیر که میانگین متحرک بارش بیست‌ساله اخیر گیلان غرب که مؤید آن بوده و یک دوره خشک و همچنین یک دوره ترسالی را در برمی‌گیرد تعدیل می‌گردد:

سطح حوزه رودخانه گیلان غرب در محل نصرآباد و ورودی سد مخزنی به ترتیب ۷۵۴ و ۲۸۲ کیلومترمربع است، بارش سالانه در کل حوزه ۵۰۰mm و در حوزه سد گیلان غرب ۶۰۰mm در نظر گرفته‌شده است، آورد رودخانه گیلان غرب در ورودی سد مخزنی در دوره فوق‌العاده ۶ میلیون مترمکعب در سال و آورد سراب گیلان غرب ۴۰ میلیون مترمکعب در سال‌های قبل برآورد می‌گردد، همچنین با کسر ۱۰۰ کیلومترمربع (سازند سخت) آهک آسماری از حوزه آبریز که عملاً در تولید رواناب نقشی ندارد و با در نظر گرفتن عدم‌تغییر حجم مخزن آب زیرزمینی (دوره طولانی) و مصارف آب‌های سطحی و زیرزمینی و آب برگشتی ناشی از آن (بر اساس آمار و اطلاعات موجود در شرکت آب منطقه‌ای ذی‌ربط) و تخمین دبی پایه، عمل دبی برآورد شده با دبی ثبت‌شده در ایستگاه ورودی سد که حدود ۴ میلیون مترمکعب در دوره بیش از بیست‌وپنج سال آمار است منطبق است.

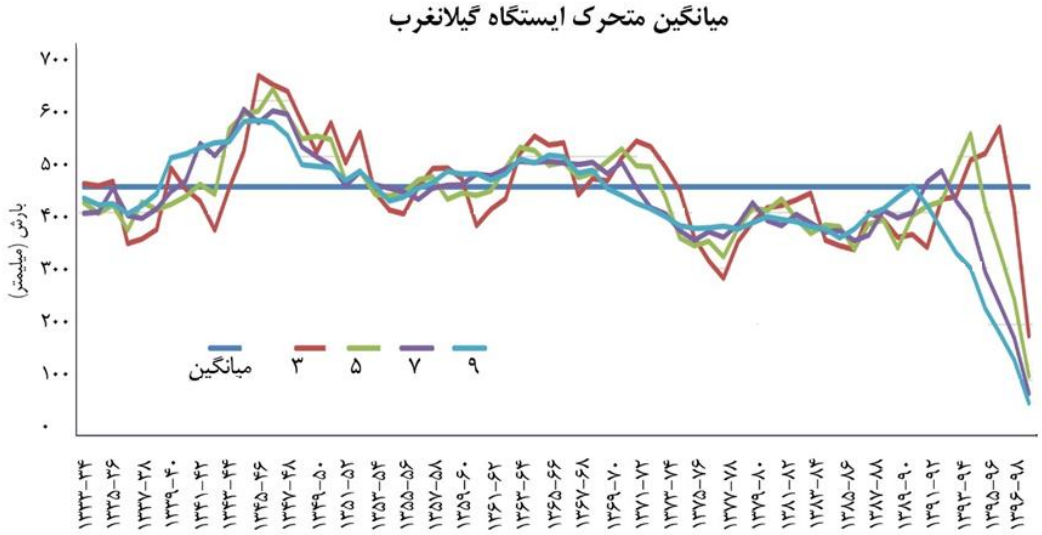
به‌منظور تحلیل بیشتر بررسی وضعیت آبدهی سد مخزنی گیلان غرب بخصوص با توجه به انجام عملیات آبخیزداری و بررسی مقدماتی تأثیر این عملیات بر آبدهی، تست پتیت در مورد سری آبدهی‌های سالانه ایستگاه ورودی سر گیلان غرب انجام گردید، نکته قابل‌توجه مصادف بودن تقریبی اثر عملیات آبخیزداری داری در حوزه آبریز سد با نقطه شکست درروند آبدهی قابل‌مشاهده است که در شکل (۸) نشان داده‌شده است.

در ادامه با توجه به دوره‌های مختلف اجرای عملیات آبخیزداری و در نظر گرفتن شرط حدی برای تأثیر این موضوع در هر زیر حوزه متناظر CN هر زیر حوزه تعدیل (جدول شماره ۴) و با استفاده از مدل Hec-Hms و هیدرو گراف‌های سیلاب ثبت‌شده و اعمال مدل در دوره‌های متناظر انجام عملیات آبخیزداری (قبل و بعد) در هر زیر حوزه و تعدیل CN در دوره مشابه با در نظر گرفتن واسنجی و اعتبار سنجی مدل،

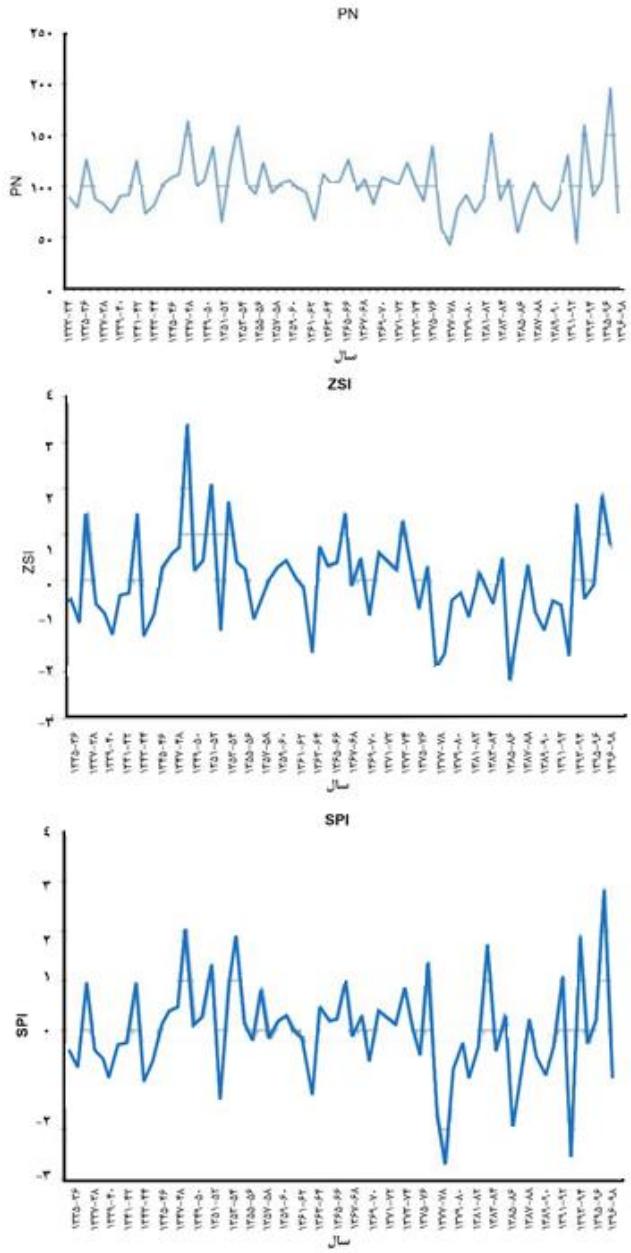
تأثیر میزان عملیات آبخیزداری محاسبه گردید که در شکل (۹) و مندرجات جدول (۶)، بایستی خاطرنشان نمود که به دلیل عدم وجود سفره‌های آب زیرزمینی در حوزه سد مخزنی دبی پایه قابل‌توجه در زمان‌های فاقد دبی سیلابی در ورودی سد وجود ندارد، به‌منظور تحلیل آماری دبی‌های سیلابی در ایستگاه ورودی سد مخزنی دبی‌های سیلابی با استفاده از نرم‌افزار Hec-Spss با احتمالات مختلف در شکل (۱۰) و (۱۱) ارائه گردیده است.



شکل ۵. همبستگی خطی و غیرخطی بین بارش ایستگاه‌های کرمانشاه و گیلان غرب



شکل ٦. میانگین متحرک ایستگاه گیلان غرب ۳، ۵، ۷ و ۹ سالانه بارش



شکل ۷. نشان‌دهنده وقوع دوره‌های تر و خشک در حوزه بوده و دوره‌های اخیر مستمراً در حوزه سد مخزنی رخ نداده است

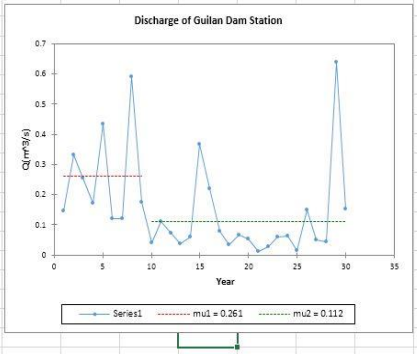
Variable	bservation	ith missin	hout miss	Minimum	Maximum	Mean	d. deviation
Series1	30	0	30	0.011	0.640	0.156	0.164

Pettitt's test (Series1):

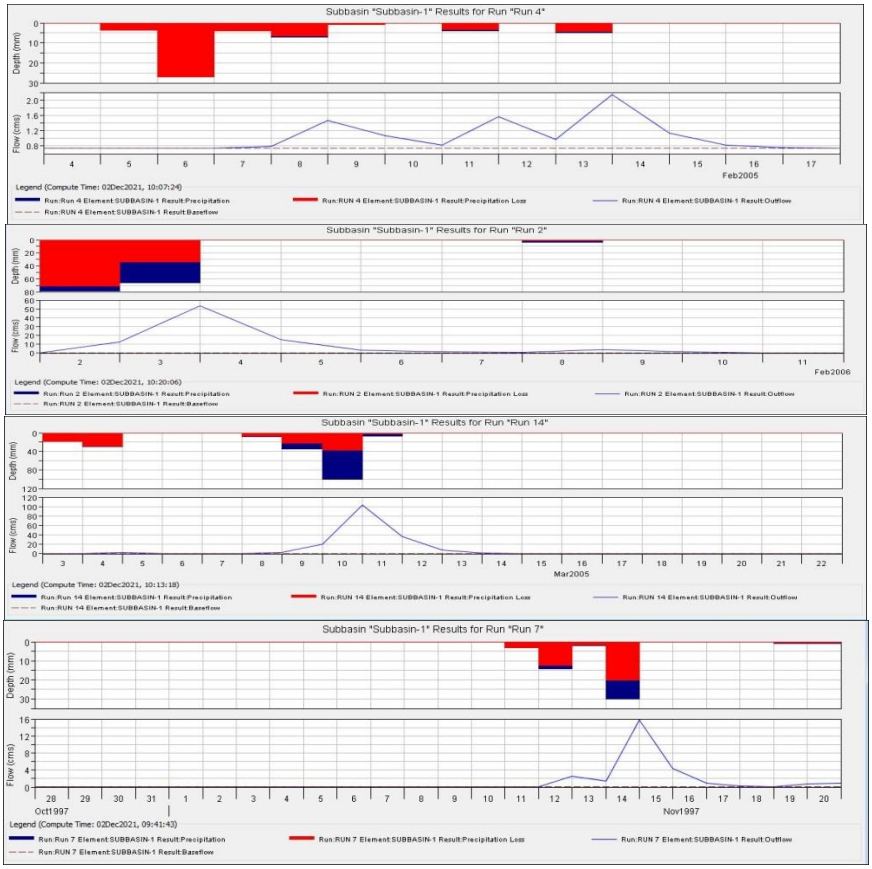
K	135.000
t	9
p-value (T	0.015
alpha	0.05

The p-value has been computed using 10000 Monte Carlo simulations. Time elapsed: 0s.
99% confidence interval on the p-value:
] 0.012; 0.018 [

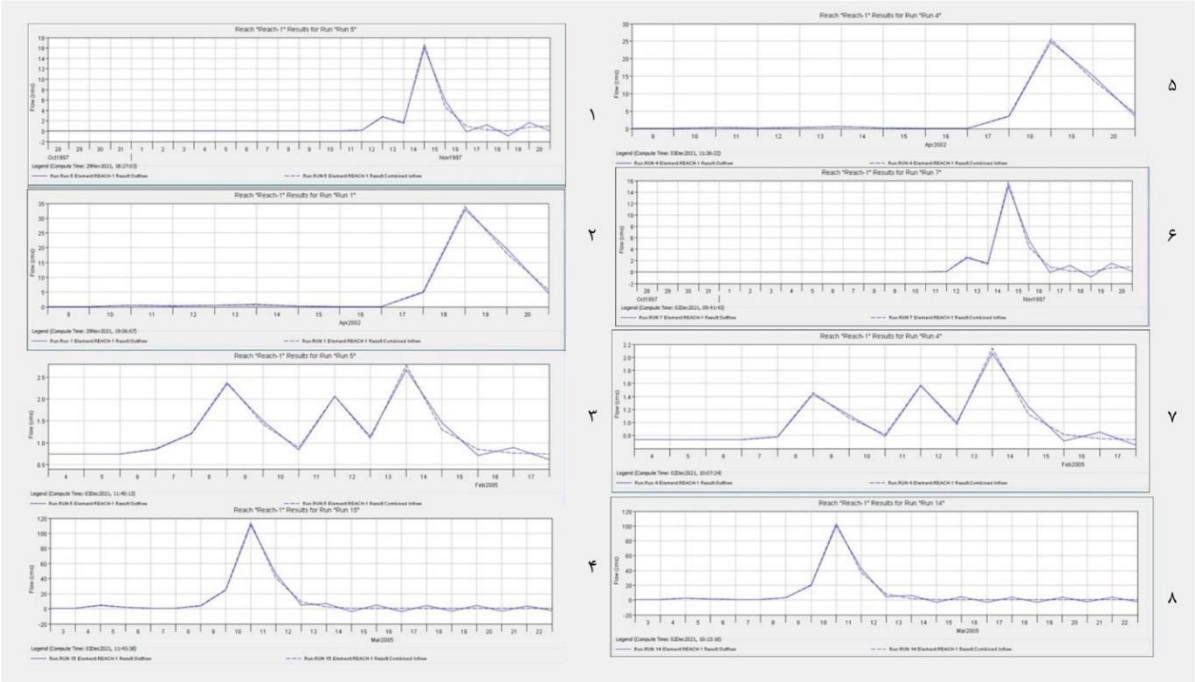
Test interpretation:
H0: Data are homogeneous
Ha: There is a date at which there is a change in the data
As the computed p-value is lower than the significance level alpha=0.05, one should reject the null hypothesis H0, and accept the alternative hypothesis Ha.
The risk to reject the null hypothesis H0 while it is true is lower than 1.52%.



شکل ۸. نتیجه اعمال تست پتیت بر آبدهی ایستگاه ورودی سد مخزنی گیلان غرب در دوره آماری ثبت‌شده



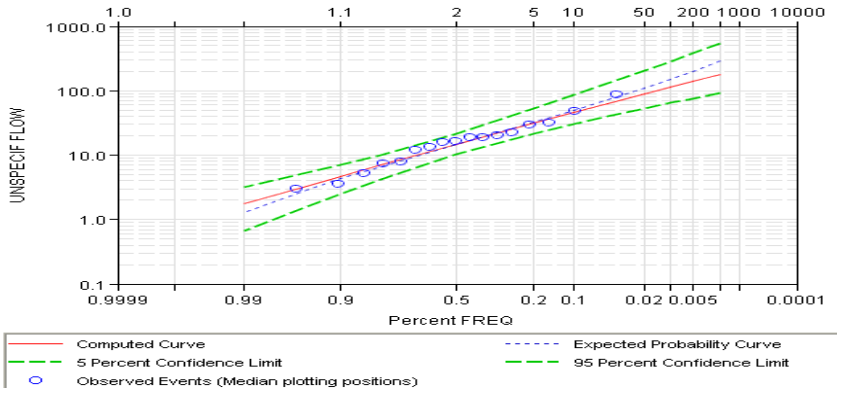
شکل ۹. نمونه‌هایی نتایج اجرای مدل Hec-Hmsبر هیدرو گراف‌های مشاهده‌ای پس از واسنجی و اعتبار سنجی در بازه رودخانه در شرایط قبل از و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری در حوزه آبریز سد مخزنی گیلان غرب



شکل ۱۰. نمونه هیدوگراف های مشاهده‌ای پس از واسنجی و اعتبار سنجی در بازه رودخانه در شرایط قبل از و بعد از اجرای عملیات آبخیزداری در حوزه آبریز سد مخزنی گیلان غرب

جدول ٦. دبی‌های پیک و حجم سیلاب قبل و بعد از عملیات آبخیزداری در حوزه مخزنی سد گیلان غرب

ردیف	زمان وقوع سیلاب تاریخی	بدون عملیات آبخیزداری حوزه		با عملیات آبخیزداری حوزه		درصد تغییرات (کاهش)	
		دبی حداکثر m^3/s	حجم (mcm)	حداکثر m^3/s	حجم (mcm)	دبی حداکثر	حجم
۱	۱۳۷۶/۸/۷ ۱۳۷۶/۸/۳۰	۱۶/۷	۲/۵	۱۲/۲	۱/۹	۲۶/۹	۲۴/۰
۲	۱۳۸۱/۱/۲۱ ۱۳۸۱/۲/۱	۳۳/۹	۵/۴	۲۵/۶	۴/۱	۲۴/۵	۲۴/۱
۳	۱۳۸۳/۱۱/۱۷ ۱۳۸۳/۱۱/۳۰	۲/۸	۱/۵	۲/۱	۱/۲۵	۲۵	۱۶/۷
۴	۱۳۸۳/۱۲/۱۳ ۱۳۸۴/۱/۲	۱۱۴/۱	۱۸/۱	۱۰۳/۴	۱۶/۱	۹/۴	۱۱/۰
۵	۱۳۸۴/۱۱/۱۳ ۱۳۸۴/۱۱/۲۳	۶۸/۷	۱۰/۷	۵۳/۵	۸/۰۲	۲۲/۱	۲۵/۰
۶	۱۳۸۷/۸/۳ ۱۳۸۷/۸/۱۴	۴۲/۷	۱۲/۷	۲۶/۸	۸/۵	۳۷/۲	۳۳/۱
۷	۱۳۹۰/۸/۲ ۱۳۹۰/۸/۱۰	۰/۲	۰/۰۴	۰/۱	۰/۰۳	۵۰/۰	۲۵/۰
۸	۱۳۹۱/۹/۳ ۱۳۹۱/۹/۸	۳۱/۳	۳/۵	۱۴/۷	۱/۷	۵۳/۰	۵۱/۴
۹	۱۳۹۲/۱۲/۱۷ ۱۳۹۲/۱۲/۲۴	۱۱/۲	۳/۰	۴/۷	۱/۲	۵۸/۰	۶۰/۰
۱۰	۱۳۹۴/۸/۱ ۱۳۹۴/۸/۱۱	۲۵/۳	۵/۳	۱۰/۹	۳/۴	۵۶/۹	۳۵/۸
۱۱	۱۳۹۷/۹/۲ ۱۳۹۷/۹/۲۹	۴۵/۵	۱۱/۷	۳۲/۹	۷/۷	۲۷/۷	۳۴/۲
۱۲	۱۳۹۷/۱۰/۵ ۱۳۹۷/۱۱/۱	۲	۰/۵	۰/۲	۰/۲	۹۰/۰	۶۰/۰
۱۳	۱۳۹۷/۱۱/۶ ۱۳۹۷/۱۱/۱۱	۲/۷	۰/۶	۰/۷	۰/۴	۷۴/۱	۳۳/۳
۱۴	۱۳۹۸/۱/۴ ۱۳۹۸/۱/۳۱	۲۴/۲	۹/۲	۱۴/۲	۶/۳	۴۱/۳	۳۱/۵
۱۵	۱۳۹۸/۲/۱۵ ۱۳۹۸/۲/۲۰	۳۷/۱	۴/۷	۱۸/۸	۲/۶	۴۹/۳	۴۴/۷



Computed Curve FLOW, UNSPECIF	Expected Probability	Percent Chance Exceedance	Confidence Limits 0.05 FLOW, UNSPECIF	0.95
178.129	286.926	0.2	537.869	93.489
138.356	197.994	0.5	379.817	76.228
112.159	148.239	1.0	284.848	64.255
89.040	109.699	2.0	207.950	53.155
62.801	71.505	5.0	129.817	39.713
45.919	49.792	10.0	85.674	30.363
31.314	32.653	20.0	52.269	21.565
14.885	14.885	50.0	21.620	10.269
6.971	6.671	80.0	10.118	4.183
4.661	4.273	90.0	7.061	2.487
3.332	2.894	95.0	5.299	1.592
1.762	1.287	99.0	3.129	0.670

شکل ۱۱. نتیجه برازش تابع توزیع فراوانی به دبی‌های حداکثر لحظه‌ای ایستگاه ورودی سد گیلان غرب در دوره ثبت آماری با استفاده از نرم‌افزار Hec-Spss

بحث

قبل از مدیریت و توسعه و بررسی و تحلیل سیستم‌های منابع آب، لازم است که زیرساخت‌های آن در قالب مطالعات پایه منابع آب مهیا بوده و با پیشرفت فناوری نسبت به ارتقاء کیفیت پایش شبکه سنجش منابع آب هم ازنقطه‌نظر کمی و هم ازنقطه‌نظر کیفی اقدام گردد. علاوه بر این لازم است روش‌های شناخت و مطالعه در قالب مدیریت دستگاهی و یکپارچه منابع آب صورت پذیرد، مطالعات توسعه‌ای بدون در نظر گرفتن مراتب بالا ممکن است موجب به هدر رفتن زمان، هزینه و فرصت‌ها شده و در زمان وقوع پدیده‌های طبیعی همچون خشک‌سالی‌ها و سیلاب و حتی تغییرات آب و هوایی مدیریت را دشوار و گاهی غیرممکن سازد.

نتیجه‌گیری

در حوزه موردمطالعه با تأسیس ایستگاه آب‌سنجی و بهره‌برداری از آن حقایق و واقعیت‌های مهمی از حوزه مشخص گردید که کاربرد روابط تجربی و ترمیم و تطویل آمار با استفاده از اطلاعات حوزه‌هایی که هیچ‌گونه وجه مشترک هیدرولوژیکی با حوضه موردمطالعه ندارد، کاری

و غیر فنی است. حوزه موردمطالعه تا سد مخزنی گیلان غرب بر اساس مستندات درگذشته و در شرایط زمانی نرمال ۷ الی ۸ میلیون مترمکعب (به‌صورت سیلاب) پتانسیل رواناب داشته که در دوره خشک فعلی (حداقل در ده سال اخیر) و اتفاقاتی که در حوزه رخداده است (عملیات آبخیزداری) از طرفی و از طرف دیگر پتانسیل فقیر آب زیرزمینی در حوزه (که موجب دبی پایه ناچیز در آن شده است) و مصارف احتمالی به‌صورت موردی، آبدهی رودخانه به کمتر از ۲ میلیون مترمکعب رسیده است. این در حالی است که بر اساس شرایط حوضه بررسی تنها در شرایطی رودخانه به آبدهی فوق‌العاده در سال‌های نرمال می‌رسد که بارش سالانه در حوزه از ۶۰۰ میلی‌متر بیشتر بوده و رگبارهایی با شدت بالا و در مدت چند روز رخ دهد که احتمال آن به‌صورت هرساله کم است. تحلیل انجام‌شده نشانگر این است که عملیات آبخیزداری به‌صورت کامل باعث کاهش آبدهی و حجم سیلاب‌های حوزه سد مخزنی گیلان غرب نگردیده است و آبدهی در دوره‌های تر و خشک به‌تناوب اتفاق افتاده و به‌صورت مستمر دوره‌ها تر یا خشک‌سالی نبوده است. حجم سیلاب و آبدهی حداکثر به‌صورت متوسط به ترتیب ۴۳ و ۳۴ درصد کاهش داشته است. خطای اتفاق افتاده از مطالعات قبلی از دسترس خارج بودن رواناب برای حداقل ۱۰۰ کیلومترمربع از حوزه آبریز که با جنس سازند کارستی (عمدتاً آهکی) بوده و به نحو پیشگیری در حوزه واقعی و حوزه توپوگرافی تأثیر گذاشته است. نتایج این بررسی نشان داد روش‌های تخمین آبدهی ورودی به مخزن سد گیلان غرب به دلیل استفاده از روابط آماری و تطویل آن نتوانسته است منطبق بر واقعیت‌های حوضه‌ای باشد و احداث این سد با هزینه‌های بالا عملاً به اهداف از پیش طراحی‌شده نرسیده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از همکاری خوب سازمان هواشناسی کشور و شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه برای در اختیار گذاشتن بخشی از آمار و اطلاعات این تحقیق سپاسگزارند.

منابع

اردلان خواه، افشین. (۱۳۹۰) شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز مرگ با استفاده از مدل HEC-Geo HMS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

آورند، رحیم.، حمادی، کاظم.، و ترابی پوده، حسن. (۱۳۸۶). مقایسه نتایج برآورد سیلاب با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-HMS وWMS در حوضه آبریز مارون. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، ایران. https://civilica.com/doc/38579

پروانه، روح‌الله. (۱۳۹۵). بررسی پتانسیل تولید رواناب و آبنمود سیل حوضه با استفاده از مدل بارش – رواناب HEC-GeoHMS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز سد مخزنی گیلان غرب). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، سنندج، ایران.

چامه، غلامرضا. (۱۳۸۹). بررسی پتانسیل تولید رواناب و آبنمود سیل حوضه با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره سو). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحدعلوم و تحقیقات، تهران، ایران.

خسروشاهی، محمد.، و ثقفیان، بهرام. (۱۳۷۳). تعیین حساسیت اثر برخی از عوامل موثر بر سیلخیزی زیرحوضه های آبخیز با استفاده از تحلیل هیدروگراف های خروجی حوضه و کاربرد مدل HEC-HMS. جنگل و مرتع (جنگلها و مراتع)، –(۶۷)،۰–۰ . https://sid.ir/paper/446941/fa

شقاقی، فرهاد. (۱۳۸۰). شبیه سازی دبی حداکثر سیلاب در شاخه های فرعی رودخانه حوضه آبخیز، محمدآباد گلستان با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

عشقی زاده، مسعود.، فاضل پور عقدا، محمدرضا.، و طالبی، علی. (۱۳۹۲). بررسی تاثیر عملیات بیولوژیکی بر رابطه بارش_رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS. نهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه یزد، یزد، ایران. https://civilica.com/doc/246595

محمودی، علی.، مشعل، محمود.، و صدقی، حسین. (۱۳۸۶). شبیه سازی و بهینه سازی آبنمود خروجی حوضه آبخیز جاجرود در باالدست سد لتیان با استفاده از مدل HEC-HMS. چهارمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/44907

موسوی ندوشنی، سید سعید.، و داننده مهر، علی. (۱۳۸۴). مدل HEC-HMS. نشر موسسه فرهنگی دیباگران. https://www.gisoom.com/book/1314552

یمانی، مجتبی.، و مهرجونژاد، اکبر. (۱۳۹۱). اثرات تغییر کاربری اراضی بر بیلان هیدرولوژیکی حوضه کردان با استفاده از مدلHEC- HMS. جغرافیا و پایداری محیط, ۲(۳), ۱۶-۱. https://ges.razi.ac.ir/article_176.html

گراوند، فاطمه.، محمدخان، شیرین.، حسینی، سید موسی.، و پیرانی، پریسا. (۱۴۰۰). ارزیابی تغییرات کاربری اراضی بر ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه و پهنه‌های سیلابی رودخانه (مورد مطالعه: حوضه کشکان در استان لرستان). پژوهش آب ایران، ۱۵(۲)، ۹۸-۸۷. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10770.html

افتخاری، رکن‌الدین.، صادقلو، عبدالرضا.، احمدآبادی، طاهره.، سجاسی، عل.، و حمدالله، قیداری. (۱۳۸۸). ارزیابی پهنه‌بندی روستاهای در معرض خطر سیلاب با استفاده از مدل HEC-GeoRAS در محیط(GIS مطالعه موردی: روستاهای حوزه گرگانرود) .توسعه محلی (روستائی- شهری) . ۱(۱). ۱۵۷-۱۸۲. https://jrd.ut.ac.ir/article_20819.html

نعیمی هوشمند، فرهاد.، احمدزاده کلیبر، فریبرز. (۱۴۰۱) شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب طراحی در حوضه آبریز آیدوغموش با استفاده از مدل HEC-HMS. علوم آب و خاک، ۲۶ (۳)، ۶۷-۵۵. http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.3.42531

References

Arekhi, S. (2012). Runoff Modeling by HEC-HMS Model, Case Study: Kan Watershed, Iran. Journal of Agriculture and Crop Sciences, 4(23), 1807-1811. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131681817

Razi, M. M., Ariffin, J., Tahir, W., & Arish, N. A. M. (2010). Flood estimation studies using hydrologic modeling system (HEC-HMS) for Johor River, Malaysia. Journal of Applied Sciences, 10(11), 930-939. https://doi.org/10.3923/jas.2010.930.939

Yusop, Z., Chan, C. H., & Katimon, A. (2007). Runoff characteristics and application of HEC-HMS for modelling stormflow hydrograph in an oil palm catchment. Water Science and Technology, 56(8), 41-48. http://dx.doi.org/10.2166/wst.2007.690

Ardalan Khah, A. (2017) Precipitation-runoff simulation in Mergh catchment using HEC-Geo HMS model. Master's thesis, Razi University, Kermanshah, Iran. [In Persian]

Avarand, R., Hammadi, K., & Torabi Poodeh, H. (2007). Comparison of the results of flood estimation using HEC-HMS and WMS software in Maron watershed. 9th National Seminar on Irrigation and Evaporation Reduction, Kerman, Iran. https://civilica.com/doc/38579 [In Persian]

Parvaneh, R. (2015). Investigating the potential of runoff production and watershed flood using the HEC-GeoHMS rainfall-runoff model (case study :Gilangreb reservoir dam watershed). Master's thesis, Islamic Azad University, Sanandaj branch, Sanandaj, Iran. [In Persian]

Chameh, Gh.L. (2010). Investigating the potential of runoff and watershed flood production using the HEC-HMS model (case study: Qarasu watershed). Master's thesis, Islamic Azad University, Faculty of Sciences and Research, Tehran, Iran. [In Persian]

Khosroshahi, M., & Saghafian, B. (1994). Determining the sensitivity of the effect of some effective factors on flooding in watershed sub-basins using the analysis of basin output hydrographs and the application of the HEC-HMS model. Forests and pastures (forests and pastures), (67), 0-0. https://sid.ir/paper/446941/en [In Persian]

Shaghaghi, F. (2001). Simulation of the maximum flood discharge in the sub-branches of the watershed river, Mohammadabad, Golestan, using the HEC-HMS hydrological model. Master's thesis, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. [In Persian]

Eshghizadeh, M., Fazelpour Eghda, M.R., & Talebi, Ali. (2012). Investigating the impact of biological operations on the relationship between precipitation and runoff using the HEC-HMS model. 9th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering, Yazd University, Yazd, Iran. https://civilica.com/doc/246595 [In Persian]

Mahmoudi, A., Meshal, M., & Sedghi, H. (2007). Simulation and optimization of water flow of Jajroud watershed upstream of Letian Dam using HEC-HMS model. 4th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/44907 [In Persian]

Mousavi Nadushni, Seyed Saeed., and Danandeh Mehr, Ali. (2005). HEC-HMS model published by Dibagaran Cultural Institute. https://www.gisoom.com/book/1314552 [In Persian]

Yamani, M., & Mehrjonezhad, A. (2012). The Effects of Land Use Change upon Hydrological Balance Components in Kordan Basin Using HEC- HMS Model. Geography and Environmental Sustainability, 2(3), 1-16. https://ges.razi.ac.ir/article_176.html?lang=en [In Persian]

Geravand, F., Mohamadkhan, S., Hosseini, S. M., & Pirani, P. (2021). Evaluating of Land Use Changes on Hydrological Characteristics of Basins and River Flood Plains (Case Study: Kashkan Basin in Lorestan Province). Iranian Water Researches Journal, 15(2), 87-98. https://iwrj.sku.ac.ir/article_10770.html?lang=en [In Persian]

Roknoddin Eftekhari, A., Sadeghloo, T., Ahmadabadi, A., & Sojasi Qidari, H. (2010). Zoning of Rural Regions in Flood Hazard with Use of HEC-GeoRAS Model in GIS Sphere (Case study: flooded villages of Gorganrud Basin). Community Development (Rural and Urban), 1(1), 157-182. https://jrd.ut.ac.ir/article_20819.html?lang=en [In Persian]

Naeimi Hoshmand, F., & Ahmadzadeh Kaleybar, F. (2022). Simulation of Design Flood Hydrographs in Aydooghmush Basin with HEC-HMS Model. Jwss, 26 (3) ,55-67. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4185-fa.html [In Persian]

Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964

The prediction of monthly rainfall in Kermanshah Synoptic Station under the social-economic scenarios of the sixth climate change report

Arina Almasi [1] , Seyed Ehsan Fatemi [2]✉, Afshin Eghbalzadeh [3]

[1] MSc. Student of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: almasiarina1998@gmail.com
[2] Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: se.fatemi@razi.ac.ir
[3] Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: afeghbal@razi.ac.ir

ABSTRACT

The current study evaluated the accuracy of general circulation models of the sixth climate change report in simulating the monthly rainfall at Kermanshah synoptic station in the studied region. In this study, the CanESM5/MRI-ESM2-0 and MIROC6 models were utilized to forecast the precipitation of the Kermanshah synoptic station at the microscale using the statistical delta change factor method. The models' accuracy has been assessed after error correction. The accuracy of the adjusted models compared to the observational data for the 1990-2014 period has been evaluated using validation indicators like root mean square error (RMSE) and Nash coefficient (NASH). The lowest average of monthly rainfall from 2026 to 2100 occurs in June, July, August, and September, while the highest precipitation is in April, March, and November across all three near-future historical periods (median and Far). In the second period (2051-2075), there are more similarities in the trend of changes in monthly rainfall. However, in the SSP126 scenario, the models MIROC6 and CanESM5 predict greater increases in precipitation for this historical period compared to the SSP245 and SSP585 scenarios, according to the MRI-ESM2-0 model.

Based on the validation criteria after bias correction, the study area's best and worst models for predicting monthly rainfall are MIROC6 and MRI-ESM2-0, with the lowest and highest errors, respectively. The Nash-Sutcliffe coefficient for the models MRI-ESM2-0, MIROC6, CanESM5 is calculated as 0.91, 0.93, 0.95, indicating the effectiveness of the delta change method in downscaling climatic parameters. The MRI-ESM2-0 model shows lower accuracy in predicting monthly rainfall in the study area, but it could yield varying results for other climate parameters and regions.

Keywords: CMIP6, Climate change, Monthly rainfall, Delta change factor method and bias correction

Article Type: Research Article
Article history: Received: 22 December 2023 **Revised:** 27 February 2024 **Accepted:** 16 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

Climate change has been a crucial environmental issue in recent years, with global warming, water crisis, and ecosystem changes drawing significant attention. Scientists have been developing various scenarios of greenhouse gas emissions to model future climate changes.
Prior research has focused on forecasting rainfall using the fifth climate change report, with little attention to the future socioeconomic impacts. This study addresses monthly rainfall prediction for the Kermanshah synoptic station using data from the sixth climate change report, considering various social and economic scenarios (J. T. S. Pedersen et al., 2022).

2. Methodology

Climate change, caused by human activities, is a widely studied topic. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is the leading authority on researching and predicting climate change, and they have developed numerous emission scenarios over the years. The challenge of addressing climate change is currently one of the most significant issues.

The Kermanshah province, located in the western part of the country, spans 24.64 square kilometers, in Iran. It stretches between the latitudes of 33° 36' to 35° 15' north and the longitudes of 45° 24' to 48° 30' east. The Kermanshah synoptic station is situated at the coordinates of 34° 21 longitudes and 47° 10 latitudes.

One challenge with using AOGCM model outputs in regional climate change studies is the mismatch in spatial scale between the model's computational cells and the study area. At the same time, regional studies need data at a resolution of 50 kilometers or less to assess the effects of climate change. The current study utilized the Delta Change Factor (DCF) method to reduce the scale of GCM model data. In CMIP6, models typically feature enhanced resolution and improved dynamic processes. The simulation of future climate changes has utilized the Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios. These scenarios, employed in CMIP6, forecast global socioeconomic changes until 2100. The study utilizes the SSP5_8.5, SSP2_4.5, and SSP1_2.6 scenarios. To assess model accuracy, RMSE (Root Mean Square Error) and NSH (Nash-Sutcliffe Efficiency) are used as indicators (Fatemi et al., 2022).

3. Results and discussion

In this study, three climate models - CanESM5, MRI-ESM2-0, and MIROC6 - were utilized to forecast monthly rainfall variability in Kermanshah synoptic station for the sixth climate change report across three future periods: 2026-2050, 2051-2075, and 2076-2100 under SSP126, SSP245, and SSP585 scenarios. The comparison of the trend of monthly rainfall changes in the corrected data indicates that the MIROC6 model predicts the median for the Kermanshah region with the least error compared to the other two models. First, the average monthly rainfall for models after correcting the error for three intervals (2050-2026), (2051-2075), and (2076-2100) was analyzed in Figure 1. As can be observed in all scenarios, there is a decreasing trend in monthly precipitation.

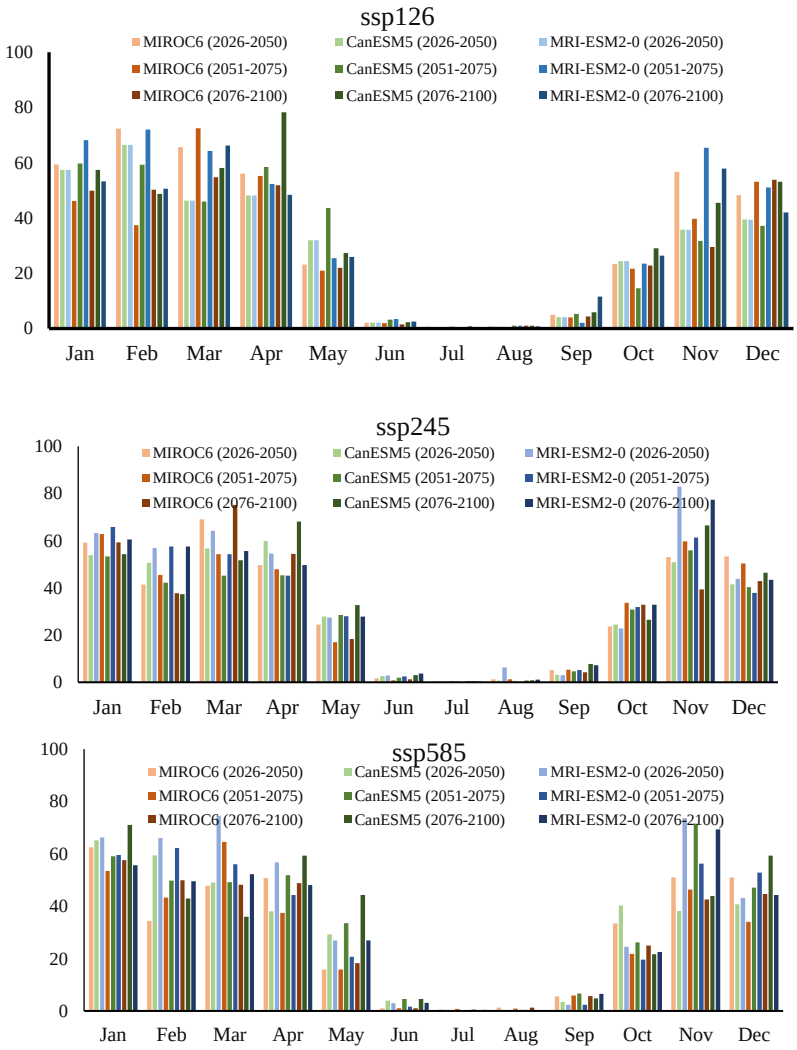


Figure 1. Monthly average rainfall for all three scenarios and mode

The lowest amount of precipitation is related to the months (June-July-August-September), while the highest amount of precipitation occurs in the months (April-March-November) across the near future, mid-term, and far future. The average rainfall in the SSP126 scenario is predicted to be higher for the MIROC6 model than for the other two models shortly (2026-2050). In the mid-term future (2051-2075), the MIROC6 model predicts less rainfall than the other two models, and in the far future (2076-2100), the CanESM5 model predicts the highest average rainfall for April. In the SSP245 scenario, shortly (2026-2050), the MRI-ESM2-0 model predicts the highest amount of rainfall for November, and the rest of the values are similar. In the mid-term future (2051-2075), the predictions of the models are almost similar, and in the far future (2076-2100), the MIROC6 model predicts the highest average rainfall for March, the CanESM5 model predicts the highest average rainfall for April, and the MRI-ESM2-0 model predicts the highest average rainfall for November. In the SSP585 scenario, shortly (2026-2050), the MRI-ESM2-0 model predicts more rainfall than the other two models. In the mid-term future (2051-2075), the CanESM5 model predicts the highest amount of rainfall for November, and in the distant future (2076-2100), the MRI-ESM2-0 model predicts the highest amount of rainfall for November, while the CanESM5 model predicts approximately the highest average predicted rainfall.

4. Conclusions

The most significant changes in monthly rainfall are expected to occur after bias correction in the first period (2026-2050) in the MRI-ESM2-0 model scenarios. The MIROC6 and CanESM5 models show similar predicted rainfall changes. In the second period (2051-2075), the trend of monthly rainfall changes for all three scenarios is more similar. However, the MIROC6 and CanESM5 models under the SSP126 scenario have predicted greater increases in rainfall compared to the SSP245 and SSP585 scenarios of the MRI-ESM2-0 model during this historical period. The MRI-ESM2-0, MIROC6, and CanESM5 models are suitable for use in the study area after bias correction, based on the validation index values for all three scenarios and models. Nonetheless, there are differences in the accuracy of the models for examining various climate change parameters and different climate regions. For instance, the MIROC6 model exhibits the highest accuracy for predicting monthly rainfall, while the MRI-ESM2-0 model has the lowest accuracy. The accuracy of the MRI-ESM2-0 model for predicting monthly rainfall in this study area is lower, but its accuracy for other climate change parameters and different regions may yield different results. The comparison of observational data and historical scenario model data in the study area for predicting future monthly rainfall shows that the best models for the study area are MIROC6 and CanESM5.

5. References

Pedersen, J. T. S., Van Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F. D., Edmonds, J., & Swart, R. (2022). IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022. Global Environmental Change, 75. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102538

Fatemi, S. E., Darabi Cheghabaleki, S., & Hafezparast Mavadat, M. (2022). The effect of preprocessing and reducing the input dimensions of the flow prediction model on optimized support vector regression by genetic algorithm. Advanced Technologies in Water Efficiency Journal, 2022, 1(1), 24-47. https://doi.org/10.22126/atwe.2021.6660.1002 [In Persian]

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank Razi University for providing the facilities to carry out the laboratory experiments of this paper

Cite this article: Almasi, A., Fatemi, S.E., & Eghbalzadeh, A. (2024). The prediction of monthly rainfall in Kermanshah Synoptic Station under the social-economic scenarios of the sixth climate change report, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1),40-64. DOI: 10.22126/atwe.2024.10245.1097

Publisher: Razi University

© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تحت سناریوهای اجتماعی– اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم

آرینا الماسی[۱]، سید احسان فاطمی[۲]✉، افشین اقبال زاده[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: almasiarina1998@gmail.com

[۲] نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: se.fatemi@razi.ac.ir

[۳] دانشیار گروه مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: afeghbal@razi.ac.ir

چکیده

تغییرات اقلیم در ایران اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده چراکه کاهش میزان بارندگی تأثیرات منفی زیادی بر مسائل زیستی و اجتماعی دارد. در این مطالعه پیش‌بینی بلندمدت بارندگی تحت سناریوهای مبتنی بر مسیرهای اجتماعی و اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه انجام شد. برای این منظور از داده‌های مدل‌های جهانی به‌ویژه Canesm5 MRI-ESM2-0, MIROC6, استفاده شد. ریزمقیاس نمایی مدل‌ها با روش تغییر عامل دلتا انجام شد. دقت مدل‌های تصحیح‌شده نسبت به داده‌های مشاهداتی برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ با استفاده از شاخص‌های میانگین مربعات خطا و ضریب نش مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند.

نتایج نشان داد که کمینه میانگین بارندگی ماهانه در بازه (۲۱۰۰-۲۰۲۶) به ترتیب مربوط به ماه‌های JUNE, JULY, AUGUST, SEPTEMBER است و بیشینه بارش به ترتیب در ماه‌های APRIL-MARCH-NOVEMBER در هر سه آینده نزدیک، میانه، دور است. برای هر سه سناریو روند تغییرات بارندگی ماهانه در دوره آتی دوم (۲۰۵۱-۲۰۷۵) شباهت بیشتری به هم دارند ولی در سناریو SSP126 مدل‌های MIROC6, CanESM5 نسبت به سناریوهای SSP245, SSP585 مدل MRI-ESM2-0 افزایش بیشتری در این دوره تاریخی برای بارندگی را پیش‌بینی کرده‌اند. با توجه به سنجه‌های صحت‌سنجی بعد از تصحیح اریبی، بهترین و بدترین مدل برای پیش‌بینی بارندگی ماهانه به ترتیب مدل MIROC6 و MRI-ESM2-0 است. ضریب نش برای مدل‌های MRI-ESM2-0, MIROC6, CanESM5 به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۹۳، ۰/۹۵محاسبه شد و حاکی از کارایی این روش در ریزمقیاس کردن بارندگی دارد. در مقایسه، مدل MRI-ESM2-0 برای پیش‌بینی بارندگی ماهانه دقت کمتری دارد اما دقت این مدل برای سایر پارامترهای اقلیمی و مناطق دیگر مطالعاتی ممکن است نتایج دیگری را نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: گزارش ششم تغییر اقلیم CMIP6، بارندگی ماهانه، ریزمقیاس نمایی، روش تغییر عامل دلتا و تصحیح اریبی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۱ دی ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۰۸ اسفند ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۲۶ اسفند ۱۴۰۲ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: الماسی، آ.، فاطمی، س.ا.، و اقبال زاده، ا. (۱۴۰۳). پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تحت سناریوهای اجتماعی– اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۶۴-۴۰، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10245.1097

ناشر: دانشگاه رازی © نویسندگان. CC BY NC

مقدمه

اقلیم[1] یک واژه عربی است که از واژه یونانی کلیما برگرفته‌شده و در زبان فارسی با اصطلاح آب‌وهوا استفاده می‌شود (علیزاده و همکاران ۱۳۷۴). اقلیم در مفهوم سطحی، اغلب به‌عنوان میانگین آب‌وهوا در یک دوره زمانی در بازه‌ی ماه‌ها تا هزاران یا میلیون‌ها سال تعریف می‌شود. معمولاً بازه زمانی پایه برای اقلیم ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شود. تابش خورشیدی از عوامل تأثیرگذار بر سیستم اقلیمی زمین است. دمای زمین تا قرن‌ها پیش ثابت بوده، به‌گونه‌ای که بیلان انرژی در حالت تعادل قرار داشته است، یعنی میزان انرژی ورودی خورشید به جو با مقدار اشعه‌های خروجی از آن در تعادل نزدیک بوده است (کوباش و همکاران[2]، ۲۰۱۳).

امروزه از تغییر اقلیم و چگونگی رویارویی با آن به‌عنوان یکی از چالش‌های پیش روی بشر می‌توان نام برد. تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین مسائل اقلیمی و محیط زیستی است که در سال‌های اخیر با توجه به مطرح‌شدن گرمایش جهانی و بحران در منابع آبی و تغییر اکوسیستم‌ها توجه بسیاری از محافل جهانی را به خود جذب کرده است. ازاین‌رو سازمان ملل برای بررسی تغییر اقلیم در سطح جهانی و تأثیر فعالیت‌های بشر بر آن نهادی را با عنوان هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم[3] تأسیس نموده است. از مهم‌ترین عوامل تغییر اقلیم و افزایش گرمای جهانی می‌توان به افزایش نشر گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های بشر اشاره نمود، دانشمندان برای پیش‌بینی اقلیم کره زمین در آینده، اقدام به ساخت سناریوهای مختلف از نشر گازهای گلخانه‌ای نموده‌اند تا بر اساس این سناریوها تغییر اقلیم را شبیه‌سازی کنند (پدرسن و همکاران[4]، ۲۰۲۲). برای ارائه برآورد از تغییرات اقلیمی، IPCC هرچند سال یک‌بار گزارش‌هایی را منتشر می‌کند که در آن‌ها مدل‌های جهانی تغییر اقلیم[5] تحت یک سری سناریوهای انتشار، برآوردی از متغیرهای اقلیمی هم در دوره پایه هم در دوره آتی منتشر می‌کند.

مدل‌های گردش عمومی به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی آب‌وهوای گذشته، حال و آینده مورداستفاده قرارگرفته‌اند، آن‌ها بر اساس قوانین اساسی فیزیک، دینامیک سیالات و شیمی و غیره ساخته‌شده‌اند. تا امروز ۶ گزارش از IPCC منتشرشده (TRA.2001,AR4.2007,AR5.2014,AR6.2018,FRA.1990,SAR.1995) که گزارش AR6 CMIP6 آخرین گزارش است.

تغییرات بارش ناشی از گرمایش هوا یکسان نیست. با تغییر مقدار بارش، مقدار برف و یخ کاهش‌یافته و سطح دریاها بالاتر آمده است. از دهه ۱۹۸۰ مناطق پربارش در هر دو نیم‌کره به سمت قطب نزدیک شده است. با استفاده از شبیه‌سازی IPCC با افزایش دما بارش تا سال ۲۱۰۰ در عرض‌های جغرافیایی بالا، بخش‌هایی از مناطق استوایی و اقیانوس آرام افزایش و در برخی مناطق نیمه گرمسیری بارش کاهش می‌یابد (آی پی سی‌سی[6]، ۲۰۲۱).

عوامل برتری گزارش ششم نسبت به گزارش پنجم عبارت‌اند از:

أ. رفع نقص‌های مدل‌های CMIP5 ازجمله تخمین ضعف واداشت تابشی و خطای سیستماتیک
ب. لحاظ کردن اندرکنش‌های اقلیمی، انسانی و زیست‌محیطی در مدل‌های CMIP6
ج. ارائه ترکیبی از سناریوهای اقلیمی RCP و سناریوهای اجتماعی-اقتصادی
د. گزارش پنجم و مدل‌های آن برحسب دریافت انرژی در سطح به‌دست‌آمده‌اند

---

[1] climate
[2] Cubasch et al
[3] Intergovernmental Panel on Climate Change
[4] Pedersen et al
[5] Global Circulation Model
[6] IPCC

علاوه بر واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ یک سری سناریوهای اجتماعی–اقتصادی SSP هم در نظر گرفته می‌شود (آی پی سی سی[1]، ۲۰۲۱).

فلاح و همکاران (۱۴۰۰)، در تحقیقی نشان دادند که آسیب‌پذیری به‌دست‌آمده از سناریوهای SSP در شرایط اقتصادی – اجتماعی نسبت به سناریوهایی که این شرایط را در نظر نمی‌گیرند، تفاوت زیادی دارد. در تحقیقات دیگری نیز به اهمیت تأثیر عوامل اجتماعی – اقتصادی بر شرایط اقلیمی در آینده اشاره شده است. از پیامدهای تغییرات اقلیم می‌توان به تغییر در چرخه‌های آبی منطقه‌ای و متعاقباً اثر بر کمیت و کیفیت منابع آب منطقه‌ای اشاره نمود شبیه‌سازی‌های اقلیمی برای قرن حاضر نشان از افزایش بارندگی در عرض‌های جغرافیایی بالا و کاهش آن در عرض‌های پایین‌تر از پهنه‌های خشک (معتدله) است (گلیگ[2]، ۱۹۸۹). یکی از راهکارها برای جبران صدمات ناشی از تغییرات اقلیم پیش‌بینی الگو و روند آن‌ها در دهه‌های آینده است. با محاسبه تغییرات اقلیم در آینده می‌توان تأثیر آن را بر محیطزیست و جامع، واکاوی نموده و جهت جلوگیری از آثار زیان‌بار آن چاره‌ای اندیشید (روان و ناظم السادات، ۱۳۹۰). مدل‌های گردش عمومی جو به‌روزترین ابزار موجود جهت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در سطح جهان هستند (ساچیندرا و همکاران[3]، ۲۰۱۸)؛ اما قدرت تفکیک مکانی پایین، درصد خطای آن‌ها را افزایش می‌دهد (تیلر و همکاران[4]، ۲۰۱۲). برای بهبود وضوح GCM ها از تکنیک مقیاس کاهی استفاده می‌شود (ویلبی و ویگل[5]، ۱۹۹۷). برای مقیاس کاهی مدل‌های GCM روش‌های دینامیکی و آماری مورداستفاده قرار می‌گیرند. مقیاس‌کاهی آماری روشی نسبتاً سریع و کارآمد برای فرموله کردن رابطه آماری بین خروجی‌های GCM و داده‌های مشاهداتی هستند. مطالعات متعددی برای ارزیابی دقت مدل‌های GCM در سطح جهان و ایران با استفاده از روش‌های مختلف مقیاس کاهی و تصحیح اریبی انجام‌گرفته‌اند (احمد و همکاران[6]، ۲۰۱۳).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مسئله تغییر اقلیم و نحوه‌ی پراکندگی آن‌که از پیامدهای فعالیت‌های بشر بشمار می‌رود، یکی از اصلی‌ترین موضوعات پژوهش‌های اخیر در حوزه‌ی اقلیم‌شناسی است. IPCC به‌عنوان مهم‌ترین مرجع پژوهش‌ها و پیش‌بینی‌های مربوط به تغییر اقلیم تاکنون چند نسل از سناریوهای انتشار را ارائه داده است. در حال حاضر یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر مسئله تغییر اقلیم و چگونگی رویارویی با این موضوع است (زرین و داداشی رودباری،۱۴۰۰).

پیش‌تر، پژوهش‌های وسیع و جامعی بر روی تغییرات میانگین عوامل مؤثر بر تغییر اقلیم مانند بارندگی و دما از دیدگاه دستیابی به نتایج آماری تغییر اقلیم در سراسر کشور صورت گرفتـه اسـت. گزیده‌ی ایـن پژوهش‌ها و سـایر تحقیقات قابل خارجی بیان می‌گردد.

کلاکی و همکاران (۱۴۰۰) شبیه‌سازی تأثیرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیم CMIP6, CMIP5 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در حوضه آبریز طشک- بختگان موردمطالعه قراردادند. در این پژوهش با اعمال شرایط تغییر اقلیم برای مدل‌های GFDL-ESM2M, IPSL-CMA5-LRتحت سناریوهای RCP2.6, RCP8.5 و مدل‌های GFDL-ESM4, IPSL-CMA6-LR تحت سناریوهایRCP1-2.6, RCP 5-8.5 در دوره آینده (۲۰۲۱–۲۰۵۰) موردبررسی قرار گرفت نتایج نشان می‌دهد که وضعیت متغیرهای اقلیمی بارش و دمای حداقل و حداکثر در شرایط تغییر اقلیم، افزایش دما (۱/۵۱–۲/۹۱ درجه سلسیوس) برای تمام مدل‌ها و سناریوها، کاهش

---

[1] IPCC
[2] Gleick
[3] Sachindra et al
[4] Taylor et al
[5] Wilby and Wigle
[6] Ahmed et al

بارش (۰/۰۵-۱۱/۱۵ درصد) را در اغلب مدل‌ها و سناریوها نشان می‌دهد. شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیک SWAT در شرایط تغییر اقلیم در هر ۴ ایستگاه تحت سناریوهای SSP کاهش رواناب و در ۳ ایستگاه تحت سناریوهایRCP افزایش رواناب را نشان می‌دهد.

جهانگیر و روزبهانی (۱۴۰۱) تخمین بلندمدت تغییرات عوامل اقلیمی ایستگاهی تحت مدل C در ایستگاه سینوپتیک بروجرد را موردمطالعه قراردادند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد که بیشترین درصد کاهش بارندگی، مربوط به ماه ژانویه در دورهٔ زمانی ۲۱۰۱-۲۱۲۱ و سناریوی RCP۸.۵، به میزان ۲۲/۰۹ درصد است. پارامتر دما در تمامی سناریوها و دوره‌های موردمطالعه در این پژوهش نسبت به دور پایه روند افزایشی داشت. بیشترین مقدار افزایش به ترتیب در داده‌های دمای حداقل مربوط به سناریوی RCP 4.5 در ماه اکتبر دورهٔ زمانی ۲۱۰۱-۲۱۰۱ و برابر با ۰/۹۱ درجه سانتی‌گراد و در داده‌های دمای حداکثر مربوط به سناریوی RCP 4.5ماه اکتبر دورهٔ زمانی ۲۱۰۱-۲۱۰۱ و برابر با ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شد. بارش دارای روند کاهشی بوده و پارامتر دما در تمامی سناریوها و دوره‌های موردمطالعه نسبت به دوره پایه روند افزایشی داشت.

عبدالعلی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه را ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، برای کل حوضه بین داده‌های تصحیح‌شده مدل‌ها و مشاهدات ایستگاهی برای دما رابطه خطی قوی و برای بارش رابطه خطی ضعیف برقرار است؛ بنابراین دقت مدل‌های موردمطالعه در شبیه‌سازی دما مناسب و در شبیه‌سازی بارش به‌ویژه در مدل CMCC-ESM2 ضعیف ارزیابی‌شده است.

اعتدالی و همکاران (۱۴۰۱) چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی بر اساس گزارش پنجم (IPCC مطالعه موردی شهر ایلام) با ۲۱ مدل CMIP۵ جهت پیش‌بینی پارامترهای بارندگی و دمای متوسط در دوره آتی از مدل ریزمقیاس ساز SDSM داده‌های هواشناسی تحت سه سناریوی RCP 4.5، RCP 2.6 و RCP 8.5مدل جفت شده‌ی جوی- اقیانوسی CanESM2 موردبررسی قراردادند. نتایج نشان می‌دهد شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۱۰۰ افزایش ۳/۷۹۸ درجه سانتی‌گراد دما و کاهش ۶/۸ درصد بارندگی و در این منطقه مطالعاتی در آینده خشک‌سالی‌های شدیدتر و طولانی‌تری را نسبت به دوره تاریخی تحت هر سه سناریوهای RCP 4.5، RCP 2.6 و RCP 8.5تجربه می‌کند.

میان‌آبادی و همکاران (۱۴۰۲) پیش‌نمایی تغییرات توزیع بارش و دما با استفاده از شبیه‌سازی اصلاح اریبی شده مدل‌های اقلیمی گزارش ششم (مطالعه موردی: ایستگاه همدیدی کرمان) برای دوره پایه (۱۹۶۵ تا ۲۰۱۴) برای بارش و دما را موردمطالعه قراردادند. بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی این دو متغیـر در سال‌های آینده (۲۰۵۱ تا ۲۱۰۰) بر مبنای سناریوهای مختلف اقلیمی (RCP 4.5، RCP 2.6 و RCP 8.5) تجربه می‌کند.

انتخاب شدند. نتایج بررسی روند تغییرات بارش و توزیع آن نشان‌دهنده مقـادیـر P-value بیشتر از ۰/۱ و میانگین و واریانس بارش مقادیر P-value کمتـر از ۰/۰۵ بـود و لـذا احتمـال افزایش وقوع بارش‌های حدی ازنظر آماری انتظار نمی‌رود؛ اما تغییرات روند، میانگین و واریـانس دمـا ازنظر آمـاری معنی‌دار بوده و احتمال وقوع تنش‌های گرمایی در آینده افزایش خواهد یافت.

زارعیان و دهبان گوهری (۱۴۰۱) دقت مدل‌هایCMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای را موردمطالعه قراردادند. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد دما و بارش کشور را دارا نیستند.

روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش را به کمک مدل‌های CMIP6 در ایستگاه ساری پیش‌بینی نمودند. نتایج به‌طورکلی نشان می‌دهد که میانگین تغییرات دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سانتی‌گراد بالاتر خواهد رفت و میانگین بارش در سال نیز در حدود ۲۴ درصد تا ۳۶ درصد بیشتر خواهد شد. نتایج آزمون شیب‌سن برای دمای حداکثر و حداقل نشان‌دهنده صعودی بودن روند این پارامتر

دارد و برای بارش روند مذکور نزولی است. تغییرات بلندمدت آب و هوایی یکی از عناصر تأثیرگذار بر منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی است که ضروری است برای حفظ زیست‌بوم و سازگاری انسان با تغییر اقلیم، توسعه استراتژی‌های مدیریتی مناسب برای آینده در نظر گرفته شود.

زرین و رودباری (۱۴۰۰) تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران را با به‌کارگیری مدل همادی CMIP6شبیه‌سازی نموده‌اند. بر اساس پیش‌بینی صورت گرفته، افزایش وقوع بارش سنگین در آینده ممکن است منجر به افزایش خطر سیل شده و دسترسی به منابع آب را نیز در ایران با مشکلاتی مواجه نماید.

اسکندری دامنه و همکاران مؤلفه‌های اقلیمی دما و بارش را در منطقه خشک دشت میناب شبیه‌سازی و پیش‌بینی نمودند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده مقادیر درجه حرارت در ابتدای قرن ۲۱ در دشت میناب افزایش پیدا خواهد کرد، ولی مؤلفه بارندگی تنها در سناریو RCP2.6 افزایش می‌یابد درحالی‌که در دوره ۲۰۴۵-۲۰۷۴ در ایستگاه سینوپتیک میناب و بندرعباس تنها در سناریو RCP2.6، شاهد کاهش دما در مقیاس سالانه است.

لطفی و همکاران (۱۴۰۰) بر اساس پیش‌بینی دماهای بیشینه با استفاده از مدل‌های تغییر اقلیم تحت سناریوهای RCP (گزارش پنجم) و ریزمقیاس سازی مدل‌های LARS-WG, SDSM در غرب کشور به این نتیجه رسیدند که طبق هر دو مدل موردمطالعه، میزان بیشینه دما در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد که این مقدار به‌طور متوسط بین ۰/۸ تا ۱/۹ درجه سلسیوس در سطح منطقه موردمطالعه خواهد بود.

ژانگ و همکاران (۲۰۲۲)[1] در تحقیقی میزان کارایی ۴۲ مدل آب و هوایی در فازِ ۶ پروژه قیاسی مدل کوپله در بازتولید میزان دما و نزولات جوی در ژینجیانگ را طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ ارزیابی کرده‌اند. نتایج این بررسی نشان داد که این مدل‌ها می‌توانند توزیع جغرافیایی قابل‌قبولی از این دو متغیر به دست آورند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در ژینجیانگ، شبیه‌سازی دمایی، مقایسه این ۴۲ مدل، میانگین حسابی و عددی مشابهی با ۲۹ مدل برتر انتخابی داشتند و از مدل‌های انفرادی بهتر عمل نمودند.

نیازکار و همکاران[2] (۲۰۲۳) از دو مدل یادگیری ماشین (ML) به نام‌های برنامه‌ریزی ژنتیکی چندژنی (MGGP) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای کاهش مقیاس خروجی‌های سه مدل گردش عمومی با استفاده از CMIP6 استفاده کردند. برآوردهای ایشان نشان داد که افزایش قابل‌توجه حداقل دمای روزانه ممکن است تابستان‌های خنک‌تری را به همراه داشته باشد، درحالی‌که کاهش اندک حداکثر دمای روزانه ممکن است منجر به زمستان‌های گرم‌تر در آینده در منطقه موردبررسی شود.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب بررسی‌های صورت گرفته در خصوص پیش‌بینی بارندگی بر اساس گزارش پنجم تغییر اقلیم انجام پذیرفته و اثرات اجتماعی- اقتصادی در سناریوهای آتی متغیرهای اقلیمی دیده نشده است. گزارش ششم CMIP6 نسبت به CMIP5 کامل‌تر شده و گزارش پنجم شامل ۴ سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای است که در گزارش ششم ۸ سناریو انتشار گاز گلخانه‌ای وجود دارد که این سناریوها نسبت به گزارش پنجم شامل بخش‌های اجتماعی-اقتصادی نیز هستند و مدل‌های انتخابی در این پژوهش با توجه به تحقیقات پیشین از بین ۱۰ مدل که هم‌دوره تاریخی هم‌دوره آتی حداقل ۳ سناریو SSP و سناریو historical را دارا هستند انتخاب‌شده است ولی همچنان به دلیل بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها باید از روش‌های ریزمقیاس نمایی برای استفاده از داده‌های گزارش ششم نیز استفاده کرد.

[1] Zhang et al
[2] Niazkar et al

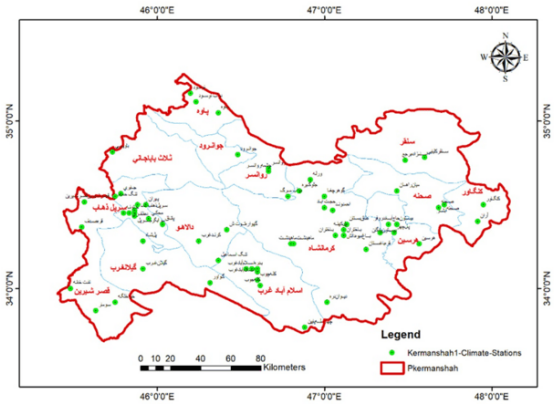
لذا در مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های گزارش ششم تغیر اقلیم به پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در سناریوهای مختلف اثرات اجتماعی و اقتصادی پرداخته‌شده است.

روش پژوهش

منطقه مطالعاتی ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در محدوده استان کرمانشاه در غرب کشور با مساحت ۲۴/۶۴ کیلومترمربع، هفدهمین استان ایران ازنظر وسعت به شمار می‌رود. این استان بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶َ° ۳۳ تا ۱۵َ° ۳۵ شمالی و طول‌های جغرافیایی ۲۴َ° ۴۵ تا ۳۰َ° ۴۸ شرقی گسترده شده و از شمال به استان کردستان، از جنوب به استان‌های لرستان و ایلام، از شرق به استان همدان و از غرب به کشور عراق محدود می‌گردد. ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در طول و عرض جغرافیایی ۲۱َ° ۳۴ و ۱۰َ° ۴۷ واقع‌شده و موقعیت آن در شکل ۱ نشان داده‌شده است. رژیم آب‌وهوایی شهرستان کرمانشاه را سیستم‌های کم‌فشار مدیترانه‌ای تشکیل می‌دهند. با استفاده از تقسیم‌بندی اقلیمی آمبرژه اقلیم‌های خشک سرد، نیمه‌خشک معتدل، نیمه‌خشک سرد و نیمه مرطوب سرد را در سطح شهرستان می‌توان مشاهده کرد. به‌طورکلی شهر کرمانشاه در اقلیم نیمه‌خشک استپی خنک قرار دارد (محمدی، ۱۳۸۱). در جدول (۱) میزان میانگین بارندگی ماهانه برای ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه برای دوره مشاهداتی ۱۹۹۰-۲۰۱۴ آمده است.

جدول ۱. مقادیر میانگین بارندگی ماهانه ایستگاه موردمطالعه

month	P_mm
Jan.	59.33
Feb	50.12
Mar	66.13
Apr	55.82
May	24.25
Jun	0.72
Jul	1.08
Aug	0.36
Sep	3.06
Oct	33.81
Nov	59.9
Dec	46.42
Ann.	401



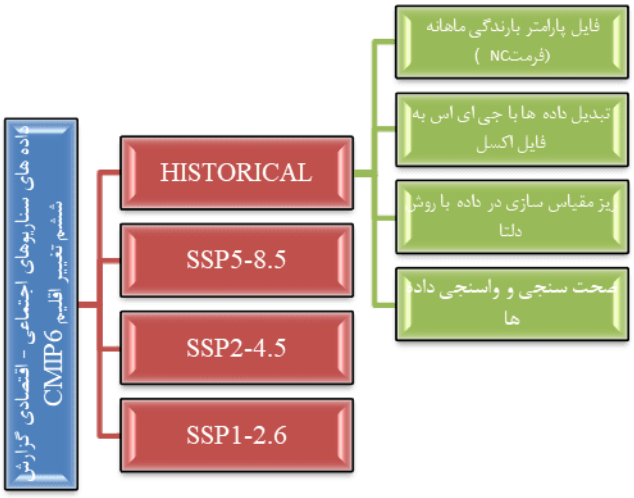
شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های موردمطالعه

در این پژوهش دقت و کارایی مدل‌های گردش عمومی جو سری CMIP6 برای شبیه‌سازی بارندگی ماهیانه منطقه موردمطالعه ارزیابی و صحت‌سنجی می‌شود. مدل‌های GCM مورداستفاده بر اساس مطالعات صورت گرفته شامل سه مدل است که مشخصات آن توسط سایت IPCC منتشرشده در جدول (۲) نشان داده‌شده است.

جدول ۲. مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو(IPCC (2022

Model ID	Institute (institution_id), country or union	Horizontal resolution (lon. × lat.)
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI), Japan	1.1 ° ∽ × 1.125°
MIROC6	MIROC, Japan	1.4° ∽ × 1.40625°
CANESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	2.8°∽ × 2.8125°

همان‌طور که در شکل (۲) روند انجام کار آمده است روش کار بدین ترتیب است که داده‌های مدل‌های GCM برای منطقه موردمطالعه استخراج‌شده و پس از ریزمقیاس سازی با داده‌های مشاهداتی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه از سال ۱۹۹۰-۲۰۱۴ مورد مقایسه قرارگرفته‌اند. دوره تاریخی انتخاب‌شده برای داده‌های مشاهداتی با توجه به اشتراک داده‌های ایستگاه هواشناسی و داده‌های مدل‌های تاریخی و سناریوهای منتخب سایت IPCC تعیین گردیده است. لازم به ذکر است آخرین دوره تاریخی مدل‌های اقلیمی در حال حاضر مختوم به سال ۲۰۱۴ می‌باشند.



شکل ۲. روند انجام مراحل تحقیق

یکی از مشکلات بزرگ برای استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM در مطالعات بررسی اثر تغییر اقلیم در سطح منطقه‌ای، بزرگ بودن مقیاس مکانی سلول محاسباتی آن‌ها، نسبت به منطقه موردمطالعه است. به‌طوری‌که داده‌های تولیدی با این مدل‌ها مربوط به‌کل کره زمین هستند و دقت مکانی آن‌ها صدها کیلومتر است اما مطالعات منطقه‌ای جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، به داده‌هایی باقدرت تفکیک کمتر از ۵۰ کیلومتر نیاز دارند. ریزمقیاس نمایی درواقع روشی برای به‌دست‌آمده داده‌هایی با تفکیک مکانی بالا از داده‌های مدل گردش عمومی جو هست که توانایی تولید داده‌های شبیه‌سازی‌شده را در مقیاس محلی ایستگاهی دارد. روش‌های مختلفی برای تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها ریزمقیاس‌سازی گفته می‌شود (سالاری و همکاران، ۱۳۹۹).

در ریزمقیاس سازی آماری بر اساس انتخاب متغیرهای پایه (داده‌های مشاهداتی یا داده‌های تاریخی مدلGCM)، روش‌ها به دودسته تقسیم می‌شوند. روش‌های اصلاح اریبیBC و روش‌های عامل تغییرCF در هردوی این روش‌ها، اریبی اطلاعات اصلاح می‌شود. در

روش‌های مبتنی بر اصلاح اریبی فرض می‌شود که تفاوت میان مدل تغییر اقلیم و داده‌های مشاهداتی در طول زمان ثابت می‌ماند و در روش‌های مبتنی بر عامل تغییر فرض می‌شود که میزان تغییر داده‌ها در پارامترهای اقلیمی مشاهداتی برابر میزان تغییر آن‌ها در مدل تغییر اقلیم است و احتمال وقوع بارش (استفنسن و همکاران[1]، ۲۰۱۲) و (وانگ و همکاران[2]، ۲۰۱۵).

[1] Stephenson et al
[2] Wang et al

در تحقیق حاضر مقیاس کاهی داده‌های مدل‌های GCM با روش تغییر عامل دلتا DCF انجام گرفت. یکی از ساده‌ترین روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری برون‌داد مدل‌های گردش کلیGCM به‌کارگیری روش دلتا DELTA یا عامل تغییرCHANGE FACTOR است. این روش برای متغیر بارش بر اساس نسبت داده مدل‌های عمومی تغییر اقلیم در دوره پایه و دوره پیش‌بینی محاسبه و در رابطه (۱) اشاره‌شده است. پس از محاسبه عامل تغییر، برای بارش عامل تغییر در مقدار بارش دوره پایه ضرب می‌شود تا مقادیر تصحیح‌شده بارش برای دوره پیش‌بینی حاصل شود. عامل تغییر دلتا و مقیاس کاهی تصحیح اریبی بارش با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$P_o^f = P_O * \frac{\mu_m^f}{\mu_m^c} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق P بارش برحسب میلی‌متر، f دوره آینده (دوره صحت سنجی)،c دوره پایه (دوره کالیبراسیون)، m داده‌های مدل،o داده‌های مشاهداتی و$\frac{\mu_m^f}{\mu_m^c}$ عامل تغییر برای بارش هستند. جهت بررسی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی اثرات آن در آینده به تولید سناریوهای اقلیمی نیاز است. برای بررسی ارتباط بین افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای که منجر به افزایش دمای سطح زمین می‌شود، وضعیت‌های احتمالی در آینده تعیین گردیده که اصطلاحاً به آن‌ها سناریوهای اقلیمی گفته می‌شود (پدرسن و همکاران، ۲۰۲۲)[1]. سناریوهای گزارش ششم که شامل ۵ زیرگروه اصلی هستند به شاخص‌های کمی (جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی منطقه‌ای و فرا منطقه‌ای و...)، سناریوهای تعمیم‌یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری)، برنامه انرژی و تغییرات کاربری اراضی و ... تأکید دارد. با توجه به اینکه گزارش ششم تغییر اقلیم شامل سناریوهای جدید سازمان‌دهی شده از مدل‌سازی اقلیمی جهان است که برای شناخت مکانیسم‌های مختلف در آب‌وهوا طراحی‌شده، مدل‌های موجود در CMIP6 به‌طورکلی وضوح بیشتر همراه با بهبود فرایندهای پویا دارند و سناریوهای انتشار مشترک اقتصادی اجتماعی SSP برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی آینده اعمال‌شده است. سناریوهای مختلف SSP به‌کاررفته در CMIP6 تغییرات اقتصادی اجتماعی جهان را تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کند. سناریوهای به‌کاررفته در این پژوهش SSP1_2.6 – SSP2_4.5 – SSP5_8.5 هستند. در نام‌گذاری سناریوهای جدید از الگوی SSPxy استفاده‌شده است. در این الگو x نشان‌دهنده گروه SSP و y نشان‌دهنده واداشت تابشی ($\frac{W}{M^2}$) در سال ۲۱۰۰ است. مطابق پژوهش‌های محققین سناریوهای فوق پرتکرارترین سناریوهای پیش‌نگری تحت شرایط تغییر اقلیم بوده‌اند (کریگلر و همکاران، ۲۰۱۸)[2].

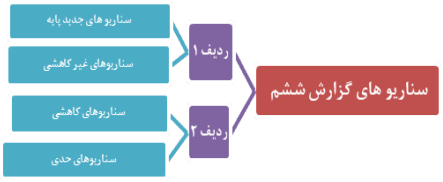
به‌طور خلاصه، سناریوهای SSPs تغییراتی که اقلیم آینده قرار است مطابق تغییرات آب‌وهوا به خود بگیرد را پیش‌بینی می‌کند. پروژه 6 CMIP دارای پنج سناریو یا SSP اصلی است.1 SSPs و 5 SSPsدر رابطه با توسعه انسانی توأم با سرمایه‌گذاری‌های عمده در بخش آموزش و بهداشت، رشد سریع اقتصادی و مؤسسات دارای عملکرد مناسب، روند نسبتاً خوش‌بینانه‌ای را نشان می‌دهند.

[1] Pedersen et al
[2] Kriegler et al

بااین‌حال 5 SSPsبر اساس یک اقتصاد بر پایه سوخت فسیلی شکل‌گرفته درحالی‌که در 1 SSPsیک حرکت افزایشی به سمت شیوه‌های پایدار مشاهده می‌شود 3 SSPsو 4 SSPsیک‌روند بدبینانه را به همراه سرمایه‌گذاری اندک در زمینه آموزش و بهداشت، رشد سریع جمعیت و نابرابری‌های فزاینده‌ای را نشان می‌دهند. در 3 SSPsکشورها امنیت مناطق را اولویت‌بندی می‌نمایند، درصورتی‌که در سناریو 4 SSPs نابرابری‌های بزرگی در داخل و سراسر کشو حاکم است. در هر دو مورد این شرایط باعث ایجاد جوامعی می‌شوند که در برابر تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر هستند. درواقع رشد تولید ناخالص داخلی در هر دو سناریو کم و در کشورهایی با درآمد بالا متمرکز است، درحالی‌که افزایش جمعیت در کشورهای کم‌درآمد و متوسط متمرکز است (گیدن و همکاران، ۲۰۱۹)[1]. سناریو 2 SSPsیک مسیر مرکزی و میانگین را ارائه می‌دهد که در آن جوامع روند الگوهای تاریخی خود را بدون انحراف قابل‌توجهی ادامه می‌دهند (اونیل و همکاران، ۲۰۱۶)[2]. در این سناریو پیش‌بینی می‌گردد، مصرف مواد غذایی، به‌ویژه فراورده‌های دامی، افزایش یابد و تولید انرژی همچنان به سوخت‌های فسیلی با همان نرخ امروزی، متکی است که در جدول (۳) به معرفی این سناریوها پرداخته‌شده است.

جدول ۳. اطلاعات مربوط به سناریوهای CMPI6

	نام سناریو	دسته واداشت	واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ (2w/m)	SSP
ردیف ۱	SSP5-8.5	زیاد	۸.۵	۵
	SSP3-7	زیاد	۷	۳
	SSP2-4.5	متوسط	۴.۵	۲
	SSP1-2.6	کم	۲.۶	۱
ردیف ۲	SSP4-6	متوسط	۶	۴
	SSP4-3.6	کم	۳.۴	۴
	SSP5-3.4-os	Over shoot	۳.۴	۵
	SSPX-Y(1-2.0)	کم	۲	۱
	ترکیبی SSP3-7	۹ عضو ترکیبی	۷	۳
	SSP5-8.5-ext	گسترش طولانی‌مدت	۸.۵	۵
	SSP5-3.4-os-ext	گسترش طولانی‌مدت	۳.۴	۵
	SSP1-2.6-ext	گسترش طولانی‌مدت	۲.۶	۱



[1] Gidden et al
[2] Oneill et al

جهت ارزیابی دقت مدل‌ها از شاخص‌های مجذور میانگین مربعات خطا RMSE و ضریب نش NSH استفاده‌شده است.

مجذور میانگین مربعات خطا RMSE به‌عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود. خطای مدل نسبت به مقدار مشاهداتی را مشخص می‌کند.

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

- ضریب نش – ساتکلیف NSH

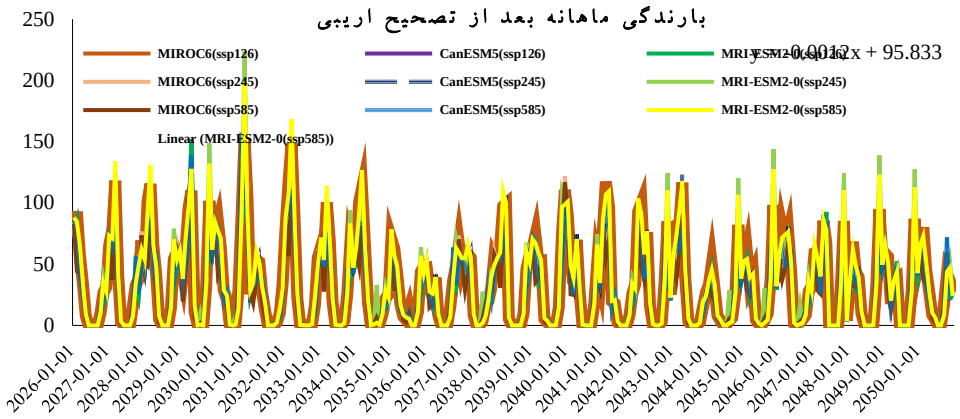
$$NSH=1-\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_O-X_M)^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_o-\bar{X}_O)^2} \quad (۳)$$

در روابط فوق X_m و X_O مقادیر مدل و مشاهداتی و N تعداد کل داده‌ها هستند.

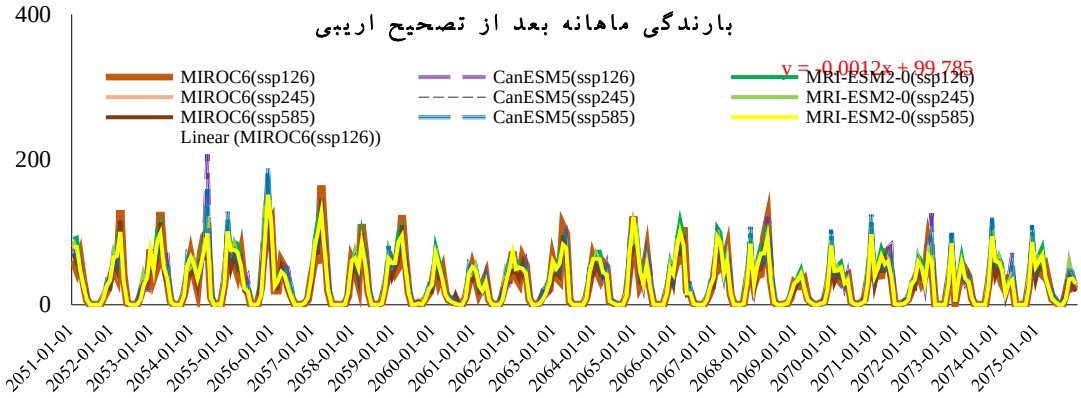
یافته‌ها

در این پژوهش برای پیش‌بینی ماهانه متغیر بارندگی از داده‌های سه مدل اقلیمی CanESM5, MRI-ESM2-0, MIROC6 در سناریوهای SSP126, SSP245, SSP585 گزارش ششم تغییر اقلیم برای سه دوره آینده پیش‌بینی (۲۰۲۶–۲۰۵۰) و (۲۰۵۱–۲۰۷۵) و (۲۰۷۶–۲۱۰۰) در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه استفاده‌شده است. لازم به ذکر است جهت مقیاس کاهی داده‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی از داده‌های دوره تاریخی (۱۹۹۰–۲۰۱۴) هر سه مدل CanESM5, MRI-ESM2-0, MIROC6 و داده‌های مشاهداتی ایستگاه موردمطالعه با استفاده از روش تغییر عامل دلتا در نظر گرفته‌شده است. نمودار بارندگی ماهانه مدل‌ها (بعد از تصحیح اریبی) حوضه موردمطالعه برای سه دوره آینده نزدیک، دور و میانه در شکل (۳) الف تا ج رسم گردیده است. مقایسه روند تغییرات بارندگی ماهانه داده‌های تصحیح‌شده در شکل (۳) نشان می‌دهد مدل MIROC6 برای منطقه کرمانشاه پیش‌بینی میانه و با خطای کمتر نسبت به دو مدل دیگر پیش‌بینی می‌کند.

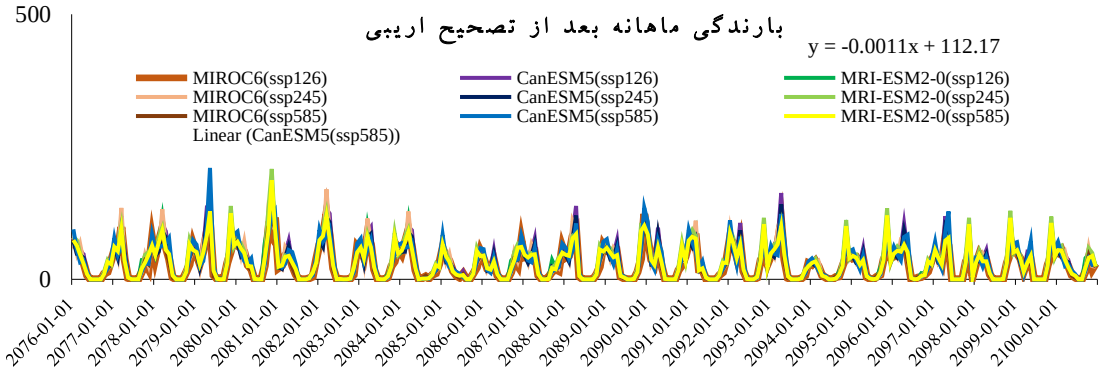
(الف)



(ب)

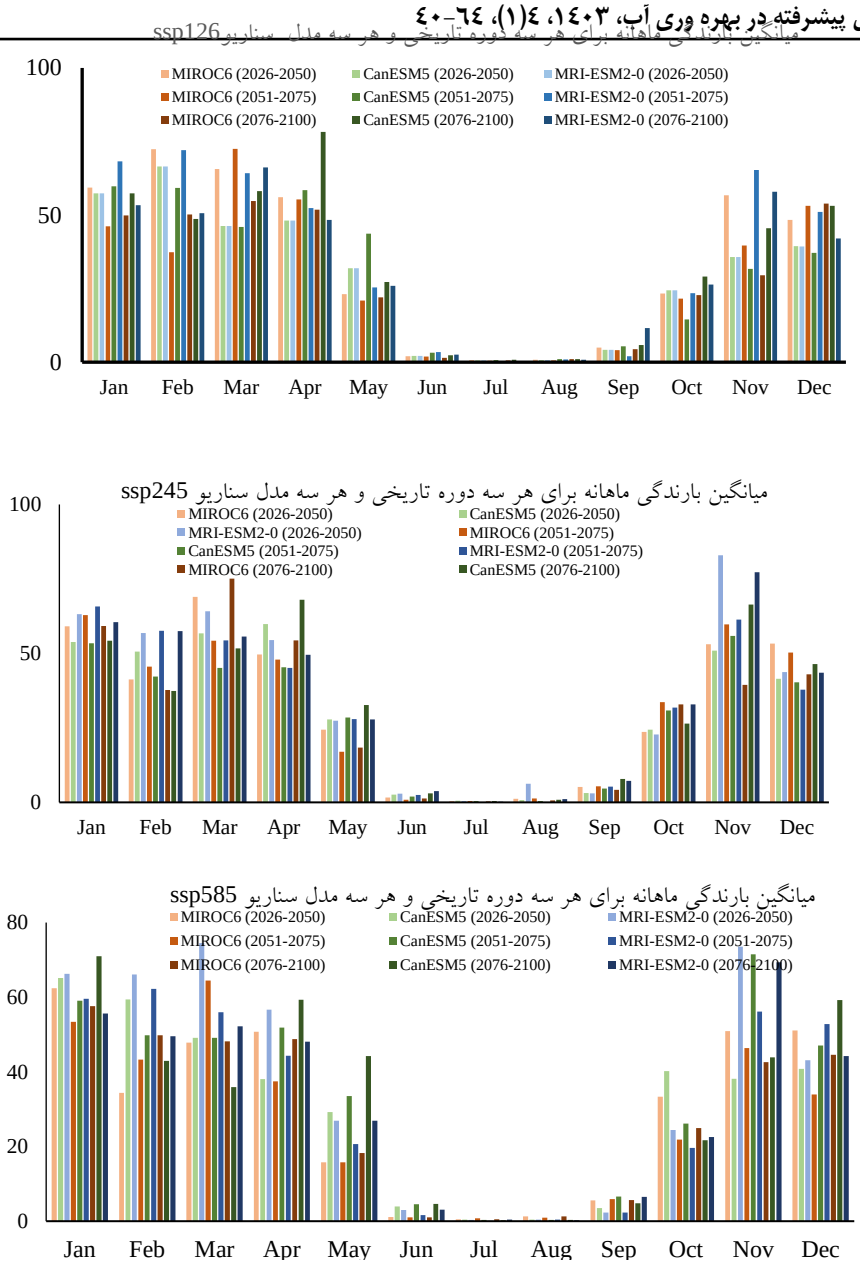


(ج)



شکل ۳. مقایسه داده‌های ماهانه بارندگی تصحیح‌شده به روش دلتا

ابتدا میانگین بارندگی ماهانه برای مدل‌ها بعد از تصحیح اریبی برای سه بازه (۲۰۵۰-۲۰۲۶) و (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در شکل (۴) موردبررسی قرار گرفت. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در تمامی سناریوها و دوره‌های موردبررسی مقادیر بارش دارای روند کاهشی است. کمینه بارش بعد از تصحیح اریبی در تمامی دوره‌ها و سناریوها مربوط به ماه‌های (June- July- August- September) و بی‌بارش در ماه‌های (April-March-November)در هر سه بازه تاریخی آینده نزدیک، میانه و دور است. با توجه به نمودارهای رسم شده میانگین بارندگی در سناریو SSP126 در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) پیش‌نگری مدل MIROC6 از دو مدل دیگر مقادیر عددی بیشتر، در آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) پیش‌نگری مدل MIROC6 از دو مدل دیگر کمتر و در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) برای ماه آوریل مدل CanESM5 بیشینه مقدار میانگین بارندگی پیش‌بینی‌شده است. میانگین بارندگی ماهانه در سناریو SSP245 در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) ماه نوامبر مدل MRI-ESM2-0 بیشینه مقدار بارندگی را دارد و بقیه مقدارها شبیه به هم هستند، در آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) پیش‌نگری مدل‌ها تقریباً همگی شبیه هستند و در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) پیش‌نگری برای ماه مارس مدل MIROC6 و برای ماه آوریل مدلCanESM5 و برای ماه نوامبر مدل MRI-ESM2-0 بیشینه میانگین بارندگی پیش‌بینی‌شده است. میانگین بارندگی ماهانه در سناریو SSP585 در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) پیش‌نگری مدل MRI-ESM2-0 بیش‌تر از دو مدل دیگر، بیشترین مقدار میانگین بارندگی ماهانه در آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) برای ماه نوامبر مدل CanESM5 و در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) برای ماه نوامبر مدل MRI-ESM2-0 و به‌طور تقریبی پیش‌بینی مدل CanESM5 پیش‌بینی‌شده است.



شکل٤. میانگین بارندگی های ماهانه هرسه سناریو و مدل

در هر سه سناریو مقادیر بیشینه و کمینه مدل‌های CanESM5,MRI-ESM2-0 MIROC6, در جدول (۴) ارائه‌شده‌اند. میانگین بارندگی ماهانه ایستگاه موردمطالعه در بازه ۲۰۲۶–۲۱۰۰ مدل MIROC6 در هر سه سناریو SSP1-2.6,SSP2-4.5,SSP5-8.5 بعد از تصحیح اریبی در بازه ۷۵.۱–۰.۳۹ قرار دارد و میانگین بارندگی ماهانه ایستگاه موردمطالعه در بازه ۲۰۲۶–۲۱۰۰ مدل CanESM5 در هر سه سناریو SSP1-2.6,SSP2-4.5,SSP5-8.5 بعد از تصحیح اریبی در بازه ۷۸/۲۴ – ۰/۲۵ قرار دارد. همچنین میانگین بارندگی ماهانه ایستگاه موردمطالعه در بازه ۲۰۲۶–۲۱۰۰ مدل MRI-ESM2-0در هر سه سناریو SSP1-2.6,SSP2-4.5,SSP5-8.5 بعد از تصحیح اریبی در بازه ۸۲/۹۲– ۰/۰۹ قرار دارد. مقادیر بیشینه و کمینه میانگین بارندگی ماهانه در مدل MIROC6 در هر سه سناریو بعد از تصحیح اریبی بیشترین شباهت را در مدل‌های بررسی دارند.

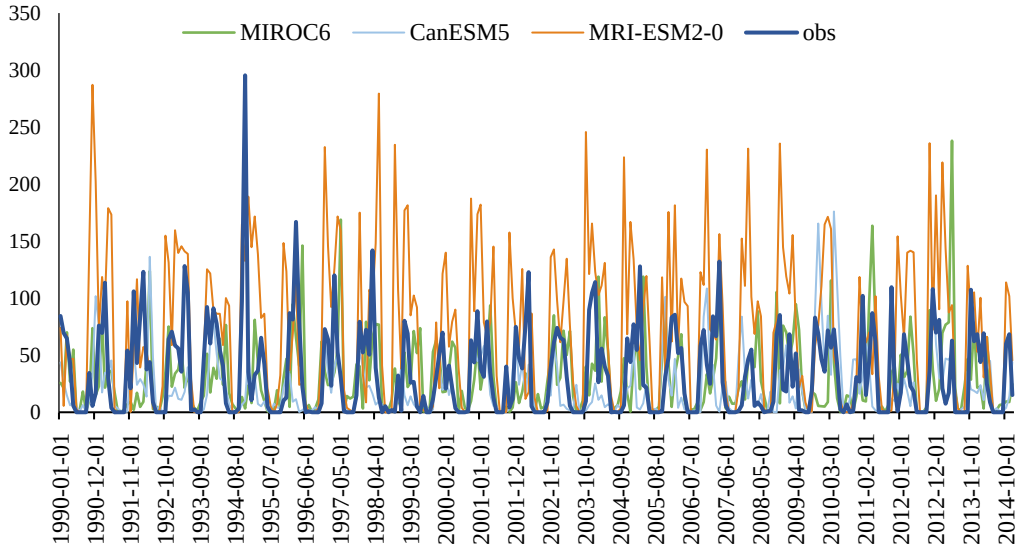
جدول ٤. مقادیر میانگین بارش ماهانه ایستگاه موردمطالعه

SCENARIO	ssp1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
MODEL	MIROC6	CanESM5	MRI-ESM2-0	MIROC6	CanESM5	MRI-ESM2-0	MIROC6	CanESM5	MRI-ESM2-0
MAX	72.52	78.24	72.06	75.1	68.03	82.92	75.1	71.05	74.47
MIN	0.44	0.6	0.15	0.39	0.4	0.11	0.39	0.25	0.09

شکل (۵) نمودار بررسی داده‌های مشاهداتی و داده‌های دوره تاریخی نمایانگر دقت بالای مدل‌های CanESM5,MIROC6 برای پیش‌نگری بارندگی ماهانه هستند. مدل MRI-ESM2-0 با داده‌های مشاهداتی (OBS) بیشترین اختلاف را برای منطقه موردمطالعه دارد پس این مدل دارای کمترین دقت برای پیش‌نگری بارندگی ماهانه هست. همچنین داده‌های تصحیح‌شده برای آینده برای هر سه سناریو و هر سه مدل در نمودار مربوط به پیش‌نگری بارندگی ماهانه برای این منطقه در شکل (۵) رسم شده است.

برای استفاده از بهترین مدل برای پیش‌نگری بارندگی ماهانه ابتدا رتبه‌بندی مدل‌های مقادیر شاخص‌های صحت سنجی بعد از تصحیح اریبی برای ایستگاه موردمطالعه در این پژوهش در جدول (۵) محاسبه گردیده است. هریک از شاخص‌های RMSE وNASH برای هر سه مدل MIROC6, CanESM5, MRI-ESM2-0 و سناریوهای SSP126, SSP245, SSP585 اندازه‌گیری شده است. مقادیر به‌دست‌آمده مربوط به شاخص‌های درستی‌سنجی به‌صورت نمودار در شکل (۶) مقایسه گردیده‌اند که نتایج ارزیابی مدل‌ها عملکرد قابل‌قبولی را برای ایستگاه موردمطالعه دارا است. کمترین مقدار شاخص RMSE مربوط به دوره (۲۰۵۰–۲۰۲۶) داده‌های بارندگی ماهانه برای مدلMIROC6 و بیشترین مقدار شاخص مربوط به مدل CanESM5 است. کمترین مقدار شاخص RMSE مربوط به دوره (۲۰۷۵–۲۰۵۱) داده‌های بارندگی

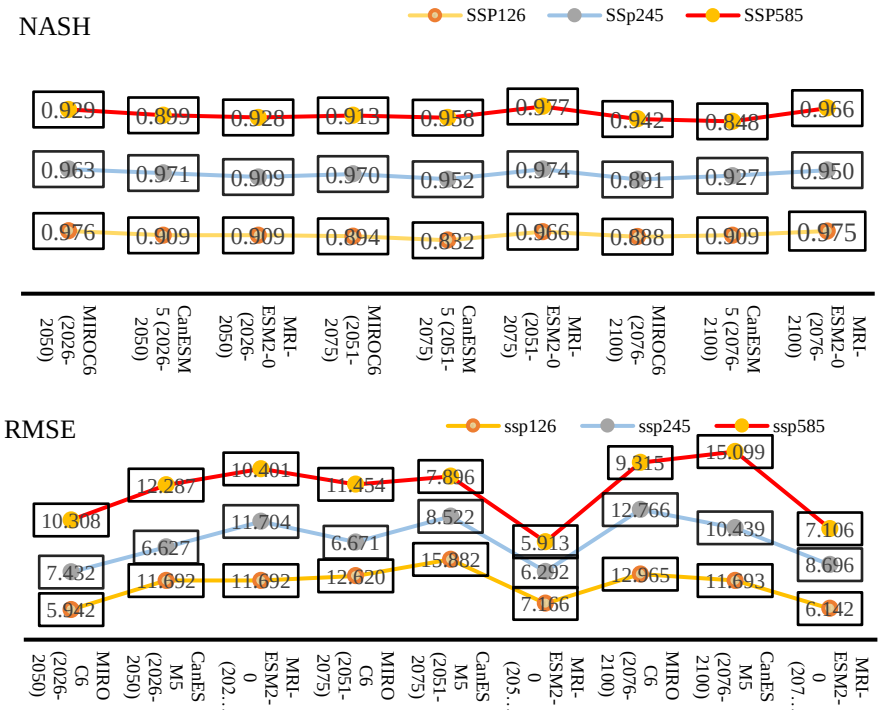
ماهانه برای مدل MRI-ESM2-0 و بیشترین مقدار شاخص مربوط به مدل CanESM5 است. کمترین مقدار شاخص RMSE مربوط به دوره (۲۱۰۰-۲۰۷۶) داده‌های بارندگی ماهانه برای مدل MRI-ESM2-0 و بیشترین مقدار شاخص مربوط به مدل CanESM5 است. کمترین مقدار ضریب نش (NSH) مربوط به دوره (۲۰۵۰-۲۰۲۶) داده‌های بارندگی ماهانه برای مدل CanESM5 و بیشترین مقدار شاخص مربوط به مدل MIROC6 است. کمترین مقدار ضریب نش (NSH) مربوط به دوره (۲۰۷۵-۲۰۵۱) داده‌های بارندگی ماهانه برای مدل CanESM5 و بیشترین مقدار شاخص مربوط به مدل MRI-ESM2-0 است. کمترین مقداری ضریب نش (NSH) مربوط به دوره (۲۱۰۰-۲۰۷۶) داده‌های بارندگی ماهانه برای مدل CanESM5 و بیشترین مقدار شاخص مربوط به مدل MRI-ESM2-0 است.



شکل ۵. نمودار بررسی داده‌های مشاهداتی و داده‌های دوره تاریخی

جدول ۵. مقادیر سنجه‌های درست سنجی

RMSE	MIROC6 (2026-2050)	CanESM5 (2026-2050)	MRI-ESM2-0 (2026-2050)	MIROC6 (2051-2075)	CanESM5 (2051-2075)	MRI-ESM2-0 (2051-2075)	MIROC6 (2076-2100)	CanESM5 (2076-2100)	MRI-ESM2-0 (2076-2100)
ssp126	5.94	11.69	11.69	12.61	15.88	7.16	12.96	11.69	6.14
ssp245	7.43	6.62	11.70	6.67	8.52	6.29	12.76	10.43	8.69
ssp585	10.30	12.28	10.40	11.45	7.89	5.91	9.31	15.09	7.10
NASH	**MIROC6 (2026-2050)**	**CanESM5 (2026-2050)**	**MRI-ESM2-0 (2026-2050)**	**MIROC6 (2051-2075)**	**CanESM5 (2051-2075)**	**MRI-ESM2-0 (2051-2075)**	**MIROC6 (2076-2100)**	**CanESM5 (2076-2100)**	**MRI-ESM2-0 (2076-2100)**
ssp126	0.97	0.90	0.90	0.89	0.83	0.96	0.88	0.90	0.97
ssp245	0.96	0.97	0.90	0.97	0.95	0.97	0.89	0.92	0.94
ssp585	0.92	0.89	0.92	0.91	0.95	0.97	0.94	0.84	0.96



شکل ٦. مقایسه شاخص‌های درست سنجی برای هر سه مدل

بحث

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین مسائل اقلیمی و زیست‌محیطی است که در سال‌های اخیر با توجه مطرح‌شدن گرمایش جهانی و بحران در منابع آبی و تغییر اکوسیستم‌ها و همچنین مشکلات اجتماعی و اقتصادی ناشی از این تغییرات، توجه بسیاری از محافل جهانی را به خود جلب کرده است. در این پژوهش از جدیدترین سناریوهای انتشار که در گزارش ششم IPCC تدوین‌شده و مطابقت بیشتری با شرایط اقلیمی زمین دارد و شامل سناریوهای اجتماعی- اقتصادی است، استفاده گردیده است. خروجی‌های مدل‌های گزارش ششم تغییر اقلیم ازنظر زمانی و مکانی بسیار بزرگ‌مقیاس هستند و در مقایسه با فرآیندهای اقلیمی و هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی مدل‌های MRI-ESM2-0, MIROC6, CanESM5 تحت سه سناریو SSP126, SSP245, SSP585 دارای عدم قطعیت می‌باشند. از روش تغییر عامل دلتا، دوره موردمطالعه سه دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۵۰) و (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در مقایسه با داده‌های تاریخی دوره (۱۹۹۰-۲۰۱۴) با داده‌های مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه پرداخته‌شده است. برای ریزمقیاس سازی مدل‌ها از روش تصحیح اریبی و روش تغییر عامل دلتا استفاده شد.

نتیجه‌گیری

نتایج بارندگی ماهانه بعد از تصحیح اریبی حاکی از آن است که کمترین میزان میانگین بارندگی ماهانه در بازه (۲۰۲۶-۲۱۰۰) به ترتیب مربوط به ماه‌های (JUNE, JULY, AUGUST, SEPTEMBER) است و بیشترین میزان بارش به ترتیب در ماه‌های (APRIL-MARCH-NOVEMBER) در هر سه بازه تاریخی آینده نزدیک، میانه، دور است. نتایج واسنجی مدل‌های تغییر اقلیم در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه برای پارامتر اقلیمی بارش نشان داد مقدار متوسط ضریب نش برای مدل‌های MRI-ESM2-0, MIROC6, CanESM5 به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۹۳، ۰/۹۵ است که حاکی از کارایی روش تغییر عامل دلتا در ریزمقیاس کردن پارامترهای اقلیمی است. بیشترین تغییرات میزان بارندگی ماهانه بعد از تصحیح اریبی در دوره آتی اول (۲۰۲۶-۲۰۵۰) را در سناریوهای مدل MRI-ESM2-0 دارد و دو مدل MIROC6, CanESM5 در روند تغییرات میزان پیش‌بینی‌شده بارندگی شبیه به یکدیگر هستند. در دوره آتی دوم (۲۰۵۱-۲۰۷۵) روند تغییرات بارندگی ماهانه برای هر سه سناریو شباهتی بیشتری به هم دارد ولی در مدل‌های MIROC6, CanESM5 سناریو SSP126 نسبت به سناریوهای SSP245, SSP585 مدل MRI-ESM2-0 افزایش‌های بیشتری در این دوره تاریخی برای بارندگی را پیش‌بینی کرده‌اند. با توجه به نتایج ارزیابی‌ها مشخص می‌گردد که مدل‌های MRI-ESM2-0, MIROC6, CanESM5 پس از تصحیح اریبی با توجه به مقادیر شاخص‌های صحت‌سنجی برای هر سه سناریو و مدل، در منطقه موردمطالعه قابل‌استفاده هستند؛ اما اختلافاتی در دقت مدل‌ها برای بررسی پارامترهای مختلف تغییر اقلیم و مناطق مختلف اقلیمی وجود دارد مثلاً بیشترین دقت برای پیش‌بینی بارندگی ماهانه مربوط به داده‌های مدل MIROC6 و کمترین دقت MRI-ESM2-0 است. دقت مدل MRI-ESM2-0 برای پیش‌بینی بارندگی ماهانه در این منطقه موردمطالعه دارای دقت کمتری هست اما دقت این مدل برای پارامترهای دیگر تغییر اقلیم و مناطق دیگر مطالعاتی ممکن است نتایج دیگری را نشان دهد. نتایج مقایسه داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل‌های سناریو تاریخی مدل‌ها در منطقه موردمطالعه برای پیش‌نگری آینده بارندگی ماهانه نشان می‌دهد بهترین مدل برای منطقه موردمطالعه MIROC6, CanESM5 است.

در اکثر مطالعات قبلی نظیر مطالعات کلاکی و همکاران (۱۴۰۰) نیز نتایج نشان داد که سناریوهای گزارش ششم نسبت به گزاراش پنجم دقت بیشتر و برای پیش‌بینی آینده اقلیم قابل استنادتر است و برای رفع عدم قطعیت‌های مدل‌های گزارش ششم روش تصحیح اریبی خطای

پیش‌بینی مدل‌ها را کاهش داده و اندازه‌گیری این خطا برای تعیین دقت مدل‌ها با شاخص‌های صحت‌سنجی انجام‌گرفته است. تحقیق حاضر تحقیقات پیشین مبنی بر پایین بودن دقت خروجی‌های مدل‌های GCM و لزوم مقیاس کاهی و تصحیح اریبی مدل‌ها را مورد تائید قرار می‌دهد. همچنین نتایج مطالعات کلاکی و همکاران (۱۴۰۰) در برآورد بارندگی حوضه آبریز طشک- بختگان نشان دادند که وضعیت متغیر اقلیمی بارش در شرایط تغییر اقلیم، کاهش بارش (۰/۰۵-۱۱/۱۵ درصد) را در اغلب مدل‌ها و سناریوها را به همراه دارد که مؤید نتایج مطالعات حاضر است.

منابع

اسکندری دامنه، حامد.، زهتابیان، غلامرضا.، خسروی، حسن.، آذرنیوند، حسین.، و براتی، علی اکبر. (۱۳۹۹). شبیه سازی و پیش‌بینی مولفه های اقلیمی دما و بارش در مناطق خشک (مطالعه موردی: دشت میناب). فصلنامه جغرافیا، ۱۸(۶۶)، ۱۲۷-۱۱۰. https://dorl.net/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6

اعتدالی، هادی.، خدابخشی، فریبا.، و کنعانی، الهه. (۱۴۰۱). چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی بر اساس گزارش پنجم (IPCC مطالعه موردی شهر ایلام). نشریه حفاظت منابع آب‌وخاک، (۴)۱۲، ۱۰۷-۸۷. https://sanad.iau.ir/Journal/wsrcj/Article/829301

جهانگیر، محمدحسین.، و روزبهانی، فاطمه. (۱۴۰۱). تخمین بلندمدت تغییرات عوامل اقلیمی ایستگاهی تحت مدل CanESM2 (مطالعهٔ موردی: ایستگاه سینوپتیک بروجرد). مجله مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۴)، ۳۷-۵۲. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.10479.1085

ذرین، آذر.، و داداشی رودباری.، عباسعلی. (۱۴۰۰). تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با به‌کارگیری مدل همادیCMIP6. نشریه آب و توسعه پایدار، (۴)۸، ۱۲۴-۱۱۹. https://dorl.net/dor/20.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9

روان، وحیده.، و ناظم السادات، سیدمحمدجعفر. (۱۳۹۰). پیش‌بینی نوسان های دما و بارش در پهنه مرکزی استان فارس برای دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۴۰ با کاربرد شبیه ECHAM5. مهندسی منابع آب، ۴(۱۰)، ۶۲-۵۱. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1390.4.10.5.5

روشنی، ادیب.، و حمیدی، مهدی. (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه ساری). مدیریت آب و آبیاری، ۱۱(۴)، ۷۹۵-۷۸۱. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603.920

زارعیان، محمدجواد.، دهبان، حسین.، و گوهری، سید علیرضا. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش ایران بر اساس تحلیل شبکه‌ای. مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۴)، ۷۸۳-۷۹۸. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.345975.1006

سالاری، صدیقه.، مقدسی، مه‌نوش.، و محمدی، قلعه نی مهدی. (۱۳۹۹). پیش‌بینی نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی در اثر تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان و درخت تصمیم (مطالعه موردی: دشت گلپایگان). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، ایران.

عبدالعلی زاده، فیروز.، محمد خورشیددوست، علی.، و جهانبخش اصل، سعید. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱)، ۱۷.۱۷-۳۰. https://doi.org/10.30488/ccr.2022.361233.1093

کلاکی، محمد فلاح.، شکری کوچک، وحید.، و رمضانی اعتدالی، هادی.(۱۴۰۰). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT مطالعه موردی. حوضه آبریز طشک-بختگان. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷(۳)، ۳۵۹-۳۴۵. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5

لطفی، محمد.، کمالی، غلامعلی.، مشکوتی، امیرحسین.، و ورشاویان، وحید. (۱۴۰۰). پیشنگری دماهای بیشینه با استفاده از مدلهای جهانی اقلیم تحت سناریوهای RCP و ریزمقیاس گردانی مدلهای LARS-WG و SDSM در غرب کشور. فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۴(۵۱)، https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1400.14.51.7.4.۱۳۰-۱۱۵

محمدی نریمان. (۱۳۸۱). مطالعات جامع توسعه اقتصادی-اجتماعی و فرهنگی استان کرمانشاه. نشر سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان کرمانشاه. https://www.lib.ir/book/64901305

میان‌آبادی، آمنه.، باطنی، محمدمهدی.، و محمدی، صدیقه. (۱۴۰۲). پیش‌نمایی تغییرات توزیع بارش و دما با استفاده از شبیه‌سازی اصلاح اریبی شده مدل‌های اقلیمی گزارش ششم (مطالعه موردی: ایستگاه همدیدی کرمان). نشریه پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی، ۱۴، ۸۴-۶۵. https://doi.org/10.30488/ccr.2023.399780.1139

References

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), 17-30. https://doi.org/10.30488/ccr.2022.361233.1093 [In Persian]

Ahmed, K.F., Wang, G., Silander, J., Wilson, A.M. (2013). Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast. Glob Planet Change, 100, 320–332. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.003

Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N., & Winther, J. G. (2013). Introduction, In: Climate Change; The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter01_FINAL.pdf

Eskandari Damane, H., Zehtabian, G., Khosravi, H., Azarnivand, H., & Barati, A. A. (2020). Simulation and forecasting of climatic components of temperature and precipitation in arid regions (Case study: Minab plain). Geography, 18(66), 110-128. https://dorl.net/dor/20.1001.1.27172996.1399.18.3.7.6 [In Persian]

Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating the Effects of Climate Change on Runoff Using the CMIP5 and CMIP6 Climate Models by SWAT Hydrological Model (Case Study: Tashk-Bakhtegan Basin). Iran-Water Resources Research, 17(3), 345-359. https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5 [In Persian]

Gidden, M., Riahi, K., Smith, S., Fujimori, S., Luderer, G., Kriegler, E., & Calvin, K. (2019). Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. Geoscientific Model Development Discussions, 12, 1443-1475. https://doi.org/10.5194/gmd-12-1443-2019

Gleick, P. H. (1989). Climate change, hydrology, and water resources. Reviews of Geophysics, 27(3), 329. https://doi.org/10.1029/RG027i003p00329.

Ho, C. K., Stephenson, D. B., Collins, M., Ferro, C. A., & Brown, S. J. (2012). Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(1), 21. https://doi.org/10.1175/2011BAMS3110.1

IPCC .(2022). Sixth Assessment Report of the Intergovermental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/

IPCC. (2021).Climate change 2021 the physical science basis, AR6, Summary for policymakers. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jahangir, M. H., & Rouzbahani, F. (2022). Long-term estimation of changes in station climate parameters under the CanESM2 model (Case study: Boroujerd synoptic station). Water and Soil Management and Modelling, 2(4), 37-52. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.10479.1085 [In Persian]

Kriegler, E., Luderer, G., Bauer, N., Baumstark, L., Fujimori, S., Popp, A., Rogelj, J., Strefler, J., Vuuren, D.P. (2018). Pathways limiting warming to 1.5°C: a tale of turning around in no time. Phil. Trans. R. Soc, A 376, 20160457. https://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0457

Lotfi, M., Kamali, Gh.A., Meshkoti, A.H., & Varshavian, V. (2021). Forecasting maximum temperatures using global climate models under RCP scenarios and micro-scale rotation of LARS-WG and SDSM models in the west of the country. Natural Geography Quarterly, 14(51), 115-130. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1400.14.51.7.4 [In Persian]

Meadarani, H., Khodabakhshi, F., & Kanani, E. (2022). The perspective of the effects of climate change on drought based on the fifth IPCC report (case study: Ilam city). Journal of water and soil resources protection, (4) 12, 87-107. https://sanad.iau.ir/Journal/wsrcj/Article/829301 [In Persian]

Mianabadi, A., Bateni, M. M., & Mohammadi, S. (2023). Projection of Change in the Distribution of Precipitation and Temperature Using Bias-Corrected Simulations of CMIP6 Climate Models (Case Study: Kerman Synoptic Station). Climate Change Research, 4(14), 65-84. https://doi.org/10.30488/ccr.2023.399780.1139 [In Persian]

Mohammadi, N. (2002). Comprehensive studies of economic, social and cultural development of Kermanshah province. Management and planning organization of Kermanshah province Publisher. https://www.lib.ir/book/64901305 [In Persian]

Niazkar, M., Goodarzi, M. R., Fatehifar, A., & Abedi, M. J. (2023). Machine learning-based downscaling: application of multi-gene genetic programming for downscaling daily temperature at Dogonbadan, Iran, under CMIP6 scenarios. Theor Appl Climatol, 151(1–2), 153–168. https://doi.org/10.1007/S00704-022-04274-3/METRICS

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Vuuren, D. P. V., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., & Meehl, G. A., (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 9 (9), 3461-3482. https://doi.org/10.5194/GMD-9-3461-2016

Pedersen, J. T. S., van Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F. D., Edmonds, J., & Swart, R. (2022). IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022, Global Environmental Change, 75. https://doi.org/ 10.1016/j.gloenvcha.2022.102538

Roshani, A., & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). Water and Irrigation Management, 11(4), 781-795. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603.920 [In Persian]

Sachindra, D. A., Ahmed, K., Rashid, Md. M., Shahid, S., & Perera, B. J. C. (2018). Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques. Atmos Res, 212, 240–258. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.022

Salari, S., Moghdisi, M., & Mohammadi Qale Ni, M. (2019). Prediction of fluctuations in underground water level due to climate change using support vector regression and decision tree models (case study: Golpayegan Plain). Master thesis, Arak University, Iran. [In Persian]

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93(4). 485–498. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Wang, L., Ranasinghe, R., Maskey, S., Van Gelder, P., & Vrijling, J. (2015). Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin, China. International journal of climatology, 36(1), 145-164. https://doi.org/10.1002/joc.4334

Wilby, R. L., & Wigle, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 21(4), 530–548. https://doi.org/10.1177/030913339702100403

Zareian, M. J., Dehban, H., & Gohari, A. (2023). Evaluation of the Accuracy of CMIP6 Models in Estimating the Temperature and Precipitation of Iran Based on a Network Analysis. Water and Irrigation Management, 12(4), 783-797. https://doi.org/10.22059/jwim.2022.345975.1006 [In Persian]

Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Technical Note: Assessing the Effect of Climate Change on Heavy Precipitation in Iran Based on a CMIP6 Ensemble Model. Journal of Water and Sustainable Development, 8(4), 119-124. https://dorl.net/dor/20.1001.1.24235474.1400.8.4.14.9 [In Persian]

Zhang, X., Hua, L., & Jiang, D. (2022). Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 15(2), 100128. https://doi.org/10.1016/J.AOSL.2021.100128

Advanced Technologies in Water Efficiency

Razi University

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Investigating the effect of different shape of polypropylene sheets on the rate of evaporation from the free surface of water

Amin Bagherzadeh Ansari [1] ,Javad Zahiri[2]✉, Adell Moradi Sabzkouhi [3], Mitra Cheraghi[4]

[1] MSc. graduated of Water Structures, Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran. E-mail: aminbansari6671@gmail.com

[2] Corresponding Author, Associate Professor, Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran. E-mail: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

[3] Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran. Email: adellmoradi@asnrukh.ac.ir

[4] Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Khuzestan, Iran. Email: cheraghi.mitra@asnrukh.ac.ir

ABSTRACT

In order to reduce the amount of evaporation from water reservoirs, various methods have been proposed, which can be divided into two physical and chemical categories. In the physical methods, by using physical coverings, such as floating balls, metal and polymer plates, or tree leaves, and by covering the water surface, evaporation waste is greatly reduced. These covers reduce a large amount of solar energy reaching the water surface and reduce vapor transmission by slowing the air flow (Zhang et al, 2017). The present study was conducted with the aim of investigating the effect of the coverage and shape of polypropylene sheets on reducing the evaporation rate and the effect of meteorological variables on the efficiency of these sheets efficiency. This research was carried out in two parts, in the first part, the efficiency of square and triangular polypropylene plates was investigated in comparison with floating balls, and in the second part, the efficiency of 100, 70, 50, and 30% coverage of polypropylene plates was evaluated.The results obtained from the tests showed that in the conditions of using floating balls, the reduction of evaporation was more intense and this coating was able to reduce evaporation to a greater extent compared to square and triangular floating plates. Also, using the square and triangular polypropylene plates and floating balls reduced evaporation by 30.71%, 14.86% and 48.7%, respectively, compared to the control pan. The results of two-way ANOVA on different meteorological variables showed that the percentage of relative humidity, which was the most important factor in evaporation from the pan, lost its significance due to the presence of floating balls and polypropylene sheets on the water surface. The comparison of rectangular covers with different densities showed that by increasing the density from 30, 50 and 70% to 100% respectively, evaporation decreases by 2.3, 1.5 and 0.8 times.

Keywords: Evaporation, Physical methods, Polypropylene plates, ANOVA.

Article Type: Research Article
Article history: Received: 16 January 2024 **Revised:** 10 March 2024 **Accepted:** 24 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

Water is considered as the main factor for the growth of agriculture and industry in arid and semi-arid regions. Improper and excessive consumption of water resources and its waste in various ways have led to the reduction of water resources. One of the most important challenges of the current century is the lack of water. This issue has affected many countries of the world and created many problems for governments and people. This problem has made the need for an optimal solution for monitoring and managing water resources to be more attention. Water is a limiting resource due to rapid population growth and climate change, especially in arid and semi-arid regions. The annual evaporation rate in the Karun River basin has been measured as 1521 mm, which directly evaporates several billion cubic meters of water annually from the entire surface of the reservoirs of this river. Accordingly, in this research, an attempt has been made to investigate the rate of evaporation from the free surface of water using different shape of polypropylene plates. Floating balls were used to evaluate the performance of polypropylene sheets. In addition to the effect of the shape of the polypropylene plates, the density of the plates has also been evaluated on the rate of evaporation from the water surface.

2.Methodology

The present study was conducted to investigate the effect of the amount of coverage and shape of polypropylene sheets on the reduction of evaporation and the effect of meteorological variables on the efficiency of these sheets. Experiments related to this research were carried out at Ahvaz Airport meteorological station located in Ahvaz city. Ahvaz is the capital of Khuzestan province with a hot and dry climate, which is located in the southwest of Iran along the Karun River, the largest river in Iran, at 31° 20' N and 48° 40' E latitude and 16 meters above sea level. The annual average rainfall is 202.5 mm and the average minimum temperature is 19.2 and maximum temperature is 33.4 °C. Along with polypropylene sheets, floating balls, which are among the common methods to reduce evaporation from the water surface, were used as a measure to evaluate the efficiency of polypropylene sheets. The diameter of the balls was 10 cm, made of PVC and 200 balls were used in one pan. In this research, polypropylene sheets with square and triangle geometric shapes, 10 cm in size and 100%, 70%, 50% and 30% coverage were used. Two-way analysis of variance was used to investigate the effect of different meteorological variables on the performance of

polypropylene sheets in this study. In this study, this analysis was used to investigate the effects of independent variables on the dependent variable. The independent variables in this research include different meteorological variables such as temperature, relative humidity percentage, average vapor pressure, wind speed and solar radiation, and the dependent variable of evaporation was considered in different treatments. To perform two-way analysis of variance, the dependent variables should have an approximately normal distribution.

3.Results and discussion

The results of two-way analysis of variance (ANOVA) to investigate the effects of different meteorological variables on the rate of evaporation from the free surface of water showed that the effect of temperature and relative humidity variables on the rate of evaporation is significant. The Partial Eta Squared coefficient of relative humidity had the highest value, which showed that different levels of relative humidity have the largest changes on the amount of evaporation from the free surface of the pan. The results of two-way ANOVA to investigate the effects of different meteorological variables on the rate of evaporation from the free surface of water in the pan containing floating balls showed that none of the meteorological variables was significant on the rate of evaporation from the pan containing floating balls. In other words, the presence of floating balls reduced the impact of changes in meteorological variables on the rate of evaporation. Meanwhile, the results of two-way ANOVA related to square composite plates showed that in the presence of polypropylene plates, the temperature variable had a significant effect on the rate of evaporation. Comparing the results of the two methods of floating balls and polypropylene plates with the control pan showedthat the percentage of relative humidity, which is the most important factor in evaporation from the control pan, has lost its significance due to the presence of elements on the water surface. The investigation of different methods of reducing evaporation showed that the use of square floating plates, triangular floating plates and floating balls reduced the evaporation from water surface about 30.71%, 14.86% and 48.7% comparing to control pan, respectively. According to the measurements, the control pan, triangular floating plates, square floating plates and floating balls have the highest evaporation rate. The results of one-way analysis of variance to investigate the effect of different densities of polypropylene sheets on the rate of evaporation from the free surface of water showed that there was a significant difference between all the coverages used.

4.Conclusions

The results of two-way variance analysis to investigate the effects of different meteorological variables on the rate of evaporation from the free surface of water showed that the variables of temperature and relative humidity were significant on the rate of evaporation in the control pan. This is despite the fact that none of the meteorological variables were significant on the rate of evaporation from the pan containing floating balls. In other words, the presence of floating balls reduced the effect of changes in meteorological variables on the rate of evaporation. In addition, in the presence of polypropylene sheets, only the temperature variable had a significant effect on the rate of evaporation. Comparing the results of the two methods of floating balls and polypropylene plates with the control pan showed that the percentage of relative humidity, which is the most important factor in evaporation from the control pan, has lost its significance due to the presence of elements on the water surface. Examining the different treatments investigated showed that the use of square and triangular floating plates compared to the control pan caused a reduction of 30.71% and 14.86% of evaporation from the pan, respectively. The reason for the difference between the two cover was related to more free space between the triangular elements compared to the square elements, although we tried to make the covers 100%. The comparison of rectangular covers with different densities showed that by increasing the coverage level from 30%, 50% and 70% to 100%, evaporation decreases by 2.3, 1.5 and 0.8 times, respectively.

5. References

Zhang, H., Gorelick, S. M., Zimba, P. V., & Zhang, X. (2017). A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. Journal of Hydrology. 555, 213-227. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.007

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Bagherzadeh Ansari, A., Zahiri, J., Moradi Sabzkouhi, A., & Cheraghi, M. (2024). Investigating the effect of different shape of polypropylene sheets on the rate of evaporation from the free surface of water, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 65-81. DOI: 10.22126/atwe.2024.10419.1118

Publisher: Razi University

© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

بررسی تأثیر شکل صفحات پلی‌پروپیلن بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب

امین باقرزاده انصاری[۱]، جواد ظهیری[۲]✉، عادل مرادی سبزکوهی[۳]، میترا چراغی[۴]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: aminbansari6671@gmail.com

[۲] نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

[۳] استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: adellmoradi@asnrukh.ac.ir

[۴] استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mitra@asnrukh.ac.ir

چکیده

در حال حاضر جهت کاهش میزان تبخیر از مخازن آب روش‌های مختلفی ارائه گردیده است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته فیزیکی و شیمیایی تقسیم‌بندی کرد. در روش فیزیکی با به‌کارگیری پوشش‌های فیزیکی ازجمله توپ‌های شناور و صفحات فلزی و پلیمری و یا برگ‌های درختان و با پوشاندن سطح آب، هدرروی تبخیر به میزان زیادی کاهش می‌یابد. این پوشش‌ها مقدار زیادی از انرژی خورشیدی که به سطح آب می‌رسد را کاهش داده و با کند کردن جریان هوا، انتقال بخار را کاهش می‌دهند. پژوهش حاضر باهدف بررسی تأثیر میزان پوشش و شکل صفحات پلی‌پروپیلن بر کاهش میزان تبخیر و تأثیر متغیرهای هواشناسی بر کارایی این صفحات صورت پذیرفت. این تحقیق در دو بخش صورت پذیرفت که در بخش اول کارایی صفحات مربع و مثلث پلی‌پروپیلن در مقایسه با توپ‌های شناور موردبررسی قرار گرفت و در بخش دوم راندمان پوشش‌های ۱۰۰، ۷۰، ۵۰ و ۳۰ درصدی صفحات پلی‌پروپیلن ارزیابی شد. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان داد که در شرایط استفاده از توپ‌های شناور میزان کاهش تبخیر از شدت بیشتری برخوردار بوده و این پوشش توانست تبخیر را در مقایسه با صفحات شناور به شکل مربع و مثلث به میزان بیش‌تری کاهش دهد. بررسی اختلاف بین تیمارهای مختلف موردبررسی نشان داد که کاربرد صفحات مربع و مثلث پلی‌پروپیلن و توپ‌های شناور به ترتیب باعث کاهش ۳۰/۷۱ درصدی، ۱۴/۸۶ درصدی و ۴۸/۷ درصدی تبخیر نسبت به تشت شاهد گردید. نتایج تحلیل واریانس دوطرفه بر روی متغیرهای مختلف هواشناسی نشان داد که درصد رطوبت نسبی که مهم‌ترین عامل در تبخیر از تشت شاهد بوده است، با حضور توپ‌های شناور و صفحات پلی‌پروپیلن در سطح آب، معناداری خود را ازدست‌داده است. مقایسه پوشش‌های مستطیلی شکل با تراکم‌های مختلف نشان داد که با افزایش درصد پوشش به ترتیب از ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد به ۱۰۰ درصد باعث کاهش تبخیر به میزان ۲/۳، ۱/۵ و ۰/۸ برابر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر، روش‌های فیزیکی، صفحات پلی‌پروپیلن، تحلیل واریانس.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۲۰ اسفند ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۰۵ فروردین ۱۴۰۳ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: باقرزاده انصاری، ا.، ظهیری، ج.، مرادی سبزکوهی، ع.، و چراغی، م. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر شکل صفحات پلی‌پروپیلن بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۸۱-۶۵. شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10419.1118

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

CC BY NC

مقدمه

آب به‌عنوان اصلی‌ترین عامل رشد کشاورزی و صنعت در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. مصرف نادرست و بیش‌ازحد منابع آب و هدر رفت آن از راه‌های مختلف منجر به کاهش منابع آبی گردیده است (قزوینیان و همکاران، ۱۳۹۹). یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر کمبود آب به‌حساب می‌آید. این مسئله بسیاری از کشورهای جهان را در برگرفته و معضلات بسیاری را برای دولت‌ها و مردم ایجاد نموده است. همین مسئله باعث شده است تا نیاز به یک راه‌حل بهینه جهت پایش و مدیریت منابع آبی بیش‌ازپیش موردتوجه قرار گیرد (ژانگ و همکاران[1]، ۲۰۱۷). آب به دلیل رشد سریع جمعیت و تغییرات آب و هوایی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یک منبع محدودکننده است (چودهاری و ال-زهرانی[2]، ۲۰۱۵; حمادی[3]، ۲۰۲۰ و مورسی و همکاران[4]، ۲۰۲۱) و پیش‌بینی می‌شود گرمایش جهانی با تأثیرات نامطلوب آن بر دسترسی به آب تأثیر یابد (حقیقی و همکاران[5]، ۲۰۱۸; عبدالله[6]، ۲۰۲۰ و چودهاری و همکاران، ۲۰۱۶). جهان برای استفاده بهینه از منابع آب به دلیل افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، تحت‌فشار است. به‌عنوان‌مثال، در استرالیا، میزان تبخیر ۲ متر در سال و میانگین بارندگی ۵۰۰ میلی‌متر در سال است (کریگ[7]، ۲۰۰۵). در چنین گرمایی، حدود ۹۵ درصد از بارندگی قبل از اینکه به زمین برسد تبخیر می‌شود. مطالعات نشان داده است که بیش از نیمی از آب انباشته‌شده در پشت سدها و مخازن کوچک به دلیل تبخیر از بین می‌رود (کریگ، ۲۰۰۵). در مناطق گرم و خشک، از دست دادن آب مخازن به‌اندازه‌ای چشمگیر است که حتی می‌تواند اثرات مثبت ذخیره آب در پشت سدها را کم اثر یا بی‌اثر کند (یانگ و همکاران[8]، ۲۰۱۷ و ژائو و گائو[9]، ۲۰۱۹).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

کشور ایران در منطقه خشکی از جهان با نزولات جوی اندک واقع شده است. میانگین بارندگی سالانه ایران حدود ۲۲۲ میلی‌متر بوده درحالی‌که میزان متوسط بارندگی سالانه در سطح خشکی‌های کره زمین تقریباً ۸۶۰ میلی‌متر تخمین زده‌شده و درنتیجه بارندگی در ایران از یک‌سوم میزان بارندگی متوسط در سطح دنیا کمتر است (علیزاده، ۱۳۹۴). منابع آب تجدید پذیر ایران حدود ۱۰۵ میلیارد مترمکعب است که ۰/۳ درصد از کل آب‌های شیرین جهان را شامل می‌شود، درحالی‌که وسعت سرزمین ایران حدود ۱/۱ درصد از وسعت جهان بوده و سرانه آب تجدید پذیر کشور ۱۳۰۰ مترمکعب است (سپاسخواه، ۱۳۹۷). میزان تبخیر در نواحی مختلف ایران متفاوت اما تا ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است. به‌عنوان‌مثال میانگین تبخیر در شهرهای اهواز، اصفهان، بندرعباس، تهران و زابل به ترتیب برابر با ۳۴۰۰، ۲۶۰۰، ۳۵۰۰، ۲۴۰۰ و ۴۵۰۰ میلی‌متر در سال گزارش‌شده است (نجاتیان، ۱۳۹۹). این ارقام نشان می‌دهد که اگر با روش‌هایی میزان تبخیر مخازن سدها کاهش یابد، می‌توان از این منابع بهره‌برداری مناسب‌تری نمود. به‌طور مثال وسعت مخزن سد کارون ۳ در حوضه آبریز کارون بزرگ ۶۹۰۰ هکتار بوده و میانگین تبخیر سالانه این حوضه ۱۸۲۴ میلی‌متر است. بدین ترتیب سالانه حدود ۱۲۶ میلیون مترمکعب آب از مخزن این سد تبخیر می‌شود که نسبت به حجم مخزن ۳ میلیارد مترمکعبی آن حدود ۴/۲ درصد خواهد بود (سپاسخواه، ۱۳۹۷). به دلیل قرار گرفتن ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، کشور ما به‌صورت طبیعی همواره با کمبود آب مواجه است و در زمره کشورهایی با محدودیت منابع آبی قلمداد می‌شود. عدم توجه به نرخ بالای تبخیر در کشور سبب شده که هرساله میلیاردها مترمکعب آب از مخازن بیش از ۶۰۰ سد موجود در کشور تبخیر شود. میزان متوسط تبخیر سالانه در ایران ۲۱۰۰ میلی‌متر بوده که سه برابر میزان متوسط جهانی است (مظفری و همکاران[10]، ۲۰۱۹). متوسط تبخیر از مخازن سدها به‌صورت میانگین حدود ۱۰ درصد حجم مفید آن‌ها برآورد شده است که با در نظر گرفتن حدود ۳۵ میلیارد مترمکعب به‌عنوان حجم مفید کل مخازن سدهای در حال بهره‌برداری کشور، سالانه ۳/۵

---

[1] Zhang et al
[2] Chowdhury and Al-Zahrani
[3] Hammadi
[4] Morsy et al
[5] Haghighi et al
[6] Abdallah
[7] Craig
[8] Yang et al
[9] Zhao, G. and Gao
[10] Mozafari et al

میلیارد مترمکعب تلفات ناشی از تبخیر خواهد بود (سپاسخواه، ۱۳۹۷). ازاین‌رو، کنترل شدت تبخیر از سطوح مخازن یکی از روش‌هایی است که می‌تواند کمک شایانی در حفظ و تأمین منابع آب مناطق گرمسیری با پتانسیل تبخیر بالا بنماید (مددی و همکاران، ۱۳۹۹).

مخازن آبیاری نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی و مدیریت آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک دارند (رضازاده و همکاران[1]، ۲۰۲۰.، و ژائو و گائو[2]، ۲۰۱۹). در سراسر جهان، نزدیک به ۱۶/۷ میلیون مخزن با مساحت متوسط ۱۰۰ مترمربع وجود دارد (لهنر و همکاران[3]، ۲۰۱۱). بااین‌حال، به‌ویژه در مناطق خشک مقادیر قابل‌توجهی از آب مخازن از طریق تبخیر از دست می‌رود (السیبای و همکاران[4]، ۲۰۱۷.، و علم و الشایخ[5]، ۲۰۱۳) که معادل ۲۵ درصد از مصرف جهانی آب شیرین (کشاورزی، صنایع و خانوارها) است (هوقبوم و همکاران[6]، ۲۰۱۸). چنین تخمین زده شده است که در مناطق خشک ممکن است تا نیمی از ظرفیت مخازن در اثر تبخیر از بین برود (کریگ، ۲۰۰۵.، آسولین و نارکیس[7]، ۲۰۲۱.، آسولین و همکاران[8]، ۲۰۱۱.، روست و همکاران[9]، ۲۰۰۸.، و فریدریچ و همکاران[10]، ۲۰۱۸). بر اساس مطالعات سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ایران در بین ۱۱۲ کشور ازنظر بحران آب در رده ۱۱ قرار دارد که نشان‌دهنده وضعیت نامناسب ایران ازلحاظ منابع آبی است. بر این اساس ایران باید در سال ۲۰۲۸ جهت حفظ شرایط موجود ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید که این افزایش می‌تواند از راه‌های مختلفی از قبیل افزایش راندمان آبیاری و کاهش تبخیر صورت پذیرد. به‌جز نواحی محدودی از ایران در حاشیه دریای خزر، در سایر مناطق مقدار بارندگی به‌مراتب کمتر از تبخیر است. به‌عنوان‌مثال توان تبخیری نیوار در یزد و مناطق کویری ایران در حدود ۹۳۱۱ میلی‌متر است (هاشمی گرمدره و اسلامیان، ۱۳۸۴).

در حال حاضر جهت کاهش میزان تبخیر روش‌های مختلفی ارائه گردیده است که می‌توان آن‌ها را به دو دسته فیزیکی و شیمیایی و یا ترکیبی از هر دو روش تقسیم‌بندی کرد. در روش فیزیکی با به‌کارگیری پوشش‌های فیزیکی ازجمله توپ‌های شناور و صفحات فلزی و پلیمری و یا برگ‌های درختان و اندازه‌گیری میزان تبخیر در یک دوره مشخص، اثرگذاری آن روش‌ها بررسی می‌شود. با پوشاندن سطح آب با پوشش‌های شناور، هدرروی تبخیری به میزان زیادی کاهش خواهد یافت. این پوشش‌ها مقدار زیادی از انرژی خورشیدی که به سطح آب می‌رسد را کاهش داده و با کند کردن جریان هوا، انتقال بخار را کاهش می‌دهند. در روش شیمیایی نیز با استفاده از محلول‌های مختلف ازجمله مونولایرها و ایجاد یک‌لایه حائل بر روی سطح آب میزان تبخیر کاهش می‌یابد. در این پژوهش سعی شده است تا کارایی روش‌های مختلف فیزیکی از قبیل صفحات پلی‌پروپیلن و روش توپ‌های شناور در کاهش تبخیر مورد ارزیابی قرار گیرد و تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی بر روی میزان راندمان آن‌ها تعیین گردد. پوشش‌های فیزیکی یک رویکرد مؤثر و بادوام برای کاهش تبخیر هستند (هان و همکاران[11]، ۲۰۱۹.، و یوسف و خودزینسکایا[12]، ۲۰۱۹). این پوشش‌ها، مواد سایه‌انداز شناور یا معلقی هستند که به‌طور کامل یا جزئی سطح آب را می‌پوشانند، تابش خورشیدی ورودی را منعکس می‌کنند و به‌عنوان موانع فیزیکی در برابر بخارآب عمل می‌کنند (یائو و همکاران[13]، ۲۰۱۰). پوشش‌های شناور می‌توانند پوشش‌های پیوسته (ورق‌های شناور) یا پوشش‌های اشیاء شناور (یائو و همکاران، ۲۰۱۰) باشند. پوشش‌های شناور کاهنده تبخیر آب توسط مواد چوبی و فولادی ارائه می‌شوند که می‌تواند تبخیر را ۷۵ تا ۹۰ درصد کاهش دهد (گالگو- الویرا و همکاران[14]، ۲۰۱۱)، بدون اینکه بر کیفیت آب تأثیر بگذارد (ماستری- والرو و همکاران[15]، ۲۰۱۱). در مقابل، پوشش‌های

[1] Rezazadeh et al
[2] Zhao and Gao
[3] Lehner et al
[4] Elsebaie et al
[5] Alam and Alshaikh
[6] Hogeboom et al
[7] Assouline and Narkis
[8] Assouline et al
[9] Rost et al
[10] Friedrich et al
[11] Han et al
[12] Youssef and Khodzinskaya
[13] Yao et al
[14] Gallego-Elvira et al
[15] Maestre-Valero et al

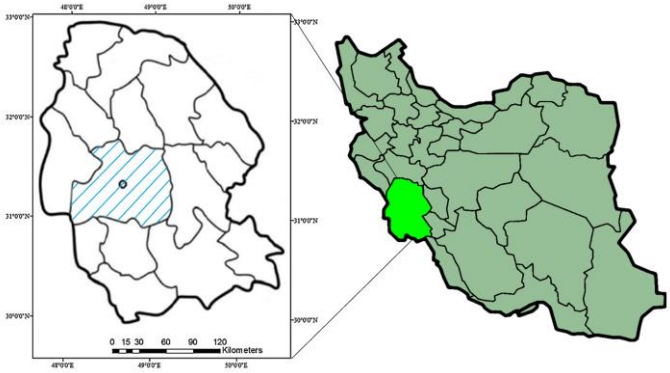
شناور، به‌عنوان‌مثال، پوشش‌های شناور پیوسته یا پوشش‌های شناور مجزا مستقیماً روی سطح آب شناور می‌شوند (کریگ، ۲۰۰۵.، و یائو و همکاران، ۲۰۱۰). پوشش‌های شناور را می‌توان به‌طور خودکار پس از تغییر سطح آب مجدداً مرتب و نصب کرد (هان و همکاران، ۲۰۲۰).

برخلاف پوشش‌های شناور پیوسته و پوشش‌های معلق، پوشش‌های شناور مجزا به دلیل شکاف‌های باز بین قطعات شناور جدا از هم اجازه نفوذ نور و تبادل گاز بین هوا و آب را می‌دهند (روسکوویتز و همکاران[1]، ۲۰۱۴ .، و رضازاده و همکاران، ۲۰۲۰).

میزان تبخیر سالانه در حوضه رودخانه کارون ۱۵۲۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که به‌طور مستقیم سالانه چندین میلیارد مترمکعب آب از کل سطح مخازن این رودخانه تبخیر می‌شود (فرزین و علیزاده، ۱۳۹۴). بر همین اساس در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از صفحات پلی‌پروپیلن، میزان تبخیر از سطح آزاد آب موردبررسی قرار گیرد. جهت ارزیابی کارایی صفحات پلی‌پروپیلن از توپ‌های شناور استفاده‌شده است. علاوه بر تأثیر شکل صفحات پلی‌پروپیلن، میزان تراکم صفحات نیز بر روی میزان تبخیر از سطح آب مورد ارزیابی قرارگرفته است.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر جهت بررسی تأثیر میزان پوشش و شکل صفحات پلی‌پروپیلن بر کاهش میزان تبخیر و تأثیر متغیرهای هواشناسی بر کارایی این صفحات صورت پذیرفت. آزمایش‌های مرتبط با این پژوهش در ایستگاه هواشناسی فرودگاه اهواز واقع در شهر اهواز انجام شد. اهواز مرکز استان خوزستان با اقلیمی گرم و خشک که در جنوب غربی ایران و در امتداد رودخانه کارون به‌عنوان بزرگ‌ترین رودخانه ایران و در طول '۲۰ °۳۱ شمالی و '۴۰ °۴۸ عرض شرقی و ارتفاع ۱۶ متر از سطح آب‌های آزاد قرار دارد. میانگین سالانه بارندگی ۲۰۲/۵ میلی‌متر، میانگین تبخیر سالانه ۳۴۰۰ میلی‌متر و میانگین کمینه دما ۱۹/۲ و بیشینه دما ۳۳/۴ درجه سانتی‌گراد است. موقعیت محل انجام آزمایش‌ها در شکل (۱) ارائه‌شده است.



شکل ۱. موقعیت قرارگیری شهرستان اهواز به‌عنوان محل انجام آزمایش‌ها

با توجه به استقرار ایستگاه هواشناسی در فرودگاه اهواز و اندازه‌گیری متغیرهای مختلف هواشناسی در این ایستگاه، تشت‌های تبخیر در مجاورت آن قرار گرفت تا بتوان از اطلاعات ایستگاه هواشناسی جهت بررسی تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی بر کارایی صفحات پلی‌پروپیلن استفاده نمود. تشت تبخیر کلاس A (قطر ۱۲۰/۷ سانتیمتر و ارتفاع ۲۵/۴ سانتیمتر) موجود در ایستگاه هواشناسی به‌عنوان تشت شاهد در نظر گرفته و سه تشت دیگر جهت تیمارهایی با پوشش‌های مختلف استفاده شد. تشت‌ها روی پالت (۱۳۰ × ۱۳۰ سانتی‌متر، با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر) قرار گرفتند و برای ممانعت از مصرف آب توسط حیوانات، روی تشت‌ها با تور پوشش داده شد. فاصله تشت‌ها از هم حدود ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

در این تحقیق بررسی صفحات شناور با پوشش ۱۰۰٪ (از تاریخ ۲۷ شهریور تا ۲۸ مهر ۱۴۰۱) و بررسی درصد پوشش صفحات مربعی (از تاریخ ۹ آبان تا ۲۳ آذر ۱۴۰۱) جهت بررسی میزان کارایی صفحات استفاده گردید. در کنار صفحات پلی‌پروپیلن از توپ‌های شناور (قطر

[1] Ruskowitz et al

توپ‌ها ۱۰ سانتیمتر، تعداد ۲۰۰ عدد در یک تشت، جنس توپ‌ها پی‌وی‌سی) که ازجمله روش‌های متداول جهت کاهش تبخیر از سطح آب بوده به‌عنوان معیاری جهت ارزیابی میزان کارایی صفحات پلی‌پروپیلن استفاده گردید. در این تحقیق از صفحات پلی‌پروپیلن با شکل هندسی مربع و مثلث به ابعاد ۱۰ سانتی‌متر و در پوشش‌های ۱۰۰٪، ۷۰٪، ۵۰٪ و ۳۰٪ استفاده گردید. قابل‌ذکر است که میزان تبخیر به‌صورت روزانه و با استفاده از اشل برداشت شد. نمایی از نحوه قرارگیری صفحات شناور بر روی سطح آب در تشت‌های آزمایش در شکل (۲) ارائه شده است.

شکل ۲. پوشش‌های پلی‌پروپیلن در نسبت‌های تراکم مختلف

فرآیند تبخیر به دلیل تمایل مولکول‌های آب برای فرار به هوای مجاور به‌صورت بخارآب صورت می‌گیرد. از عوامل مؤثر در تبخیر می‌توان به دمای سطح آب، کمبود فشار بخار هوا، سرعت باد، فشار اتمسفر و کیفیت آب اشاره کرد (سپاسخواه، ۱۳۹۷). بر همین اساس می‌توان نتیجه گرفت که میزان تبخیر رابطه مستقیمی با شدت تابش خورشیدی، میزان دمای حداقل و حداکثر، درجه حرارت و فشار بخار اشباع دارد. با توجه به تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب، اثرات پارامترهای میانگین دمای هوا، میانگین فشار هوا، میانگین سرعت باد، میانگین رطوبت نسبی و میزان تابش روزانه بر متوسط تبخیر از سطح آزاد آب موردبررسی قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی بر روی عملکرد صفحات پلی‌پروپیلن در این مطالعه، از تحلیل واریانس دوطرفه استفاده شد. در این مطالعه از این تحلیل جهت بررسی اثرات متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته استفاده شده است. متغیرهای مستقل در این تحقیق شامل متغیرهای مختلف هواشناسی از قبیل درجه حرارت، درصد رطوبت نسبی، میانگین فشار بخار، سرعت باد و تابش خورشیدی بوده و متغیر وابسته تبخیر در تیمارهای مختلف در نظر گرفته شد. برای انجام تحلیل واریانس دوطرفه، متغیرهای وابسته باید به‌طور تقریبی دارای توزیع نرمال باشند. بر این اساس از نمودار احتمال نرمال Q-Q (Quartile-Quartile Plot) استفاده گردید. چنانچه در نمودارهای احتمال، پراکندگی داده‌ها اکثراً در اطراف خط ۴۵ درجه قرارگرفته باشند، می‌توان فرض نرمال بودن داده‌ها را صحیح در نظر گرفت. علاوه بر این جهت انجام تحلیل واریانس دوطرفه، متغیرهای وابسته می‌بایستی شامل دو یا تعدادی بیشتر از سطوح باشند. بر همین اساس کلیه متغیرهای هواشناسی به سه سطح کم، متوسط و زیاد تقسیم شدند. جهت این کار ابتدا متغیرهای مختلف هواشناسی بر اساس میانگین هر متغیر اصلاح گردید. بدین گونه که میانگین هر متغیر از تمامی داده‌های آن متغیر کاسته شد. در چنین حالتی میانگین داده‌های آن متغیر برابر با صفر خواهد شد. پس‌ازآن با توجه به انحراف معیار (Sd) هر متغیر، داده‌های آن متغیر به سه قسمت تقسیم گردید. مقادیر کمتر از -1Sd به‌عنوان مقادیر کم (سطح ۱)، مقادیر بیشتر از +1Sd به‌عنوان مقادیر زیاد (سطح ۳) و مقادیر بین -1Sd و +1Sd به‌عنوان مقادیر

بینابین (سطح ۲) در نظر گرفته شد (کریم‌زاده و همکاران، ۲۰۲۳). در این مطالعه از ضریب Partial Eta Squared که یکی از معیارهای مربوط به اندازه‌گیری اثر در جدول تحلیل واریانس و شیوه استنباطی آن است، استفاده شده است. از این مقدار برای تحلیل واریانس بین آزمودنی یا تحلیل واریانس یک‌طرفه و تحلیل فاکتوریل استفاده می‌شود.

جهت محاسبه قیمت آب برای برآورد اقتصادی از مطالعه رزاقی و همکاران (۱۴۰۱) استفاده شد. در مطالعه مذکور قیمت اقتصادی آب سد کوثر جهت مصارف کشاورزی برای سال ۱۳۹۳ حدود ۵۴۱۱ ریال به ازای هر مترمکعب برآورد شد. سپس، برای به‌روزرسانی قیمت اقتصادی آب از نرخ تورم سالانه استفاده و قیمت اقتصادی آب در سال ۱۴۰۲ محاسبه شد که این قیمت معادل ۴۲۲۱۹ ریال به‌دست‌آمده آمد. در ادامه با استفاده از میانگین نرخ تورم ۱۰ سال اخیر منتهی به سال ۱۴۰۲ (معادل ۲۹/۳)، قیمت اقتصادی آب در طول ۳ سال عمر مفید صفحات پلی‌پروپیلن محاسبه شد. در ادامه، از طریق حاصل‌ضرب نرخ کاهش تبخیر آب ناشی از به‌کارگیری صفحات پلی‌پروپیلن و میزان تبخیر آب سد کوثر در واحد سطح، میزان جلوگیری از هدر رفت آب در سد کوثر محاسبه و سپس با ضرب این میزان در قیمت اقتصادی آب سالانه، بازده اقتصادی سالانه (F) کاربرد صفحات پلی‌پروپیلن در واحد سطح محاسبه شد. پس از تهیه و تدوین داده‌های بازده اقتصادی سالانه کاربرد صفحات پلی‌پروپیلن در طول عمر مفید این صفحات، معیارهای توجیه‌پذیری اقتصادی مانند مجموع ارزش حال خالص، نرخ بازده داخلی و دوره بازگشت سرمایه محاسبه شد. به‌منظور محاسبه مجموع ارزش حال خالص (NPV) از فرمول زیر استفاده شد:

$$NPV=\left[\sum_{t=1}^{3}\left(\frac{F_t}{(1+i)^t}\right)\right]-C_0 \qquad (۱)$$

هزینه خرید، نصب و نگهداری یک مترمربع از صفحات به قیمت سال ۱۴۰۲ (سال پایه) که قیمت خرید یک مترمربع از این صفحات معادل ۱۵۰۰۰۰ ریال و هزینه نصب و نگهداری سالانه آن به ترتیب ۲۰٪ و ۱٪ قیمت صفحات در نظر گرفته شد. بازده اقتصادی سالانه محاسبه‌شده ناشی از کاربرد یک مترمربع از صفحات، نرخ بهره (تنزیل) که معادل ۲۰ درصد لحاظ شد و فاصله زمانی سال پایه ۱۴۰۲ به‌عنوان سال رخداد هزینه (t=0) تا سال پایان عمر مفید صفحات است.

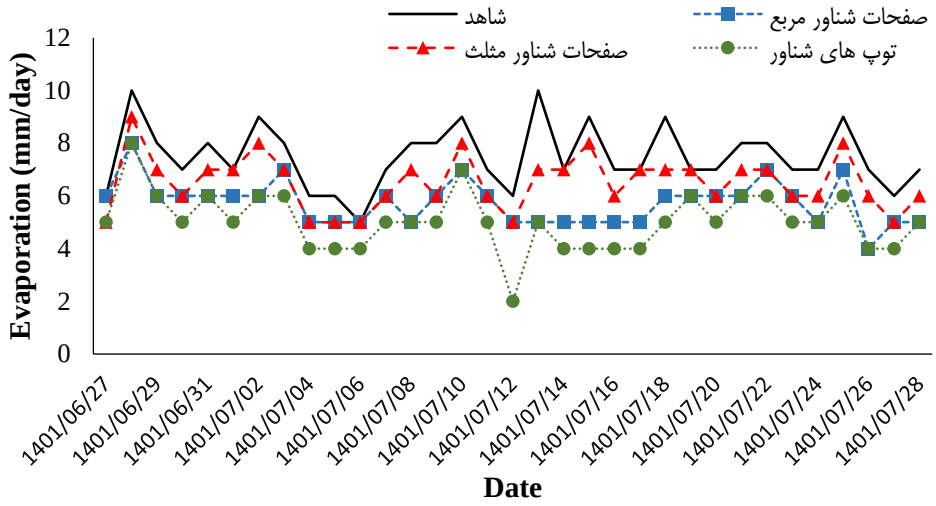
به‌منظور محاسبه نرخ بازده داخلی کاربرد این صفحات کافی است که به‌جای نرخ بهره در رابطه ۱ نرخ بازده داخلی (IRR) را مجهول قرار داده و آن را به‌گونه‌ای محاسبه کرد که مجموع ارزش حال خالص (NPV) برابر با صفر شود.

$$NPV=0\rightarrow\left[\sum_{t=1}^{3}\left(\frac{F_t}{(1+IRR)^t}\right)\right]-C_0=0 \qquad (۲)$$

مدت‌زمانی که ارزش حال خالص برابر با صفر می‌شود به‌عنوان دوره بازگشت سرمایه شناخته می‌شود.

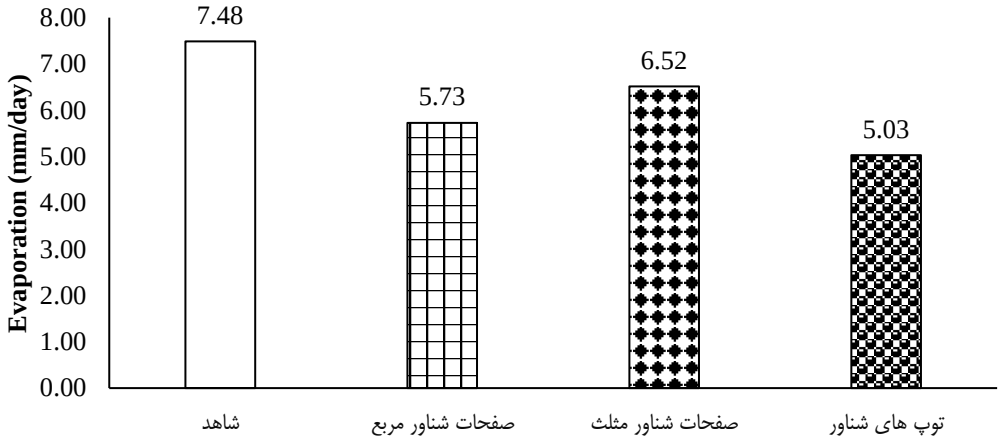
یافته‌ها

بازه تغییرات تبخیر در شرایط شاهد، پوشش صفحات شناور مربع، صفحات شناور مثلث و توپ‌های شناور در بازه انجام آزمایش‌ها به ترتیب از ۵ تا ۱۰، ۴ تا ۸، ۵ تا ۷ و ۲ تا ۸ میلی‌متر متغیر بوده است که در شکل (۳) نشان داده شده است. در شرایط کاربرد توپ‌های شناور، میزان کاهش تبخیر از مقدار بیشتری برخوردار بود و این پوشش توانست تبخیر را به میزان بیشتری کاهش دهد.



شکل ۳. روند تغییرات تبخیر در شرایط کاربرد پوشش‌های مختلف پلی‌پروپیلن و توپ‌های شناور

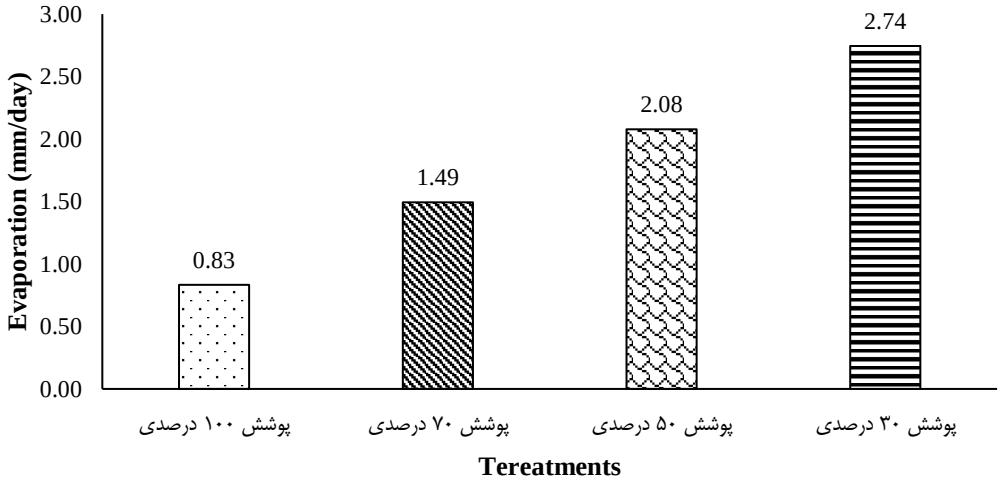
بررسی اختلاف بین تیمارهای مختلف موردبررسی نشان داد که کاربرد صفحات شناور مربع نسبت به شاهد سبب کاهش۳۰/۷۱ درصدی، کاربرد صفحات شناور مثلث نسبت به شاهد سبب کاهش ۱۴/۸۶درصدی و کاربرد توپ‌های شناور نسبت به شاهد سبب کاهش ۴۸/۷ درصدی تبخیر از تشت شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، به ترتیب تشت شاهد، صفحات شناور مثلث، صفحات شناور مربع و توپ‌های شناور بیش‌ترین میزان تبخیر را داشته‌اند. میانگین تبخیر از تیمارهای مختلف در شکل (۴) ارائه شده است.



شکل ٤. میانگین میزان تبخیر در شرایط کاربرد پوشش‌های مختلف پلی‌پروپیلن و توپ‌های شناور

در این بخش تأثیر درصدهای مختلف پوشش صفحات شناور مربع بر میزان کاهش تبخیر موردبررسی قرار گرفته است. نتایج میانگین میزان تبخیر در شرایط کاربرد درصدهای مختلف پوشش پلی‌پروپیلن در شکل (۵) ارائه شده است که نشان می‌دهد با افزایش درصد پوشش صفحات شناور، میزان تبخیر از تشت کاهش داشته است. مقایسه میانگین میزان تبخیر در دو پوشش ۱۰۰٪ و ۵۰٪ نشان می‌دهد که کاربرد پوشش صفحات پلی‌پروپیلن ۱۰۰٪ سبب کاهش ۱۴۹/۳۹ درصدی میزان تبخیر نسبت به پوشش ۵۰٪ خواهد شد. درواقع افزایش ۵۰ درصدی میزان پوشش توانسته است تا ۱۴۹/۳۹ درصد به کاهش میزان تبخیر منجر شود. مقایسه سطح پوشش ۳۰٪ و ۵۰٪ نیز نشان می‌دهد که میزان میانگین تبخیر در پوشش ۵۰٪ نسبت به پوشش ۳۰٪، ۳۲ درصد کاهش داشته است. علاوه بر این با افزایش ۲۰ درصدی سطح پوشش (از ۵۰ درصد به ۷۰ درصد) میزان میانگین تبخیر ۹۲/ ۳۸ درصد کاهش در پی دارد. بیشترین میزان میانگین تبخیر

از تشت در شرایط پوشش ۳۰ درصدی با میزان ۲/۴۷ میلی‌متر و کمترین میزان آن به کاربرد پوشش ۱۰۰ درصدی با میزان ۰/۸۳ میلی‌متر اختصاص داشت.



شکل ۵. میانگین میزان تبخیر در شرایط کاربرد درصدهای مختلف پوشش تشت با صفحات پلی‌پروپیلن

نتایج تحلیل واریانس دوطرفه جهت بررسی اثرات متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در تشت شاهد در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس جدول ارائه‌شده تأثیر متغیرهای درجه حرارت و رطوبت نسبی بر روی میزان تبخیر معنادار است. بر اساس مطالعات صورت گرفته بر روی‌داده‌های طولانی‌مدت ایستگاه اهواز، هر پنج متغیر اشاره‌شده دارای تأثیر معنادار بر روی میزان تبخیر بوده‌اند (ظهیری و مرادی، ۱۴۰۲) ولی در این مطالعه با توجه به کوتاه بودن بازه انجام آزمایش‌ها، تنها دو متغیر درجه حرارت و رطوبت نسبی تأثیر معنادار بر میزان تبخیر داشته‌اند. ضریب Partial Eta Squared رطوبت نسبی بیشترین مقدار را داشته است که نشان می‌دهد سطوح مختلف رطوبت نسبی بیشترین تغییرات را بر روی میزان تبخیر از سطح آزاد تشت شاهد داشته است.

جدول ۱. نتایج آنالیز واریانس دوطرفه جهت بررسی اثرات متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در تشت شاهد

منبع	درجه آزادی	F	Sig.	پارامتر مجذور اتا
درجه حرارت	۲	۷/۳۲	۰/۰۰۱	۰/۱۶
رطوبت نسبی	۲	۱۸/۱۸	۰/۰۰۰	۰/۳۲
فشار سطح	۲	۱/۱۲۶	۰/۳۳۰	۰/۰۲
سرعت باد	۲	۲/۲۷	۰/۱۱۰	۰/۰۵۷
تابش خورشیدی	۲	۲/۰۸	۰/۱۳۱	۰/۰۵

نتایج تحلیل واریانس دوطرفه جهت بررسی اثرات متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در تشت حاوی توپ‌های شناور و صفحات پلی‌پروپیلن مربعی به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. بر اساس جدول (۲) تأثیر هیچ‌کدام از متغیرهای هواشناسی بر روی میزان تبخیر از تشت حاوی توپ‌های شناور معنادار نیست. به‌عبارتی‌دیگر وجود توپ‌های شناور باعث کاهش تأثیر تغییرات متغیرهای هواشناسی بر روی میزان تبخیر شده است. این در حالی است که بر اساس جدول (۳) در حضور صفحات پلی‌پروپیلن، متغیر درجه حرارت تأثیر معناداری بر روی میزان تبخیر دارد. مقایسه نتایج دو روش توپ‌های شناور و صفحات پلی‌پروپیلن با تشت شاهد نشان می‌دهد که درصد رطوبت نسبی که مهم‌ترین عامل در تبخیر از تشت شاهد بوده است، با حضور المان‌ها در سطح آب، معناداری خود را از دست داده است.

جدول ۲. نتایج آنالیز واریانس دوطرفه جهت بررسی اثرات متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در تشت حاوی توپ‌های شناور

منبع	درجه آزادی	F	Sig.	پارامتر مجذور اتا
درجه حرارت	۲	۲/۴۴۱	۰/۱۳۰	۰/۰۸۶
رطوبت نسبی	۲	۰/۳۲۲	۰/۵۷۵	۰/۰۱۲
فشار سطح	۲	۰/۴۷۳	۰/۴۹۸	۰/۰۱۸
سرعت باد	۲	۰/۷۱۶	۰/۴۹۸	۰/۰۵۲
تابش خورشیدی	۲	۰/۹۵۷	۰/۳۳۷	۰/۰۳۵

جدول ۳. نتایج آنالیز واریانس دوطرفه جهت بررسی اثرات متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در تشت حاوی صفحات مربعی پلی‌پروپیلن

منبع	درجه آزادی	F	Sig.	پارامتر مجذور اتا
درجه حرارت	۲	۶/۳۵۹	۰/۰۱۸	۰/۱۹۷
رطوبت نسبی	۲	۰/۷۸۳	۰/۳۸۴	۰/۰۲۹
فشار سطح	۲	۰/۶۵۸	۰/۴۲۵	۰/۰۲۵
سرعت باد	۲	۰/۹۵۴	۰/۳۹۸	۰/۰۶۸
تابش خورشیدی	۲	۰/۲۴۵	۰/۶۲۵	۰/۰۰۹

بر اساس نتایج آماره‌های توصیفی ارائه‌شده در جدول (۴) دامنه تغییرات تبخیر از تشت در توپ‌های شناور > شاهد > صفحات شناور مربع و مثلث بوده است. میزان واریانس بالا در تیمار توپ‌های شناور نیز نشان از پراکندگی بیشتر داده‌ها نسبت به میانگین دارد.

جدول ٤. آماره‌های توصیفی داده‌های تبخیر از تشت در شرایط کاربرد پوشش‌های مختلف پلی‌پروپیلن

تیمار	میانگین	دامنه تغییرات	انحراف معیار	ضریب تغییرات
شاهد	۷/۵	۵/۱	۰/۰۲	۰
صفحات شناور مربع	۵/۷	٤/۳	۰/٤۱	۰/۰۷
صفحات شناور مثلث	٦/۵	٤/۲	۰/٦۲	۰/۱
توپ‌های شناور	۵	٦/۰	۰/۸۷	۰/۱۷

نتایج مربوط به آنالیز واریانس یک‌طرفه مقایسه روش‌های مختلف مورداستفاده در مطالعه حاضر در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس محاسبات صورت گرفته، کلیه روش‌های مورداستفاده در مقایسه با تشت شاهد دارای اختلاف معنادار می‌باشند که نشان‌دهنده مؤثر بودن روش‌های مختلف بر میزان تبخیر است. مقایسه کارایی صفحات پلی‌پروپیلن با توپ‌های شناور نشان می‌دهد که تنها صفحات مثلثی با توپ‌های شناور دارای اختلاف معنادار است که این اختلاف در مورد صفحات مربعی مشاهده نگردید.

جدول ۵. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه جهت بررسی تأثیر روش‌های مختلف مورداستفاده بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب

روش (I)	روش (J)	اختلاف میانگین (I-J)	Sig.	۹۵% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
تشت شاهد	توپ‌های شناور	۲/۰۰*	۰/۰۰۰	۱/۲۲	۲/۷۸
	صفحات مربعی	۱/۵۱*	۰/۰۰۰	۰/۷۳	۲/۳۰
	صفحات مثلثی	۱/۰٦*	۰/۰۰۲	۰/۲۸	۱/۸٤
توپ‌های شناور	تشت شاهد	-۲/۰۰*	۰/۰۰۰	-۲/۷۸	-۱/۲۲
	صفحات مربعی	-۰/٤۸	۰/۵۹٦	-۱/۲۷	۰/۳۰
	صفحات مثلثی	-۰/۹۳*	۰/۰۱۰	-۱/۷۲	-۰/۱٦
صفحات مربعی	تشت شاهد	-۱/۵۱*	۰/۰۰۰	-۲/۳۰	-۰/۷۳
	توپ‌های شناور	۰/٤۸	۰/۵۹٦	-۰/۳۰	۱/۲۷
	صفحات مثلثی	-۰/٤۵	۰/۷۳۲	-۱/۲٤	۰/۳۳
صفحات مثلثی	تشت شاهد	-۱/۰٦*	۰/۰۰۲	-۱/۸٤	-۰/۲۸
	توپ‌های شناور	۰/۹۳*	۰/۰۱۰	۰/۱٦	۱/۷۲
	صفحات مربعی	۰/٤۵	۰/۷۳۲	-۰/۳۳	۱/۲٤

در جدول (۶) آماره‌های توصیفی داده‌های تبخیر از تشت در شرایط کاربرد درصدهای مختلف پوشش‌های پلی‌پروپیلن ارائه شده است. دامنه تغییرات میزان تبخیر از تشت با کاهش سطح پوشش افزایش پیدا کرد که نشان از نوسان بیشتر تبخیر از سطح داشت. با کاهش درصد پوشش سطح تشت از ۱۰۰ به ۳۰ درصد نیز دامنه تغییرات تبخیر از تشت افزایش می‌یابد. کمترین واریانس در ۷۰ درصد پوشش مشاهده شد که نشان از همگنی داده‌ها دارد. میزان واریانس بالا در پوشش ۱۰۰ درصدی نیز نشان از پراکندگی بیشتر داده‌ها نسبت به میانگین دارد. با کاهش درصد پوشش از ۱۰۰ به ۳۰ درصد ضریب تغییرات نیز کاهش نشان داد.

جدول ٦. آماره‌های توصیفی داده‌های تبخیر از تشت در شرایط کاربرد درصدهای مختلف پوشش‌های پلی‌پروپیلن

پوشش	میانگین	دامنه تغییرات	انحراف معیار	ضریب تغییرات
۱۰۰ درصد پوشش	۰/۸	۰/۵	۱/۲	۱/٤۸
۷۵ درصد پوشش	۱/۳	۱/۰	۰/۸	۰/٦٤
۵۰ درصد پوشش	۱/۸	۲/۱	۱	۰/۵۸
۳۰ درصد پوشش	۲/۵	۲/۵	۱/۱	۰/٤٤

نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه جهت بررسی تأثیر تراکم‌های مختلف صفحات پلی‌پروپیلن بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب در جدول (۷) ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میان کلیه تراکم‌های مورداستفاده اختلاف معنادار وجود دارد. علاوه بر این بررسی اختلاف میان میانگین تراکم‌های مختلف نشان می‌دهد که روند کاهش تبخیر با افزایش پوشش صفحات پلی‌پروپیلن تا حد زیادی به‌صورت خطی است.

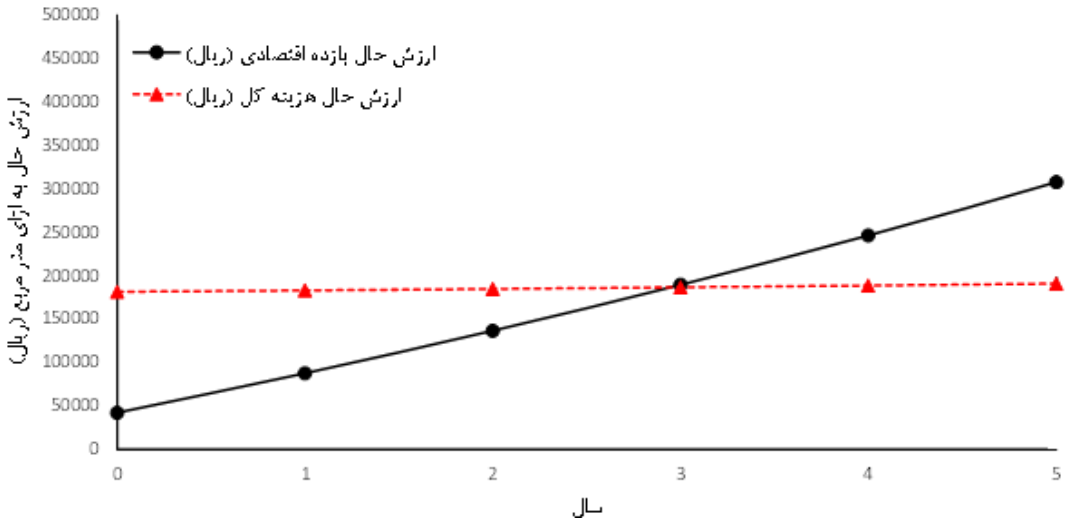
جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه جهت بررسی تأثیر تراکم‌های مختلف مورداستفاده بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب

روش (I)	روش (J)	اختلاف میانگین (I-J)	Sig.	95% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
پوشش ۳۰%	پوشش ۵۰٪	۰/۷۹*	۰/۰۰۰	۰/۴۷	۱/۱۲
	پوشش ۷۰٪	۱/۳۶*	۰/۰۰۰	۱/۰۴	۱/۶۹
	پوشش ۱۰۰٪	۲/۰۷*	۰/۰۰۰	۱/۷۵	۲/۴۱

	پوشش ۳۰%	-۰/۷۹*	۰/۰۰۰	-۱/۱۲	-۰/۴۷
پوشش ۵۰٪	پوشش ۷۰٪	۰/۵۷*	۰/۰۰۰	۰/۲۴	۰/۹۰
	پوشش ۱۰۰٪	۱/۲۸*	۰/۰۰۰	۰/۹۶	۱/۶۱
	پوشش ۳۰%	-۱/۳۶*	۰/۰۰۰	-۱/۶۹	-۱/۰۴
پوشش ۷۰٪	پوشش ۵۰٪	-۰/۵۷*	۰/۰۰۰	-۰/۹۰	-۰/۲۴
	پوشش ۱۰۰٪	۰/۷۱*	۰/۰۰۰	۰/۳۸	۱/۰۴
	پوشش ۳۰%	-۲/۰۷*	۰/۰۰۰	-۲/۴۱	-۱/۷۵
پوشش ۱۰۰٪	پوشش ۵۰٪	-۱/۲۸*	۰/۰۰۰	-۱/۶۱	-۰/۹۶
	پوشش ۷۰٪	-۰/۷۱*	۰/۰۰۰	-۱/۰۴	-۰/۳۸

بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته بر اساس نتایج برآورد اقتصادی استفاده از صفحات پلی‌پروپیلن، مقدار NPV برای صفحات پلی-پروپیلن جهت استفاده در مخزن سد کوثر ۲۸۰۸ ریال به ازای هر مترمربع سطح مخزن محاسبه گردید. مقدار NPV مثبت نشان‌دهنده اقتصادی بودن طرح است. با در نظر گرفتن ۱٪ قیمت اولیه صفحات پلی‌پروپیلن به‌عنوان هزینه نگهداری سالانه، دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۳ سال محاسبه گردید. نمودار مربوط به ارزش بازده اقتصادی با توجه به ارزش حال قیمت آب و ارزش حال هزینه کل (ارزش حال هزینه سرمایه+ ارزش حال هزینه نصب+ ارزش حال هزینه نگهداری) در طول عمر مفید صفحات پلی‌پروپیلن به ازای واحد سطح مخزن

در شکل (۶) ارائه شده است. جهت محاسبه نرخ بازده داخلی از رابطه ۲ استفاده گردید. بر اساس محاسبات صورت گرفته، نرخ بازده داخلی برابر با ۳۰٪ خواهد بود. بر این اساس با توجه به نرخ بهره بانکی ازلحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است. مهم‌تر از تحلیل‌های صورت گرفته، در نظر گرفتن ارزش ذاتی آب بوده که مقدار آن بسیار فراتر از مبالغ در نظر گرفته‌شده است و با توجه به چالش‌های موجود در زمینه منابع آب، کشور ناگزیر به استفاده از این روش‌ها جهت حفظ منابع خود است.



شکل ٦. ارزش حال بازده اقتصادی و ارزش حال هزینه کل صفحات پلی‌پروپیلن به ازای واحد سطح مخزن سد کوثر

بحث

در این تحقیق کارایی پوشش صفحات شناور مربع، صفحات شناور مثلث و توپ شناور و نیز پوشش‌های ۱۰۰٪، ۷۰٪، ۵۰٪ و ۳۰٪ صفحات پلی‌پروپیلن بررسی گردید. آزمایش‌های مرتبط با این پژوهش در ایستگاه هواشناسی فرودگاه اهواز واقع در شهر اهواز انجام شد. علاوه بر این تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی بر روی میزان تبخیر از سطح آزاد آب در حضور پوشش‌های مختلف موردبررسی قرار گرفت. بازه تغییرات تبخیر در شرایط شاهد، پوشش صفحات شناور مربع، صفحات شناور مثلث و توپ‌های شناور در بازه انجام آزمایش‌ها به

ترتیب از ۵ تا ۱۰، ۴ تا ۸، ۵ تا ۷ و ۲ تا ۸ میلی‌متر متغیر بوده است در شرایط کاربرد توپ‌های شناور، میزان کاهش تبخیر از مقدار بیشتری برخوردار بود و این پوشش توانست تبخیر را به میزان بیشتری کاهش دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل واریانس دوطرفه جهت بررسی اثرات متغیرهای مختلف هواشناسی بر میزان تبخیر از سطح آزاد آب نشان داد که تأثیر متغیرهای درجه حرارت و رطوبت نسبی بر روی میزان تبخیر در تشت شاهد معنادار است. این در حالی است که هیچ‌کدام از متغیرهای هواشناسی بر روی میزان تبخیر از تشت حاوی توپ‌های شناور معنادار نیست. به‌عبارتی‌دیگر وجود توپ‌های شناور باعث کاهش تأثیر تغییرات متغیرهای هواشناسی بر روی میزان تبخیر شده است. علاوه بر این، در حضور صفحات پلی‌پروپیلن، تنها متغیر درجه حرارت تأثیر معناداری بر روی میزان تبخیر داشته است. مقایسه نتایج دو روش توپ‌های شناور و صفحات پلی‌پروپیلن با تشت شاهد نشان می‌دهد که درصد رطوبت نسبی که مهم‌ترین عامل در تبخیر از تشت شاهد بوده است، با حضور المان‌ها در سطح آب، معناداری خود را ازدست‌داده است. بررسی اختلاف بین تیمارهای مختلف موردبررسی نشان داد که کاربرد صفحات شناور مربع و مثلث نسبت به تشت شاهد سبب کاهش به ترتیب ۳۰/۷۱ و ۱۴/۸۶درصدی تبخیر از تشت شده است. دلیل تفاوت میان دو پوشش مربوط به فضای آزاد بیشتر میان المان‌های مثلثی در مقایسه با المان‌های مربعی است، هرچند که سعی گردید تا پوشش‌ها به‌صورت ۱۰۰٪ باشند. علاوه بر این کاربرد توپ‌های شناور نسبت به شاهد سبب کاهش ۴۸/۷ درصدی تبخیر از تشت گردید. مقایسه پوشش‌های مستطیلی با تراکم‌های مختلف نشان داد که افزایش درصد پوشش به ترتیب از ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد به ۱۰۰ درصد باعث کاهش تبخیر به میزان ۲/۳، ۱/۵ و ۰/۸ برابر می‌شود.

منابع

رزاقی، فاطمه.، رجب‌پور، رسول.، لیانی‌سنگ‌نیشتی.، قاسم و میرزایی، عباس. (۱۴۰۱). برآورد ارزش اقتصادی آب جهت مصارف شهری و کشاورزی: مطالعه موردی سد کوثر. فصلنامه علمی –پژوهشی تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۴(۱)، ۹۱-۷۶. https://doi.org/10.30495/jae.2022.22251.2057

سپاسخواه، علیرضا. (۱۳۹۷). کاهش تبخیر از مخزن آب سدها. دوفصلنامه پژوهش‌های راهبردی در علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۳ (۱)، ۱۳-۲۶. https://doi.org/10.22047/srjasnr.2018.110633

ظهیری، جواد.، و مرادی، عادل. (۱۴۰۲). بررسی تأثیر متقابل پارامترهای هواشناسی بر تبخیر از سطح آب با استفاده از تحلیل واریانس. پژوهش‌های خشکسالی و تغییراقلیم، ۱(۳)، ۱۰۴ – ۸۷. https://dx.doi.org/10.22077/JDCR.2023.6498.1028

علیزاده، امین. (۱۳۹۴). اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا، مشهد. https://www.gisoom.com/book/1775360

فرزین، سعید.، و علیزاده صنمی، فروغ. (۱۳۹۴). توپ سایه، تدبیری برای کاهش تبخیر آب مخازن سد. سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، ایران.https://civilica.com/doc/470523

قزوینیان، حمیدرضا.، فرزین، سعید.، کرمی، حجت. و موسوی، سید فرهاد. (۱۳۹۹). بررسی اثر استفاده از لایه‌های پلی‌استایرن بر کاهش تبخیر مخازن ذخیره آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مطالعه موردی: شهر سمنان). نشریه آب و توسعه پایدار. ۷(۲): ۵۲-۴۵. https://doi.org/10.22067/jwsd.v7i2.81748

مددی، محمدرضا.، کوهستانی، شاپور.، جداوی، محمد.، و ذکریایی، سیدمحمد. (۱۳۹۹). مقایسه عملکرد دو نوع پوشش طبیعی و مصنوعی در کاهش تبخیر از مخازن آبی (مطالعه موردی: منطقه جیرفت). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴(۴)، ۱۴۵۹-۱۴۴۸. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1399.14.4.27.6

نجاتیان، امیر. (۱۳۹۹). تخمین تبخیر از دریاچه چیتگر و تأثیر پوشش های شیمیایی بر کاهش مقدار آن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

هاشمی منفرد، سید آرمان.، رضاپور، مهدی.، و ژیان، تهمینه. (۱۳۹۷). بررسی اثر استفاده از دیوارهای بادشکن در کاهش تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن با استفاده از مدل عددی فلوئنت (مطالعهٔ موردی: چاه نیمهٔ شمارهٔ ۴ سیستان و بلوچستان). نشریه اکوهیدرولوژی، ۵(۱)، ۲۷۸-۲۶۵. https://doi.org/10.22059/ije.2017.236320.652

References

Abdallah, A. M., Parihar, C. M., Patra, S., Nayak, H. S., Saharawat, Y. S., Singh, U., Parihar M. D., Kakraliya, S. K., Nassar, I. N., Ugolini, F., Zohir, W.F., & Shalaby, M. M. (2021). Critical evaluation of functional aspects of evaporation barriers through environmental and economics lens for evaporation suppression- A review on milestones from improved technologies. Science of Total Environment, 788. https://doi.org//10,1016j.scitotenv.2021.147800

Alam, S., & AlShaikh, A. A. (2013). Use of palm fronds as shaded cover for evaporation reduction to improve water storage efficiency. Journal of King Saud University– Engineering Sciences, 25(1), 55–58. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2012.01.003

Assouline, S., & Narkis, K. (2021). Reducing evaporation from water reservoirs using floating lattice structures. Water Resourses Research, 57, e2021WR029670. https://doi.org/10.1029/2021wr029670

Assouline, S., Narkis, K., & Or, D. (2011). Evaporation suppression from water reservoirs: Efficiency considerations of partial covers. Water Resourses Research, 47, W07506. https://doi.org/10.1029/2010WR009889

Chowdhury, S., & Al-Zahrani, M. (2015). Characterizing water resources and trends of sector wise water consumptions in Saudi Arabia. Journal of King Saud University– Engineering Sciences, 27, 82-68. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.02.002

Chowdhury, S., Al-Zahrani, M., & Abbas, A. (2016). Implications of climate change on crop water requirements in arid region: An example of Al-Jouf, Saudi Arabia. Journal of King Saud University– Engineering Sciences, 28, 21–31. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.11.001

Craig, I. P. (2005). Loss of storage water due to evaporation. NCEA publication, University of Southern Queensland, Australia, Literature review. https://research.usq.edu.au/item/9y39x/loss-of-storage-water-due-to-evaporation-a-literature-review

Elsebaie, I. H., Fouli, H., & Amin, M. (2017). Evaporation reduction from open water tanks using palm-frond covers: Effects of tank shape and coverage pattern. KSCE Journal of Civil Engineering, 21, 2977–2983. https://doi.org/10.1007/s12205-017-0539-4

Friedrich, K., Grossman, R. L., Huntington, J., Blanken, P. D., Lenters, J., Holman, K. L. D., Gochis, D., Livneh, B., Prairie, J., Skeie, E., Healey, N. C., Dahm, K., Pearson, C., Finnessey, T., Hook, S. J., & KowaLsKi, T. (2018). Reservoir evaporation in the Western United States. Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS), 99, 167–187. https://doi.org/10,1175/BAMS-D-15-00224.1

Gallego-Elvira, B., Baille, A., Martin-Gorriz, B., Maestre-Valero, J. F., & Mart´ınez Alvarez, V. (2011). Energy balance and evaporation loss of an irrigation reservoir equipped with a suspended cover in a semiarid climate (southeastern Spain). Hydrolgy Process, 25, 1694–1703. https://doi.org/10.1002/hyp.7929

Haghighi, E., Madani, K., & Hoekstra, A. Y. (2018). The water footprint of water conservation using shade balls in California. Nature Sustainability, 1, 358–360. https//:doi.org/10.1038/s41893-018-0092-2

Hammadi, S. H. (2020). Integrated solar still with an underground heat exchanger for clean water production. Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 32, 339–345. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.04.004

Han, K. W., Shi, K. B., Yan, X. J., & Cheng, Y. Y. (2019). Water savings efficiency of counterweighted spheres covering a plain reservoir in an arid area. Water Resour. Manag, 33, 1867–1880. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02214-x

Hogeboom, R. J., Knook, L., & Hoekstra, A. Y. (2018). The blue water footprint of the world's artificial reservoirs for hydroelectricity, irrigation, residential and industrial water supply, flood protection, fishing and recreation. Advances in Water Resources, 113, 285–294. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.01.028

Karimzadeh, M., Zahiri, J., & Nobakht, V. (2023). Efficiency of monolayers in evaporation suppression from water surface considering meteorological parameters. Environmental Science and Pollution Research, 30, 17, 50783-50794. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26149-4

Lehner, B., Liermann, C. R., Revenga, C., Vörömsmarty, C., Fekete, B., Crouzet, P., Döll, P., Endejan, M., Frenken, K., Magome, J., Nilsson, C., Robertson, J. C., Rödel, R., Sindorf, N., & Wisser, D. (2011). High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. Frontiers in Ecology and the Environment, 9, 494–502. https://doi.org/10.1890/100125

Maestre-Valero, J. F., Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., & Pittaway, P. (2011). Effects of a suspended shade cloth cover on water quality of an agricultural reservoir for irrigation. Agricaltural Water Management, 100, 70–75. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.020

Morsy, S. M., Elbasyoni, I. S., Abdallah, A. M. & Baenziger, P. S. (2021). Imposing water deficit on modern and wild wheat collections to identify drought-resilient genotypes. Journal of Agronomy and Crop Science, 1–14. https://doi.org/10.1111/jac.12493

Mozafari, A., Mansouri, B. & Chini, S. F. (2019). Effect of wind flow and solar radiation on functionality of water evaporation suppression monolayers. Water Resources Management, 33, 3513–3522. https://doi.org/10.1007/s11269-019-02313-9

Rezazadeh, A., Akbarzadeh, P., & Aminzadeh, M. (2020). The effect of floating balls density on evaporation suppression of water reservoirs in the presence of surface flow. Journal of Hydrology, 591, 125323. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125323

Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., Lucht, W., Rohwer, J., & Schaphoff, S. (2008). Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. Water Resourses Research, 44, W09405. https://doi.org/10.1029/2007WR006331

Ruskowitz, J. A., Suárez, F., Tyler, S. W. & Childress, A. E. (2014). Evaporation suppression and solar energy collection in a salt-gradient solar pond. Solar Energy, 99, 36–46. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.035

Yao, X., Zhang, H., Lemckert, C., Brook, A., & Schouten, P. (2010). Evaporation reduction by suspended and floating covers: Overview, modelling and efficiency. Urban Water Security Research Alliance, 2, 14-26. http://hdl.handle.net/10072/37724

Youssef, W. Y., & Khodzinskaya, A. (2019). A Review of evaporation reduction methods from water surfaces. In: E3S Web of Conferences, 97, 05044. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705044

Zhang, H., Gorelick, S. M., Zimba, P. V., & Zhang, X. (2017). A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. Journal of Hydrology, 555, 213-227. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.007

Zhao, G., & Gao, H. (2019). Estimating reservoir evaporation losses for the United States: Fusing remote sensing and modeling approaches. Remote Sensing of Environment, 226, 109-124. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.015

Sepaskhah, A. (2018). Evaporation Reduction from Water Reservoir of Dams. Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 3(1), 13-26. https://doi.org/10.22047/srjasnr.2018.110633 [In Persian]

Razzaghi, F., Rajabpour, R., Layani, G., & Mirzaei, A. (2022). Estimation of the economic value of water for urban and agricultural use: A case study for Kowsar dam. Agricultural Economics Research, 14(1), 76-91. https://doi.org/10.30495/jae.2022.22251.2057 [In Persian]

Alizadeh, A. (2014). Principles of applied hydrology. Astan Quds Razavi Publishing House, Imam Reza University, Mashhad. https://www.gisoom.com/book/1775360 [In Persian]

Farzin, S., & Alizade Sanami, F. (2014). Shadow ball, a measure to reduce water evaporation of dam reservoirs. Third International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/470523 [In Persian]

Nejatian, A. (2019). Estimation of evaporation from Chitgar Lake and the effect of chemical coatings on its reduction. Master's thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. [In Persian]

Madadi, M. R., Kouhestani, S., Jadavi, M., & Zakariayi, M. (2020). Performance Comparison of Two Types of Natural and Artificial Covers in Reducing Evaporation from Water Reservoirs: A Case Study (Jiroft). Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 14(4), 1448-1459. https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1399.14.4.27.6 [In Persian]

Hashemi Monfared, S. A., Rezapoor, M., & Zhian, T. (2018). Investigation of the Effect of Wind Breaks in Decreasing Reservoir Evaporation Using Fluent (Case Study: Chahnimeh of Sistan). Iranian journal of Ecohydrology, 5(1), 265-278. https://doi.org/10.22059/ije.2017.236320.652 [In Persian]

zahiri, J., & Moradi-Sabzkouhi, A. (2023). Investigating the Interaction Effects of Meteorological Parameters on Evaporation from the Water Surface Using Variance Analysis. Journal of Drought and Climate change Research, 1(3), 87-104. https://dx.doi.org/10.22077/JDCR.2023.6498.1028 [In Persian]

Advanced Technologies in Water Efficiency

Razi University

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) in Iran based on multivariate standardized drought index

Sara Rezaei[1], Jafar Masoompoor Samakoosh [2]✉, Morteza Miri[3]

[1] M. Sc. of Climatology, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: sararezaee4030@gmail.com

[2] Corresponding Author, Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: j.masoompour@razi.ac.ir

[3] Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research Education and Extention Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: morteza.miri64@gmail.com

ABSTRACT

Drought is a costly natural hazard with wide-ranging consequences for agriculture, ecosystems, and water resources. The present study aims to investigate droughts in Iran using multi-variable indices. The data used includes soil moisture network data and monthly precipitation from the MERRA center over a 43-year period (1980-2022). Based on soil moisture and precipitation data, the results of a drought calculation in Iran demonstrated that droughts occur throughout the country with varying degrees of severity and weakness. Their occurrence has become a permanent feature of the country's climate, particularly in recent decades. The analysis of Iran's drought chronology revealed that, according to the MSDI index's range, most of the country's droughts are weak and moderate. It was also discovered that as time scales increase, the frequency of droughts decreases while the continuity, magnitude, and severity increase.

Keywords: Precipitation, Soil moisture, Duration, Severity, Drought

Article Type: Research Article

Article history: Received: 14 January 2024 **Revised:** 13 March 2024 **Accepted:** 20 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

The weather has an ongoing impact on human living and working environments. Drought is a natural disaster that ranks first in frequency of occurrence, financial losses, and even human casualties among natural disasters that endanger humans and their environment. Due to its complexity and imperceptibility, this phenomenon—one of the primary and recurring features of various climates—has significantly impacted the human environment more than any other hazard. Its effects can also accumulate gradually over time and last for years afterward.

Drought manifests across diverse climatic zones. Despite this, its characteristics, such as severity, duration, and magnitude, vary by location, and its occurrence is more common in arid and semi-arid areas. As a result, due to their geographic location, countries like Iran, which are found in arid and semi-arid regions, have long faced this risk and its effects.

Drought cannot be avoided, but if its nature and characteristics are researched and understood, we may be able to forecast when it will occur, lessen its adverse effects through planning and preparation, and perhaps even control it.

2. Methodology

The political region of Iran is the subject of this study (Figure 1). Soil moisture and monthly precipitation are among the data used. The necessary data, which included 516 precipitation files and 516 soil moisture files with a spatial resolution of 0.5*0.66 in NC format, as well as drought and its characteristics calculated for all points, were acquired from the MERRA website for 43 years (1980–2022) to conduct this research. Iran's droughts were estimated over 3, 6, 9, 12, and 24 months using the MSDI. The characteristics of droughts, such as frequency, duration, severity, and magnitude, were computed, analyzed, and presented as a map in addition to examining the actual droughts.

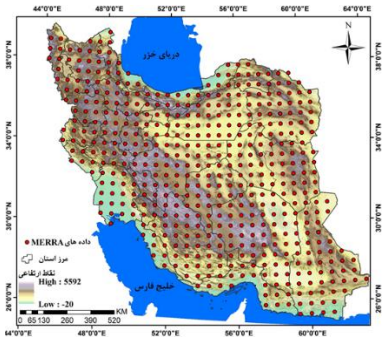


Figure 1. Map of the study area

This index's operational framework is an expanded version of the single-variable SPI that focuses on the joint distribution of soil moisture and

precipitation and can characterize the conditions of agricultural meteorological droughts across various periods. This index uses a combination of SSI and SPI to determine when a drought starts and ends. SPI is typically used to diagnose the start of a drought, while SSI's behavior is used to interpret its continuation.

Table 1.Classification of MSDI values (Aghakouchak and Hao, 2014)

Index value	Severity of drought
Very weak drought	- 0/1 to - 0/49
Weak drought	- 0/5 to - 0/7
Moderate drought	- 0/8 to -1/2
severe drought	-1/3 to -1/5

3. Results and discussion

Analyzing the drought characteristics for 1546 points across Iran revealed that the frequency and number of drought periods decrease as the time scale increases. In contrast, the values of other traits—such as continuity, intensity, and magnitude—also rise as the time scale increases. Put another way, droughts with more continuity, magnitude, and severity occur as the time scale increases. The increase in drought characteristics with increasing time scale, in terms of magnitude, duration, and severity, has been highlighted in studies by Nouri and Homai (2020) and Torabinejad et al. (2023). Geographically, the southeast and eastern parts of Iran have seen the highest frequency of droughts throughout the 43 years; in the southeastern part of the country, which is centered on the provinces of Sistan and Baluchestan, Kerman, and Hormozgan, there have been 28 to 34 periods of drought in 3 months. Conversely, the least amount of drought occurred in the northern coasts during the short-term periods of three and six months, with six to twelve periods, and in the coasts of the north and the southwestern region of the country during the long-term periods of twelve and twenty-four months, with two to six periods.

The provinces of Sistan Baluchistan, Kerman, and Hormozgan in the southeast, as well as the far east of Khorasan Razavi and South provinces in the east of the country, experienced the worst droughts in terms of severity. Severe droughts lasting 12 or 24 months are concentrated in the southwest, in Bakhtiari and Chaharmahal, Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, and part of Khuzestan.

The findings from the computation and analysis of the duration and magnitude of droughts in Iran over the period under discussion indicated that, for two features, the country's northern regions, centered on the north coasts, mainly Mazandaran province, had more prolonged and severe droughts than other regions within the time scales of three and six months. By looking at the country's southwest from the perspective of location over periods of 12 and 24 months, the provinces of Fars, Bushehr, south of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad, and Khuzestan province make up the central core of the most prolonged and most extensive droughts.

4. Conclusions

Based on soil moisture and precipitation data, the results of a drought calculation in Iran demonstrated that droughts occur throughout the country with varying degrees of severity and weakness. Their occurrence has become a permanent feature of the country's climate, particularly in recent decades. The analysis of Iran's drought chronology revealed that, according to the MSDI index's range, most of the country's droughts are weak and moderate. It was also discovered that as time scales increase, the frequency of droughts decreases while the continuity, magnitude, and severity increase. Geographically, the country's southeast and east saw the highest frequency of droughts, while its northern coast—mainly the province of Mazandaran—and southwest—where the provinces of Chaharmahal & Bakhtiari and Kohgiluyeh & Boyer Ahmad—saw the lowest frequency. The maximum severity of drought in the country is -1.93 on the 3-month scale in the southeast and -2.2 on the 24-month scale in the southwest. Two of the study's notable findings are the continuity and high magnitude of the droughts that struck the country's north and southwest. Thus, the most extensive droughts, with values between -16 and -31 on short-term scales and between -35 and -68 on 12- and 24-month scales, have happened in the country's north and southwest, respectively. These results suggest an overall decrease in soil moisture and precipitation in these regions.

Cite this article: Rezaie, S., Masoompoor Samakoosh, J., & Miri, M. (2024). Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) in Iran based on multivariate standardized drought index, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 82-98. DOI: 10.22126/atwe.2024.10319.1114

Publisher: Razi University
© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت، بزرگی) ایران بر اساس شاخص خشکسالی چند متغیره

سارا رضایی[۱]، جعفر معصوم‌پور سماکوش[۲]✉، مرتضی میری[۳]

[۱] دانش‌آموخته اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه:sararezaee4030@gmail.com
[۲] نویسنده مسئول، دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه:j.masoompour@razi.ac.ir
[۳] استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه:morteza.miri64@gmail.com

چکیده

پژوهش حاضر با هدف شناخت خشکسالی‌های ایران با استفاده از شاخص‌های چند متغیره بر اساس داده‌های با قدرت تفکیک مکانی مناسب، به‌منظور مدیریت بهتر منابع آب و در نهایت جلوگیری از خسارت‌های زیانبار بر جوامع انسانی انجام شده است. داده‌های مورداستفاده دربرگیرنده داده‌های شبکه‌ای رطوبت خاک و بارش ماهانه مرکز MERRA طی دوره ۴۳ ساله (۲۰۲۲-۱۹۸۰) برای محدوده سیاسی ایران‌زمین است. روش مورداستفاده مبتنی بر بکارگیری شاخص خشکسالی چند متغیره (MSDI) در مقیاس‌های زمانی مختلف و همچنین بررسی ویژگی‌های خشکسالی (مدت، فراوانی، شدت و بزرگی) در محیط نرم‌افزار متلب می‌باشد. نتایج محاسبه خشکسالی بر اساس داده‌های رطوبت خاک و بارش در سطح ایران نشان داد که خشکسالی با شدت و ضعف متفاوت در تمامی نقاط ایران رخ می‌دهد و رخداد آن به یکی از پدیده‌های همیشگی اقلیم ایران به‌ویژه طی دهه‌های اخیر تبدیل شده است. بررسی رخداد خشکسالی‌های ایران در حالت متوسط نشان داد که بر اساس دامنه شاخص MSDI بیشتر خشکسالی‌های رخ داده در پهنه ایران‌زمین از نوع خشکسالی‌های ضعیف و متوسط هستند. همچنین مشخص شد که از نظر زمانی با افزایش مقیاس‌های زمانی مشخصه فراوانی وقوع خشکسالی‌ها کاهش و مشخصه‌های تداوم، بزرگی و شدت افزایش پیدا می‌کند. از نظر مکانی بیشینه فراوانی وقوع خشکسالی‌ها در جنوب شرق و شرق کشور و کمینه آن در سواحل شمالی به‌ویژه در استان مازندران و در جنوب غرب برای استان‌های چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه بویر احمد رخ داده است. بیشینه شدت خشکسالی در سطح کشور برای مقیاس ۳ ماهه ۱/۹۳- در جنوب شرق کشور و در مقیاس ۲۴ ماهه ۲/۲- در جنوب غرب کشور است. یکی از نتایج قابل‌توجه در این پژوهش تداوم و بزرگای بالای خشکسالی‌های رخ داده در مناطق شمالی و جنوب غرب کشور است. به‌طوری‌که در مقیاس‌های کوتاه‌مدت ۳ و ۶ ماهه بزرگ‌ترین خشکسالی‌ها با مقدار ۱۶- تا ۳۱- در شمال کشور و در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماه با مقدار ۳۵- الی ۶۸- در جنوب غرب کشور رخ داده است که این شرایط بیان‌کننده کاهش رطوبت خاک و بارش این مناطق در حالت کلی است.

واژه های کلیدی: بارش، رطوبت خاک، تداوم، شدت، خشکسالی.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۲۳ اسفند ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۰۱ فروردین ۱۴۰۲ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: رضایی، س.، معصوم پور سماکوش، ج.، و میری، م. (۱۴۰۳). تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت، بزرگی) ایران بر اساس شاخص خشکسالی چند متغیره ، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۴(۱)، ۹۸-۸۲، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10319.1114

ناشر: دانشگاه رازی © نویسندگان.
CC BY NC

مقدمه

محیطی که بشر در آن زندگی و فعالیت می‌کند همواره تحت تأثیر آب‌وهوا قرا دارد. یکی از بلایای طبیعی، خشکسالی است که در بین بلایای طبیعی تهدیدکننده انسان و محیط زندگی او، هم از نظر فراوانی وقوع و هم از نظر خسارت‌های مالی و حتی جانی در رده اول قرار دارد (قویدل رحیمی، ۱۳۸۴). این پدیده در واقع از ویژگی‌های اصلی و تکرار شونده اقلیم‌های مختلف بشمار می‌آید. ممکن است در هر جایی رخ دهد به‌طوری‌که سالانه بیش از نیمی از کره زمین در معرض آن قرار دارد (کوگان[1]، ۱۹۹۷). این پدیده به‌دلیل پیچیدگی و غیرقابل احساس بودن، بیش از هر مخاطره دیگری محیط زندگی انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ساباش و همکاران[2]، ۲۰۱۱) و ماهیت بطئی و خزنده‌اش آن را به پنهان‌ترین و زیانبارترین بلیهٔ طبیعی تبدیل کرده است. این بدین معنی است که تعیین شروع و خاتمه آن مشکل و اثرات آن ممکن است به‌تدریج برای یک دوره طولانی روی هم انباشته شده و برای سال‌های پس از آن نیز ادامه داشته باشد (دانشور،۱۳۸۶). رخداد خشکسالی در مناطق مختلف جهان خسارت‌های قابل‌توجه و در برخی موارد جبران‌ناپذیری بر زیرساخت‌های انسانی و محیط زیستی وارد می‌کند که می‌توان به کاهش یا زوال ذخایر آبی، بدتر شدن کیفیت آب، عدم‌کفایت آب موردنیاز برای آبیاری و در نتیجه افت محصول، کاهش قدرت تولید، برهم خوردن تعادل زیستگاه‌های ساحلی و تأثیر بر فعالیت‌های اقتصادی–اجتماعی اشاره کرد (میشرا و سینک[3]، ۲۰۱۰).

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ویژگی‌های خشکسالی و همچنین خسارت‌های زیاد آن باعث شده که مطالعات زیادی در ارتباط با ارائه شاخص مناسب جهت شناخت و بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی از دهه‌های قبل تا به امروز انجام شود. نتیجه این مطالعات ارائه شاخص‌های متنوعی است که مبتنی بر به‌کارگیری داده‌های بارش، تبخیر و تعرق، دما، رطوبت خاک، پوشش گیاهی می‌باشد که برخی از این شاخص بر اساس یک متغیر و برخی دیگر بر اساس چند متغیر پایش و شناخت ویژگی‌های خشکسالی را امکان‌پذیری می‌کنند. شاخص دهک‌ها (DI) مبتنی بر استفاده از بارش (گیبز و ماهر[4]، ۱۹۶۷)، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PSDI) بر اساس داده‌های بارش و دمای ماهانه (پالمر[5]، ۱۹۶۵)، شاخص بارش استاندارد (SPI) مبتنی بر استفاده از بارش (مکی و همکاران[6]، ۱۹۹۳)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق (ساکریس و همکاران[7]، ۲۰۰۵)، شاخص تبخیر و تعرق استانداردشده (SPEI) با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق (ویسنت سرانو و همکاران[8]، ۲۰۱۰) از جمله شاخص‌های شناخته شده و مورد پذیرش بین گستره محققان علوم مرتبط است.

همان‌طور که بیان شد در دهه‌های گذشته تلاش‌های مختلفی برای توصیف ویژگی‌های خشکسالی از طریق شاخص‌های خشکسالی انجام شده است که بیشتر این شاخص‌ها تک متغیره و یا مبتنی بر پارامترهای اقلیمی هستند. شاخص‌های منفرد یا تک متغیره برای مکان‌های خاص و هدف و کاربردی مشخص تا حد زیادی مفید می‌باشند اما تصویر جامعی از ویژگی‌های خشکسالی به‌عنوان یک پدیده پیچیده‌ی اقلیمی ارائه نمی‌نمایند. ازاین‌رو تلاش‌هایی برای توسعه‌ی شاخص‌های چند متغیره مبتنی بر ترکیب شاخص‌های مختلف خشکسالی یا معرف‌های مختلف خشکسالی به‌منظور ارائه‌ی تصویر جامع از شرایط و ویژگی‌های خشکسالی از سال‌های قبل شروع شده و در حال حاضر نیز ادامه دارد. یکی از نخستین تلاش‌ها برای پایش جامع خشکسالی در ایالات‌متحده آمریکا انجام شده است که در آن اطلاعات به‌دست‌آمده از منابع مختلف شامل داده‌های اندازه‌گیری شده، سنجش‌ازدور، شبیه‌سازی‌های سطح زمین و کارشناسان محلی

---

[1] Kogan
[2] Subash et al
[3] Mishra & Singh
[4] Gibbs & Maher
[5] Palmer
[6] McKee et al
[7] Tsakiris et al
[8] Vicente-Serrano et al

باهم ترکیب شدند (کومار و همکاران[1]،۲۰۱۱). شاخص چند متغیره خشکسالی تجمعی (ADI) از ترکیب پارامترهای مؤثر بر خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی، از طریق تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) توسعه یافته است (کیانتاش و دراکوپ[2]،۲۰۰۴). همچنین شاخص خشکسالی توأم (JDI)، بر مبنای توابع مفصل توزیع تجمعی بارندگی و رواناب توسعه داده شد (کائو و گویندارجو[3]؛۲۰۱۰). این مفهوم در سال‌های بعد برای توسعه‌ی شاخص‌های چند متغیره نیز استفاده شد (هائو و آقاکوچک[4]،۲۰۱۳، و ما و همکاران[5]،۲۰۱۴). در حال حاضر شاخص خشکسالی استاندارد شدهٔ چند متغیره (MSDI) مبتنی بر داده‌های بارش و رطوبت خاک یکی از شاخص‌های موردتوجه محققان طی دهه اخیر است. هائو و آقاکوچک (۲۰۱۳)، شاخص خشکسالی استانداردشده‌ی چند متغیره (MSDI) را برای بررسی خشکسالی‌های کالیفرنیا و کارولینای شمالی مورداستفاده قراردادند و نتایج حاصل از این شاخص ترکیبی را با شاخص‌های خشکسالی حساسیت به تنش (SSI) و بارش استانداردشده (SPI) مقایسه کردند. نتایج نشان داد که MSDI نشان‌دهنده‌ی شروع و پایان خشکسالی بر اساس SPI و SSI است، بدین ترتیب که شروع خشکسالی با SPI و دوام و پایداری آن با رفتار SSI هماهنگی دارد. گولین و همکاران[6] (۲۰۱۴)، با هدف تحلیل روند خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی در ایران با استفاده از شاخص MSDI و آزمون من-کندال نشان دادند که با اطمینان ۹۵٪ درحالی‌که در شرق ایران آمار قابل‌توجهی از خشکسالی مشاهده نشد، بخش‌های شمال، شمال غرب و مرکزی ایران خشکی قابل‌توجهی را تجربه کرده‌اند. آقاکوچک (۲۰۱۵)، در پیش‌بینی خشکسالی، برمبنای تداوم به‌کاربرده شده برای خشکسالی ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ شرق آفریقا با استفاده از شاخص (MSDI) نشان داد که پیش‌بینی‌ها و مشاهدات برهم منطبق هستند. به‌علاوه نتایج به‌دست‌آمده بر توانایی کاربردی این مدل برای هشدار احتمال خشکسالی در شرق آفریقا تأکید می‌کند. وانگ و همکاران[7] (۲۰۲۰)، با استفاده از سه شاخص SPI، SSMI و MSDI خشکسالی‌های منطقه سین کیانگچین را بررسی و بیان نمودند که شاخص MSDI با در نظر گرفت مقادیر بارش و رطوبت خاک می‌تواند شرایط کلی خشکسالی به بهترین شکل توصیف کند. بات و همکاران[8] (۲۰۲۱) خشکسالی‌های رخ داده در حوضه رودخانه گوماتی هند را با استفاده از شاخص MSDI طی دوره ۱۹۸۳-۲۰۱۵ بررسی کردند.

همان‌طور که بیان شد رخداد خشکسالی در اقلیم‌های مختلف رخ می‌دهد، باوجوداین ویژگی‌های آن از قبیل شدت، مدت و بزرگی خشکسالی از محلی به محلی دیگر متفاوت (بارن[9]، ۱۹۸۵) و فراوانی رخداد آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر است (رضیئی و همکاران، ۱۳۸۶). ازاین‌رو کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان همانند کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود از دیرباز با این مخاطره و پیامدهای آن مواجه بوده‌اند. بخش‌های وسیعی از ایران به علت قرار گرفتن در کمربند بیابانی جنب حاره و سلطه مراکز پرفشار دینامیکی دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک است و همواره بارش کمی را دریافت می‌کند. از طرف دیگر تمرکز و توزیع مکانی – زمانی بارش در این نواحی نامطلوب و رژیم بارشی آن دارای نوسانات شدیدی است (قویدل رحیمی، ۱۳۸۴). این در حالی است که بارندگی مهم‌ترین متغیری است که تغییرات آن به‌طور مستقیم در رطوبت خاک، جریان‌های سطحی، تغییرات تراز آب زیرزمینی و...منعکس می‌شود. به همین دلیل بارش اولین عاملی است که می‌تواند در بررسی هر حالتی از خشکسالی موردتوجه قرار گیرد (قمقامی و بذرافشان، ۱۳۹۱). هر چند از وقوع خشکسالی نمی‌توان جلوگیری کرد اما اگر ماهیت و خصوصیات آن موردمطالعه و بررسی قرار گیرد می‌توان نسبت به پیش‌بینی آن امیدوار بود و با آمادگی و برنامه‌ریزی، اثرات زیانبار آنرا کاهش و در صورت ممکن کنترل کرد. ازاین‌رو

[1] Kumar et al
[2] Keyantash & Dracup
[3] Kao & Govindaraju
[4] Hao & AghaKouchak
[5] Ma et al
[6] Golin et al
[7] Wang et al
[8] Bhatt et al
[9] Baren

بررسی علمی پدیده خشکسالی در ایران به‌خصوص بر اساس شاخص‌های چند متغیره که علاوه بر بارش از دیگر پارامترهای اقلیمی برای برآورد خشکسالی استفاده می‌کند به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و مقابله با مشکلات ناشی از کمبود آب ضروری می‌باشد.

روش پژوهش

منطقه موردمطالعه در این پژوهش محدوده سیاسی کشور ایران است که در شکل (۱) نشان داده شده است. داده‌های مورداستفاده شامل بارش و رطوبت خاک ماهیانه است. با توجه به اینکه در سطح کشور داده‌های رطوبت خاک با طول دوره آماری مناسب و جود ندارد ازاین‌رو از داده‌های بارش و رطوبت خاک محاسبه شده توسط مرکز MERRA استفاده شد. داده‌های این مرکز از سال ۱۹۸۰ با تأخیر چند ماه تا زمان کنون در اختیار محققان قرار می‌گیرد. برای انجام این تحقیق داده‌های موردنیاز از تارنمای MERRA برای یک دوره ۴۳ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۲) شامل ۵۱۶ فایل بارش و ۵۱۶ فایل رطوبت خاک با قدرت تفکیک مکانی (Latitude) 0/66* (Longitude) 0/5 با فرمت NC دریافت شد. تعداد نقاط داده‌های بارش و رطوبت خاک MERRA برای پهنه ایران‌زمین ۱۵۴۶ نقطه است که خشکسالی و ویژگی‌های آن برای تمامی نقاط محاسبه شد.

در این پژوهش برای محاسبه خشکسالی‌های رخ داده در پهنه ایران، از شاخص خشکسالی چند متغیره (MSDI) استفاده شد. پس از دریافت داده‌های نام برده شده، با توجه به حجم زیاد داده‌ها و طول دوره آماری، پیش‌پردازش‌های لازم و پردازش داده‌ها در محیط متلب انجام شد و در ادامه با استفاده از کد تهیه‌شده توسط آقا کوچک و همکاران برای شاخص MSDI، خشکسالی‌های ایران در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه گردید. در این پژوهش علاوه بر بررسی خشکسالی‌های رخ داده، با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط متلب، ویژگی‌های خشکسالی شامل؛ فراوانی، تداوم، شدت و بزرگی نیز محاسبه و بررسی شد. برای استخراج و بررسی ویژگی‌های خشکسالی ایران از تئوری ران که یکی از روش‌های متداول تحلیل خشکسالی است، استفاده شد. براساس این تئوری طول دوره خشکسالی یا تداوم آن(DD) عبارت است از زمانی که مقدار شاخص خشکسالی به پایین‌تر از آستانه مربوطه(مثلاً ۱-) برسد که در رابطه (۱) ارائه شده است. قابل ذکر است مادامی که مقدار شاخص خشکسالی پایین‌تر از سطح آستانه باشد خشکسالی ادامه می‌یابد و زمانی که مقدار شاخص خشکسالی به بالای سطح آستانه برسد، خشکسالی پایان می‌یابد. بر این اساس تعدا دفعاتی که طی یک دوره آماری مقدار شاخص خشکسالی پائین‌تر از سطح آستانه خشکسالی باشد را فراوانی وقوع خشکسالی(DF) می‌گویند که به کمک رابطه (۲) محاسبه می گردد. شدت خشکسالی(DS) برابر با مجموع کمبودهای متغیر اصلی از سطح بحرانی مورد نظر در دوره وقوع خشکسالی است که با رابطه (۳) محاسبه می گردد. بزرگی خشکسالی(DM) که در واقع میانگین کمبودها می باشد برابر است با نسبت مجموع کمبودها به طول دوره خشکسالی که با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

رابطه (۱):

$$DL=t_f-t_i+1$$

در رابطه (۱)، DL طول دوره خشکسالی، t_f و t_i به ترتیب برابر است با زمان پایان خشکسالی و زمان رخداد خشکسالی

رابطه (۲):

$$DF=\frac{DE}{N}\times 100$$

در رابطه(۲)، DF فراوانی وقوع خشکسالی، DE برابر است با ماه‌های همراه با رخداد خشکسالی و N تعداد کل ماه‌های دوره

رابطه (۳):

$$DS=\sum_{t=1}^{dl}|x_0-x_t|$$

در این رابطه، DS شدت خشکسالی، dl تعداد کل ماه‌های همراه با خشکسالی، x_0 سطح آستانه خشکسالی، x_t متغیر اصلی(شاخص خشکسالی)

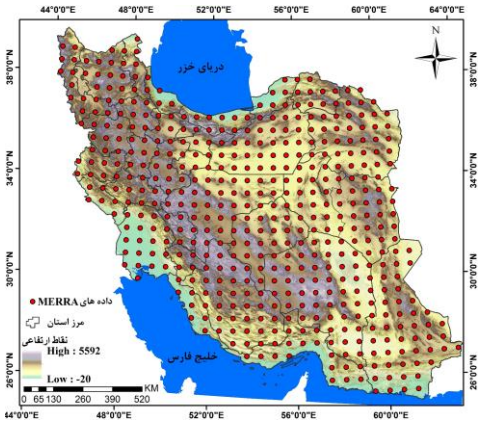
رابطه (۴):

$$DM=\frac{DS}{DL}$$

در رابطه (۴)، DM بزرگی خشکسالی، DS شدت خشکسالی، DL طول دوره خشکسالی(مساعدی و همکاران،۱۳۹۵.، و میشرا و همکاران[1]، ۲۰۰۹).

[1] Mishra et al

در نهایت نتایج حاصل از محاسبه شاخص MSDI و ویژگی‌های آن در مقیاس‌های زمانی مختلف در محیط GIS تبدیل به نقشه و نمایش داده شد.



شکل ۱. نقشه محدوده موردمطالعه

شاخص چند متغیره خشکسالی (MSDI)

چهارچوب کار این شاخص، نسخه‌ی بسط داده شده‌ی SPI تک متغیره، روی توزیع مشترک بارش و رطوبت خاک می‌باشد که قادر به توصیف شرایط خشکسالی‌های هواشناسی-کشاورزی در مقیاس‌های زمانی مختلف می‌باشد. در واقع این شاخص، شروع و پایان خشکسالی را بر اساس ترکیب SSI و SPI تعیین می‌کند که در آن تشخیص شروع غالباً با SPI و تشخیص تداوم آن با توجه به رفتار SSI می‌باشد. از مهم‌ترین ویژگی‌های شاخص MSDI می‌توان به موارد زیر اشاره کرد؛

الف) MSDI شرایط خشکسالی را با توجه به یکی از شاخص‌ها، هم بارش هم رطوبت تشخیص می‌دهد.

ب) MSDI شروع خشکسالی را با همان سرعت SPI نشان می‌دهد و تداوم خشکسالی را مشابه SSI تعیین می‌کند.

ج) MSDI هنگامی‌که هر دو شاخص بارش و رطوبت خاک مقدار کمی را نشان دهند، شدت خشکسالی بیشتری را نشان خواهد داد.

شایان‌ذکر است که شاخص خشکسالی استانداردشده‌ی چند متغیره، همانند SPI و SSI تک متغیره، احتمال وقوع را نشان می‌دهد که می‌تواند برای تحلیل‌ها به‌خوبی مورداستفاده قرار گیرد (هائو و آقاکوچک،۲۰۱۳).

جدول ۱. طبقه‌بندی مقادیر MSDI (آقاکوچک و هائو[1]، ۲۰۱٤)

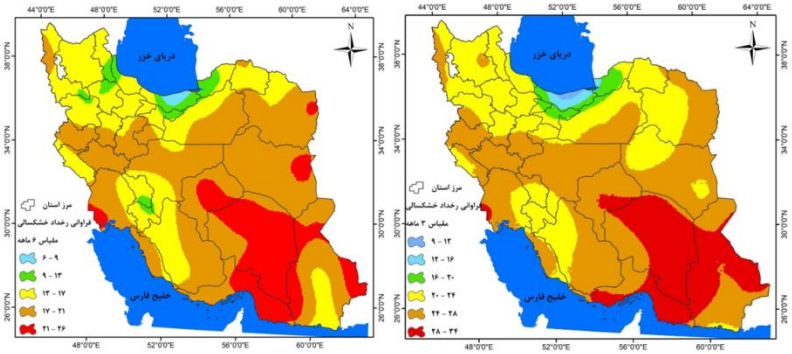
مقدار شاخص	شدت خشکسالی
۰/۴۹- تا ۰/۱-	خشکسالی خیلی ضعیف
۰/۷- تا ۰/۵-	خشکسالی ضعیف
۱/۲- تا ۰/۸-	خشکسالی متوسط
۱/۵- تا ۱/۳-	خشکسالی شدید

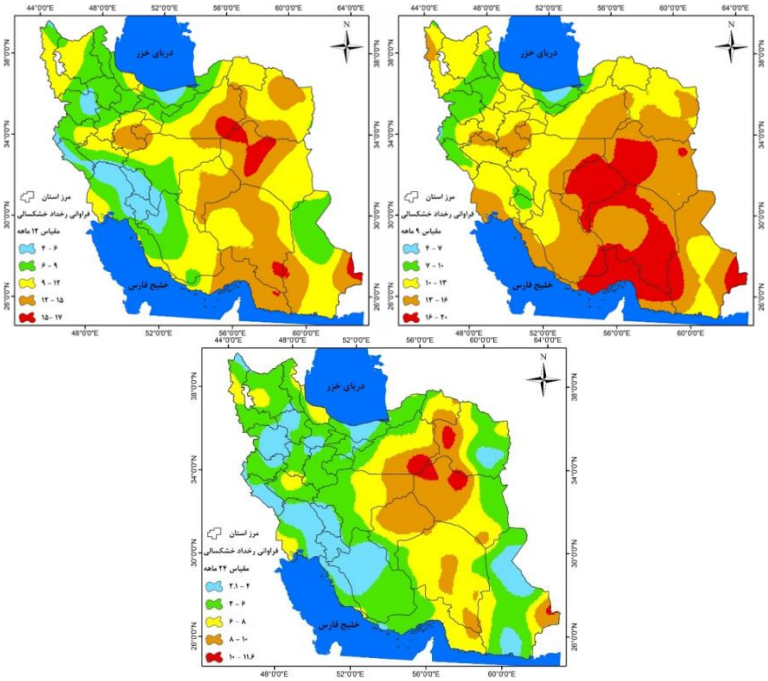
[1] Hao & AghaKouchak

یافته‌ها

فراوانی رخداد خشکسالی

شکل (۲) پهنه‌بندی فراوانی وقع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف را برای سطح ایران‌زمین نشان می‌دهد. همان‌طور که روی شکل مشخص است، در مقیاس زمانی ۳ ماهه بیشینه فراوانی وقوع خشکسالی در سطح کشور برای منطقه جنوب شرق در سطح قابل‌توجهی از استان کرمان، سیستان و بلوچستان و هرمزگان رخ داده است. پهنه دوم بیشینه رخداد خشکسالی با مقدار ۲۴ الی ۲۸ رخداد در نیمه جنوبی و قسمتی از شمال شرق کشور قابل‌مشاهده است. در مقابل کمینه فراوانی وقوع خشکسالی در سواحل شمالی کشور با محوریت استان‌های مازندران و قسمت غربی استان گلستان است که در سواحل استان مازندران بین ۹ الی ۱۲ دوره می‌باشد. قسمت‌های شمال غربی و دامنه‌های جنوبی البرز و همچنین قسمتی از جنوب غرب شامل استان‌های چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویر احمد و قسمت‌های از اصفهان، فارس و خوزستان فراوانی وقوع خشکسالی بین ۲۰ الی ۲۴ دوره بوده است. در مقیاس زمانی ۶ ماهه از نظر مکانی الگوی فراوانی وقوع خشکسالی همانند مقیاس زمانی ۳ ماهه است با این تفاوت که در این مقیاس پهنه‌های حداکثر و حداقلی از نظر گستره سطح کمتری را در برمی‌گیرند. در مقیاس زمانی ۹ ماهه قسمت‌های غربی و شمالی کشور نسبت به قسمت‌های جنوبی و به‌ویژه قسمت‌های مرکزی و جنوب شرقی فراوانی وقوع خشکسالی کمتری را تجربه کرده‌اند. در این مقیاس کمترین رخداد خشکسالی ۴ الی ۷ دوره در نواحی شمالی کشور و بیشینه آن ۲۰ الی ۱۶ دوره در جنوب کشور برای استان هرمزگان و در مرکز کشور برای استان یزد رخ داده است. در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه فراوانی وقوع خشکسالی در پهنه کشور هم از نظر الگویی و هم از نظر تعداد دوره نسبت به سه مقیاس دیگر متفاوت شده است. در این مقیاس‌های هسته‌های کمترین رخداد خشکسالی با افزایش همراه شده است و در قسمت‌های مختلف کشور مشاهده می‌شود. در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه، هسته بیشینه فراوانی وقوع خشکسالی در قسمت‌های محدودی از استان خراسان رضوی، جنوبی و همچنین قسمت شرقی استان سمنان با ۱۰ الی ۱۲ دوره رخ داده است. به‌طورکلی می‌توان گفت که در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر در یک راستای غربی- شرقی فراوانی دوره‌های خشکسالی افزایش پیدا می‌کند.



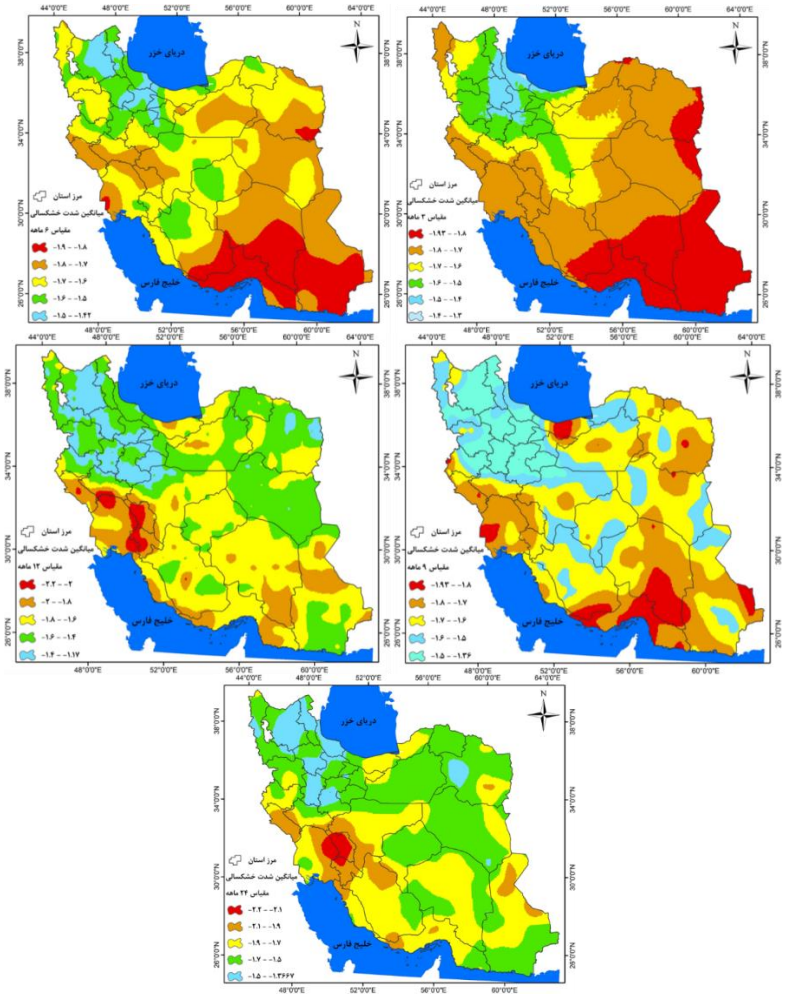


شکل ۲. پهنه‌بندی فراوانی رخداد خشکسالی ایران در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ۲٤ ماهه بر اساس تناسب با شاخص MSDI (۱۹۸۰-۲۰۲۲)

شدت خشکسالی

نتایج محاسبات شاخص شدت خشکسالی در مقیاس‌های مختلف زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه بر اساس شاخص MSDI در شکل (۳) نشان داده شده است. در مقیاس زمانی سه ماهه، خشکسالی‌های با بیشترین شدت در منطقه جنوب شرق و قسمتی منتهی‌الیه شرق ایران رخ داده است. از نظر مکانی هسته بیشینه شدت خشکسالی دربرگیرنده استان سیستان و بلوچستان، هرمزگان، جنوب شرق استان فارس، نیمه جنوبی استان کرمان و شرق استان‌های خراسان رضوی و جنوبی است. در این مناطق متوسط شدت خشکسالی‌های رخ داده در مقیاس زمانی ۳ ماه به کمتر از بین ۱/۸- الی ۱/۹۳- می‌رسد که بر اساس تقسیم‌بندی محدوده شاخص MSDI از نوع خشکسالی‌های بسیار شدید هستند. پهنه دوم خشکسالی‌های با بیشینه شدت که سطح قابل‌توجهی از کشور را نیز در مقیاس ۳ ماهه شامل می‌شود دربرگیرنده نواحی جنوب غرب، شرق و شمال شرق است که شدت خشکسالی‌ها بین ۱/۸- الی ۱/۷- است. در مقابل این مناطق، خشکسالی‌های با کمترین شدت در سواحل استان گیلان و قسمت‌های از استان‌های زنجان و اردبیل با مقدار ۱/۳- الی ۱/۴ رخ داده است. در مقیاس زمانی ۶ ماهه از گستره خشکسالی‌های شدید در پهنه کشور کاسته شده است به‌طوری‌که هسته بیشینه شدت سطح کمتری از مناطق جنوب شرق کشور با محوریت استان هرمزگان را شامل می‌شود. در این مقیاس بیشینه متوسط شدت خشکسالی‌های رخ داده بین ۱/۸- الی ۱/۹- است که از نظر مقدار نیز نسبت به مقیاس زمانی ۳ ماهه کاهش پیدا کرده است. در این مقیاس هسته‌ی کمینه شدت علاوه بر استان گیلان منطقه شمال غرب و استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل را نیز شامل می‌شود. در این مقیاس شدت خشکسالی‌های منطقه غرب و جنوب غرب کشور نیز کمتر شده است. در مقیاس ۹ ماهه تمرکز بیشینه شدت خشکسالی در استان مازندران و قسمت‌هایی از جنوب شرق، جنوب و جنوب غرب و کمینه آن در قسمت‌های شمال غرب کشور مشاهده می‌شود. نکته قابل‌توجه برای این مقیاس گستردگی پهنه خشکسالی با کمینه شدت در منطقه غرب و شمال غرب کشور است. در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه هرچند هسته بیشینه شدت خشکسالی از نظر گستره کمتر شده است و بیشتر در منطقه جنوب غرب کشور با محوریت استان‌های چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویر احمد مشاهده می‌شود بااین‌وجود مقدار شدت نسبت به مقیاس قبلی بیشتر شده است. به‌طوری‌که متوسط شدت هسته بیشینه شدت خشکسالی بین ۲/۲ الی ۲ می‌باشد که این شدت در مقیاس‌های

قبلی ثبت نشده بود؛ بنابراین بر اساس مقدار شدت‌های ثبت شده می‌توان گفت که شدیدترین خشکسالی‌های کشور بر اساس ترکیب مقادیر بارش و رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه به وقوع پیوسته است. قابل‌ذکر است که شدت خشکسالی در این مقیاس برای سایر نواحی کشور نیز قابل‌توجه است.

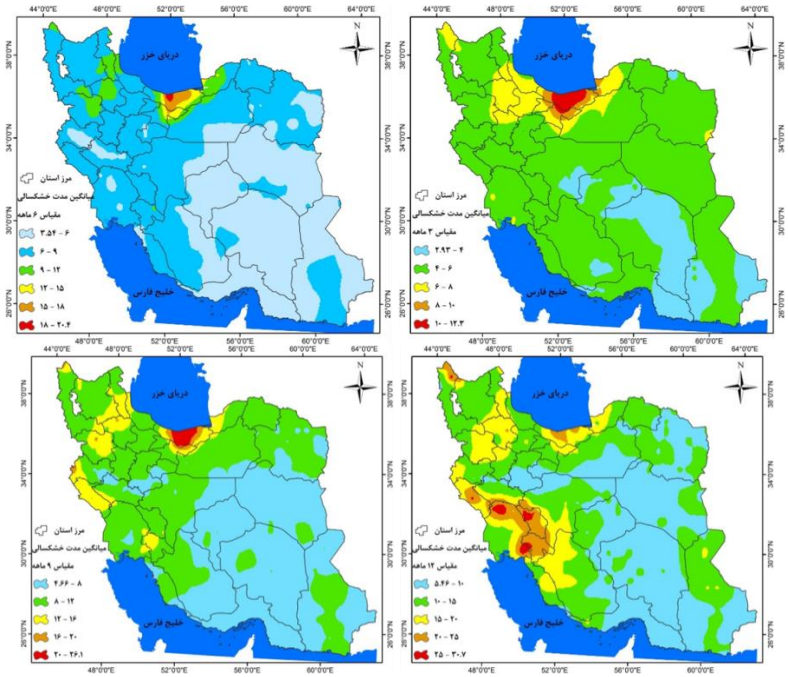


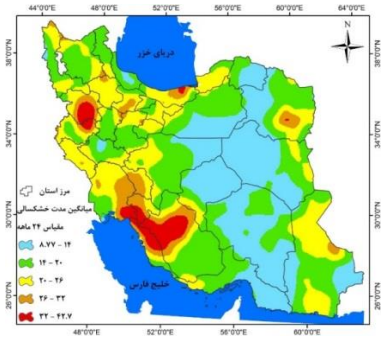
شکل ۳. پهنه‌بندی میانگین شدت خشکسالی ایران در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ٢٤ ماهه بر اساس تناسب با شاخص MSDI (۱۹۸۰-۲۰۲۲)

مدت خشکسالی

شکل (۴) متوسط تداوم خشکسالی‌های رخ داده در سطح ایران بر اساس شاخص MSDI در مقیاس‌های مختلف زمانی ۳، ۹، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه را نشان می‌دهد. همان‌طور که روی شکل مشخص است در حالت کلی با کاهش عرض جغرافیایی و با حرکت به عرض‌های پایین‌تر و به‌ویژه مناطق جنوب شرق کشور، از مدت خشکسالی‌ها کاسته می‌شود به‌طوری‌که در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه بیشینه وقوع خشکسالی و کانون متأثر از این پدیده مخرب، معطوف به شمال کشور به‌ویژه استان‌های مازندران و قسمتی از تهران می‌باشد. یکی از نکات قابل‌توجه در بحث تداوم خشکسالی افزایش هسته‌های با تداوم خشکسالی در نقاط مختلف کشور برای مقیاس زمانی ۲۴ ماهه است به‌طوری‌که در نقشه خشکسالی ۲۴ ماهه هسته‌های با خشکسالی‌های طولانی علاوه بر شمال کشور در غرب و جنوب غرب مشاهده می‌شود. این هسته‌ها از نظر مکانی بر روی استان‌های بوشهر، فارس، خوزستان و کهگیلویه و بویر احمد در جنوب غرب و استان‌های کردستان و کرمانشاه در غرب قرار دارد.

در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه در مناطق شمالی، غرب و جنوب غرب کشور بخصوص استان‌های کردستان، قسمت‌هایی از خوزستان، بوشهر و فارس بیشینه میانگین مدت خشکسالی بیش از سایر نواحی کشور بوده است. بر اساس محاسبات انجام‌شده تداوم خشکسالی در مناطق شرق و جنوب شرق کشور کمتر از سایر نواحی است و کمینه تداوم خشکسالی در این مناطق طی دوره موردمطالعه قابل‌مشاهده است، قابل‌ذکر است این شرایط در مقیاس‌های مختلف زمانی رخ داده است. با توجه به توزیع توپوگرافی و به‌تبع شرایط اقلیمی حاکم بر مناطق مختلف کشور تفاوت در مدت خشکسالی‌های رخ داده می‌تواند ناشی از تفاوت در ویژگی‌های محیطی و موقعیت جغرافیایی آن‌ها نسبت به سامانه‌های بارشی باشد.



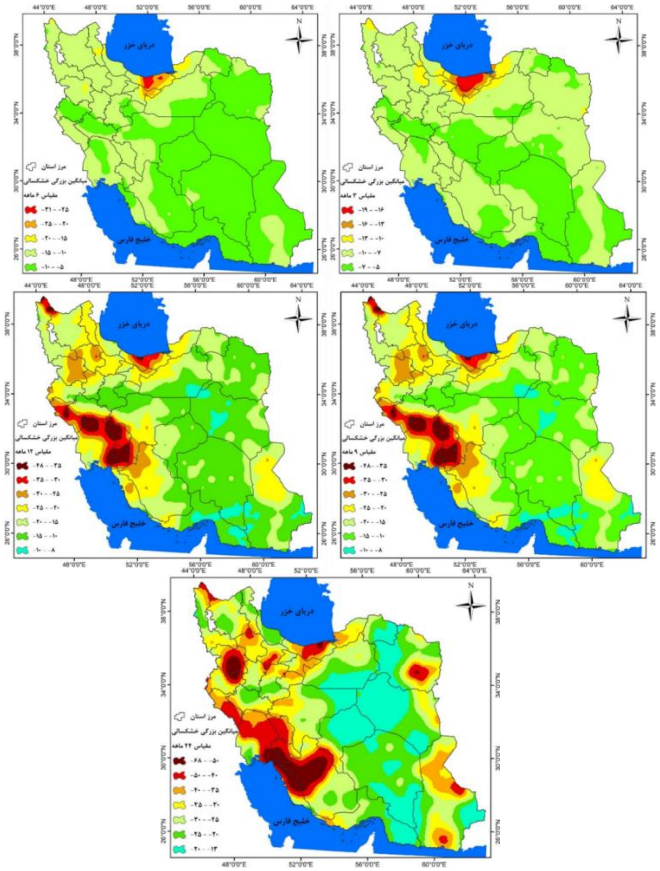


شکل ٤. پهنه‌بندی میانگین مدت خشکسالی ایران در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦، ۹،۱۲ و ٢٤ ماهه بر اساس تناسب با شاخص MSD (۱۹۸۰-۲۰۲۲)

بزرگی خشکسالی

در شکل (۵) بزرگی خشکسالی‌های رخ داده در مقیاس‌های زمانی‌های مختلف ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده الگوی مشخصه بزرگی خشکسالی همانند مشخصه تداوم خشکسالی است. این شباهت در واقع به این دلیل است که مشخصه بزرگی خشکسالی، از خشکسالی مقدار تجمعی شاخص در مدت رخداد خشکسالی است. همان‌طور که روی نقشه مشخص است در مقیاس زمانی ۳ ماهه بیشینه بزرگی خشکسالی همانند مشخصه تداوم، برای مناطق شمالی کشور با محوریت سواحل شمالی به‌ویژه استان مازندران است. مقدار بزرگی خشکسالی برای استان مازندران حداقل ۱۶- و حداکثر ۱۹- است. در این مقیاس پهنه دوم بالاترین بزرگی خشکسالی برای قسمت‌های مرکزی دامنه‌های جنوبی البرز و شرق استان مازندران و غرب استان گلستان با مقدار ۱۳- الی ۱۹- می‌باشد. در مقابل برای مقیاس زمانه ۳ ماهه کمینه بزرگی خشکسالی در قسمت‌های مختلف کشور با محوریت مناطق مرکزی قابل‌مشاهده است که بین ۵- الی ۷- می‌باشد. قسمت‌های شمال غرب کشور از نظر بزرگی خشکسالی‌ها با بزرگی ۷- الی ۱۰- و قسمت‌های شرقی و غربی دامنه‌های جنوبی البرز خشکسالی‌های با بزرگی ۱۰- الی -۱۳ را طی دوره ۲۰۲۰-۱۹۸۰ تجربه کرده‌اند. در مقیاس زمانی ۶ ماهه الگوی بزرگی خشکسالی‌ها همانند مقیاس زمانی ۳ ماهه است با این تفاوت که گستره هسته حداکثر بزرگی کمتر و در مقابل مقدار بزرگی بیشتر شده است. در این مقیاس بالاترین بزرگی خشکسالی در سواحل شمالی کشور حداقل ۲۵- و حداکثر ۳۱- است. مقادیر هسته کمینه بزرگی خشکسالی که سطح قابل‌توجهی از کشور را در نیمه شرقی و جنوبی پوشش می‌دهد بین ۵- الی ۱۰- است.

مشخصه بزرگی خشکسالی برای مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه نسبت به دو مقیاس قبلی با تفاوت‌های قابل‌توجهی از نظر مکانی و مقدار همراه شده است به‌طوری‌که هسته‌های بالاترین بزرگی خشکسالی علاوه بر نواحی شمالی به‌طور قابل‌توجهی در منطقه جنوب غرب و با محوریت استان‌های چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویر احمد، شمال استان خوزستان و مرکز ایلام نیز قابل‌مشاهده است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه حداقل بزرگی خشکسالی در سطح کشور ۸- و حداکثر مشخصه بزرگی خشکسالی ۴۸- است. در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه، هرچند هسته‌های بیشینه بزرگ‌ترین خشکسالی‌ها نسبت به مقیاس زمانی ۱۲ ماهه بیشتر شده است و در قسمت‌های مختلف کشور (سواحل شمالی، شمال غرب، جنوب شرق، جنوب غرب و غرب) قابل‌مشاهده است باوجوداین هسته اصلی آن در جنوب غرب کشور با گستره قابل‌توجه بر روی استان‌های فارس، بوشهر، جنوب کهگیلویه و بویر احمد و استان خوزستان رخ داده است. مقدار مشخصه بزرگی این هسته بین ۵۰- الی ۶۸- است. در این مقیاس حداقل مشخصه بزرگی خشکسالی ۱۳- و حداکثر مشخصه بزرگی خشکسالی ۶۸- است. به‌طورکلی در این مقیاس و مقیاس ۱۲ ماهه منطقه جنوب غرب کشور خشکسالی‌های با بزرگی قابل‌توجهی را تجربه می‌کنند. در این مقیاس هسته کمینه بزرگی خشکسالی در یک راستای شمالی- جنوبی، استان‌های خراسان شمالی تا استان هرمزگان را پوشش می‌دهد که مقدار بزرگی خشکسالی بین حداقل -۱۳ و حداکثر ۲۰- است.



شکل ۵. پهنه میانگین بزرگی خشکسالی ایران در مقیاس‌های زمانی ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ٢٤ ماهه بر اساس تناسب با شاخص MSDI (۱۹۸۰-۲۰۲۲)

بحث

کشور ایران به‌واسطه موقعیت جغرافیایی خود از دیرباز تا به امروز خشکسالی‌های زیادی را با شدت و ضعف متفاوت تجربه کرده است. هرچند خشکسالی در سطح کشور ایران به‌عنوان یک پدیده شناخته‌شده مطرح است و مطالعات زیادی با استفاده از شاخص‌های مختلف به‌منظور شناسایی و تحلیل آن انجام شده است باوجوداین استفاده از شاخص‌های تک‌بعدی نمی‌تواند تمام جنبه‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی را نشان دهد و برای رسیدن به این هدف باید از یک رویکرد چند شاخصه استفاده کرد (هائو و آقاکوچک، ۲۰۱۳). در واقع نبود یک سیستم یا مدل تلفیق اطلاعات مرتبط با خشکسالی شامل، متغیرهای مختلف اقلیمی، شاخص‌های خشکسالی و روابط متقابل آن‌ها، مانع از تشخیص قابل‌اعتماد و به‌موقع خشکسالی و پایداری آن می‌شود (هائو و آقاکوچک، ۲۰۱۴). ازاین‌رو در این پژوهش سعی بر این شد که خشکسالی‌های ایران و ویژگی‌های آن در درازمدت با استفاده از شاخص چند متغیره خشکسالی (MSDI) مبتنی بر داده‌های ترکیبی بارش و رطوبت خاک مرکز MERRA محاسبه و مشخصه‌های مهم آن شامل؛ فراوانی، تداوم، شدت و بزرگی موردبررسی قرار گیرد. شناخت ویژگی‌های رویدادهای خشکسالی در یک منطقه می‌تواند به‌عنوان ابزاری مهم برنامه‌ریزان را در جهت برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر، یاری رساند. با دانستن احتمال وقوع رویدادهای خشکسالی با شدت و گستره معین می‌توان طوری برنامه‌ریزی نمود که با کمترین آسیب و به سلامت از دوره‌های سخت خشکسالی گذر نمود و یا به‌عبارتی‌دیگر با خشکسالی آگاهانه و با برنامه زندگی کرد (رضیئی، ۱۳۹۴).

بررسی ویژگی‌های خشکسالی برای ۱۵۴۶ نقطه در سطح کشور ایران نشان داد که در حالت کلی مقادیر مشخصه فراوانی وقوع خشکسالی با افزایش مقیاس زمانی کاهش پیدا می‌کند و از تعداد دوره‌های وقوع خشکسالی کم می‌شود درحالی‌که برای سایر مشخصه‌ها شامل؛ تداوم، شدت و بزرگی با افزایش مقیاس زمانی مقادیر مشخصه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. به‌عبارتی‌دیگر با افزایش مقیاس زمانی خشکسالی‌های با تداوم، بزرگی و شدت بالاتری رخ می‌دهند. در تحقیق ترابی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۲) با موضوع بررسی ویژگی‌های خشکسالی‌های ایران با استفاده از شاخص SPEI و همچنین در تحقیق نوری و همائی (۲۰۲۰) با موضوع بررسی روند و ویژگی‌های خشکسالی‌های ایران با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI، بر افزایش مشخصه‌های بزرگی، تداوم و شدت خشکسالی با افزایش مقیاس زمانی تأکید شده است. از نظر مکانی بیشینه فراوانی وقوع خشکسالی‌های ایران طی دوره ۴۳ ساله در منطقه جنوب شرق و شرق کشور رخ داده است به‌طوری‌که در مقیاس زمانی ۳ ماهه در منطقه جنوب شرق کشور با محوریت استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و هرمزگان تعداد ۲۸ الی ۳۴ دوره خشکسالی به وقوع پیوسته است. در مقابل، کمینه فراوانی وقوع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت ۳ و ۶ ماهه در سواحل شمالی با تعداد ۶ الی ۱۲ دوره و در مقیاس‌های طولانی‌مدت ۱۲ و ۲۴ ماهه در سواحل شمالی و منطقه جنوب غرب کشور با ۲ تا ۶ دوره رخ داده است.

از نظر شدت خشکسالی، در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی‌های رخ داده در استان‌های سیستان بلوچستان، کرمان و هرمزگان در منطقه جنوب شرق و در منتهی‌الیه شرق استان‌های خراسان رضوی و جنوبی در منطقه شرق کشور ثبت شده است. در این نواحی شدت خشکسالی بین ۱/۸- الی ۱/۹۳- است که در گروه خشکسالی‌های شدید قرار می‌گیرند. در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه هسته‌های با خشکسالی شدید نسبت به دو مقیاس قبلی متفاوت می‌شود و تمرکز خشکسالی‌های شدید در منطقه جنوب غرب و استان‌های چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و قسمتی از خوزستان است. قابل‌ذکر است که در این مقیاس‌ها علاوه بر این‌که از نظر مکانی رخداد خشکسالی شدید نسبت به مقیاس قبلی متفاوت شده از نظر مقدار شدت نیز متفاوت است و شدت خشکسالی‌ها در این مقیاس‌ها بیشتر از مقیاس‌های ۳ و ۶ ماهه است. در مطالعات انجام شده توسط رضیئی(۱۳۹۴) بر رخداد خشکسالی های شدید و بسیار شدید نیز در منطقه جنوب شرق ایران تأکید شده است.

نتایج محاسبه و بررسی مشخصه‌های تداوم و بزرگی خشکسالی‌های ایران طی دوره موردبحث نشان داد که برای دو مشخصه، در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه مناطق شمالی کشور با محوریت سواحل شمالی به‌ویژه استان مازندران خشکسالی‌های با تداوم و بزرگی بالاتری نسبت به سایر نواحی کشور تجربه کرده‌اند. به‌طوری‌که در مقیاس ۳ ماهه متوسط تداوم خشکسالی رخ داده ۱۰ الی ۱۲ دوره برای استان مازندران و برای مناطق با حداقل تداوم تعداد ۳ الی ۶ دوره ثبت شده است. همچنین مقدار بزرگی خشکسالی برای استان مازندران حداقل ۱۶- و حداکثر ۱۹- و برای بیشتر قسمت‌های کشور بین حداقل ۵- و حداکثر ۱۰- است. مقادیر مشخصه‌های تداوم و بزرگی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت ۳ و ۶ ماهه هم از نظر مکانی و هم از نظر مقدار متفاوت می‌شود. در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه حداقل مشخصه بزرگی خشکسالی ۱۳- و حداکثر مشخصه بزرگی خشکسالی ۶۸- است. از نظر مکانی در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه هسته اصلی طولانی‌ترین و بزرگ‌ترین خشکسالی‌های کشور در جنوب غرب کشور با گستره قابل‌توجه بر روی استان‌های فارس، بوشهر، جنوب کهگیلویه و بویر احمد و استان خوزستان رخ داده است.

نتیجه‌گیری

نتایج محاسبه خشکسالی بر اساس داده‌های رطوبت خاک و بارش در سطح ایران نشان داد که خشکسالی با شدت و ضعف متفاوت در تمامی نقاط ایران رخ می‌دهد و رخداد آن به یکی از پدیده‌های همیشگی اقلیم ایران به‌ویژه طی دهه‌های اخیر تبدیل شده است. بررسی رخداد خشکسالی‌های ایران در حالت متوسط نشان داد که بر اساس دامنه شاخص MSDI، بیشتر خشکسالی‌های رخ داده در پهنه ایران‌زمین از نوع خشکسالی‌های ضعیف و متوسط هستند. همچنین مشخص شد که از نظر زمانی، با افزایش مقیاس‌های زمانی، مشخصه فراوانی وقوع خشکسالی‌ها کاهش و مشخصه‌های تداوم، بزرگی و شدت افزایش پیدا می‌کند. از نظر مکانی، بیشینه فراوانی وقوع خشکسالی‌ها در جنوب شرق و شرق کشور و کمینه آن در سواحل شمالی به‌ویژه در استان مازندران و در جنوب غرب ایران شامل استان‌های چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه بویر احمد رخ داده است. بیشینه شدت خشکسالی در سطح کشور برای مقیاس ۳ ماهه ۱/۹۳- در جنوب شرق کشور و در مقیاس ۲۴

ماهه ۲/۲- در جنوب غرب کشور است. یکی از نتایج قابل‌توجه در این پژوهش تداوم و بزرگای بالای خشکسالی‌های رخ داده در مناطق شمالی و جنوب غرب کشور است. به‌طوری‌که در مقیاس‌های کوتاه‌مدت ۳ و ۶ ماهه، بزرگ‌ترین خشکسالی‌ها با مقدار ۱۶- تا ۳۱- در شمال کشور و در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماه با مقدار ۳۵- الی ۶۸- در جنوب غرب کشور رخ داده است که این شرایط بیان‌کننده کاهش رطوبت خاک و بارش این مناطق در حالت کلی است.

در مجموع بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش که ترکیبی از خشکسالی هواشناسی و کشاورزی است باید گفت که سطح قابل‌توجهی از ایران‌زمین با کمبود رطوبت خاک برای انواع فعالیت‌های کشاورزی و همچنین رشد و نمو پوشش گیاهی مواجه شده است. ادامه این روند و عدم وجود برنامه‌ریزی مناسب برای کاهش اثرات خشکسالی و در صورت امکان، عدم انجام اقدامات مناسب برای مقابله با آن می‌تواند محیط‌زیست ایران‌زمین را پیش از پیش با مخاطره و تهدید مواجه کند. ازاین‌رو می‌توان گفت که تمامی قسمت‌های ایران نیازمند یک برنامه جامع مقابله با خشکسالی و کاهش اثرات آن می‌باشد.

منابع

ترابی نژاد، نسترن.، ذرین، آذر.، و داداشی رودباری، عباسعلی.(۱۳۹۴). بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI). مجله آب و خاک، (۳)۳۷، ۴۸۶-۴۷۳.
https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81322.1257

دانشوروثوقی، فرناز.، دینپژوه، یعقوب.، و اعلمی، محمدتقی. (۱۳۹۰). تاثیر خشکسالی بر تراز آب زیرزمینی در دو دهه اخیر (مطالعه موردی:دشت اردبیل). نشریه دانش آب و خاک، ۴، ۱۷۹-۱۶۵.https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1195_36.html

رضیئی، طیب. (۱۳۹۴). بررسی ویژگی‌های خشکسالی در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران، مهندسی و مدیریت آبخیز. (۴)۷. ۳۷۸-۳۶۳.
https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.103082

رضیئی، طیب.، دانشکار آراسته، پیمان.، اختری، روح انگیز.، و ثقفیان، بهرام. (۱۳۸۶). بررسی خشکسالی‌های‌هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از نمایه SPI و مدل زنجیره مارکوف. مجله تحقیقات منابع آب ایران، (۱)۳، ۸۶-۷۶.
https://www.iwrr.ir/article_15467.html

قمقامی، مهدی، و بذرافشان، جواد. (۱۳۹۱). پیش‌آگاهی وضعیت خشکسالی هواشناسی در گستره ایران با استفاده از مدل زنجیره مارکف. حفاظت منابع آب و خاک، ۴، ۱۲-۱.https://doi.org/20.1001.1.22517480.1391.1.3.1.7.

قویدل رحیمی، یوسف. (۱۳۸۴). آزمون مدل‌های ارزیابی خشکسالی و ترسالی برای ایستگاه‌های آذربایجان شرقی. مجله منابع طبیعی ایران، (۳)۵۸، ۵۱۷-۵۳۰. https://ijnr.ut.ac.ir/article_25250.html

مساعدی، ابوالفضل.، محمودی مقدم، سمانه.، و کواکبی، غزاله. (۱۳۹۵). تعیین خصوصیات خشکسالی بر اساس شاخص شناسایی خشکسالی(RDI) و بررسی تغییرات آن در مناطق و دوره‌های مختلف زمانی، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۶)۲۳، ۵۲-۲۷.
https://doi.org/10.22069/JWFST.2017.8878.2266

References

Mosaedi, A., Mohammadi Moghaddam, S., & Kavakebi, GH. (2017). Drought characteristics based on Reconnaissance Drought Index and its variations in different time periods and regions of Iran. Journal of Water and Soil Conservation, 23(6), 27-52. https://doi.org/10.22069/JWFST.2017.8878.2266 [In Persian]

Aghakouchak, A. (2015). Amultivariate approach for persistence-based drought prediction: Application to the 2010-2-11 East Africa drought. Journal of Hydrology, 526,127-135. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.063

Baren, M.A. (1985). Hydrological aspects of droughts. UNESCO/WMO, London, (19982). https://doi.org/10.1002/wat2.1085

Bhatt, D., Mall, R.K., Prudhvi Raju, K.N., & Suryavanshi, S. (2021). Multivariate drought analysis for the temperature homogeneous regions of India: Lessons from the Gomati River basin. Meteorological Applications, 29/ (2), e2044. https://doi.org/10.1002/met.2044

Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y., Aalami, M.T. (2011). Effect of Drought on Groundwater Level in the Past Two Decades (Case study: Ardebil Plain). Journal of Water and Soil Science, 2(4),165-179. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_1195_36.html [In Persian]

Ghavidel Rahimi, Y. (2005). Study of Drought and Wet Year Assessment Models for Stations in East Azerbaijan Province.Iranian Journal of Natural Resources, 58(3), 517-530.https://ijnr.ut.ac.ir/article_25250.html [In Persian]

Gibbs, W. J., & Maher, J. V. (1967). Rainfall Deciles as Drought Indicators. Bureau of Meteorology Bulletin No. 48, Melbourne: Bureau of Meteorology. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2819353

Golin, S., Mazdiyasni, O., & Aghakouchak, A. (2014). Trends in meteorogical and agricultural drought in Iran. Theor App Climatol. https://doi:10.1007/s00704-014-1139-6

Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: A Parametric Multi-Index Model. Advances in Water Resources, 57, 12-18. https://doi: 10.1016/j.advwatres.2013.03.009

Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2014). A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. Journal of Hydrometeorology, 15, 89-101. https://doi:10.1175/JHM-D-12-0160.1

Kao, S.-C., Govindaraju R.S. (2010). A copula-based joint deficit index for droughts. Journal of Hydrology, 380, 121-134. https://doi:10.1016/j.jhydrol.2009.10.029

Keyantash, J.A., & Dracup, J.A. (2004). An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. Water Resour Res, 40(9), W09304. https://doi.org/10.1029/2003WR002610

Kogan, F.N. (1997). Global Drought Watch from Space. Bulletin of the American Meteorological Society, 78(4), 621-636. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2

Kumar, N., Rajeevan, M., Pai, D.S., Srivastava, A.K., & Preethi. B. (2013). On the observed variability of monsoon droughts over India; Weather and Climate Extremes, 1(1),142–150. https://doi:10.1016/j.wace.2013.07.006

Ma, M., Ren, L., Singh, V.P., Yang, X., Yuan, F., & Jiang, S. (2014). New variants of the palmer drought scheme capable of integrated utility. Journal of Hydrology, 519, 1108-1119. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.041

McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 179-184. https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_of_Drought_Frequency_and_Duration_1993.pdf

Mishra, A.K., Singh, V.P., & Desai, V.R., (2009). Drought characterization: a probabilistic approach. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23, 41-55. https://doi:10.1007/s00477-007-0194-2

Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A Review of Drought Concepts. Journal of Hydrology, 391, 202-216. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Nouri, M., & Homaee, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. Meteorological Applications, 27(2), e1899. https://doi.org/10.1002/met.1899

Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. Research Paper 45, U.S. Dept. of Commerce, Weather Burea, Washington. https://www.droughtmanagement.info/literature/USWB_Meteorological_Drought_1965.pdf

Qomqami, M., & Bazarafshan, J. (2012). Forecasting the meteorological drought situation in the area of Iran using the Markov chain model. Protection of water and soil resources, 1(3), 1-12. https://doi.org/20.1001.1.22517480.1391.1.3.1.7 [In Persian]

Raziei, T. (2015). Investigation of drought characteristics in arid and semi-arid regions of Iran. Watershed Engineering and Management, 7(4), 363-378. https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.103082 [In Persian]

Raziei, T., Daneshkar Arasteh, P., Akhtari, R., & Saghafian, B. (2007). Investigation of Meteorological Droughts in the Sistan and Balouchestan Province, Using the Standardized Precipitation Index and Markov Chain Model. Iran-Water Resources Research, 3(1), 25-35. https://www.iwrr.ir/article_15467.html [In Persian]

Subash. N., Ram Mohan, H.S., & Banukumar, K. (2011). Comparing water-vegetative indices for rice (Oryza sativa L.)–wheat (Triticum aestivum L.) drought assessment. Computers and Electronics in Agriculture, 77(2),175-187. https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.05.001

Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2023). Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). journal of Soil and Water, 37(3),473-486. https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81322.1257 [In Persian]

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the connaissance Drought Index (RDI). Water Resources Management, 21, 821–833. https://doi:10.1007/s11269-006-9105-4

Vicente-Serrano, S.M., Beguería S., & López-Moreno J.I. (2010). A Multi–scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. Journal of Climate, 23(7), 1696– 1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Wang, Y., Yang, J., Chen, Y., Su, Z., Li, B., Guo, H., & De Maeyer, P. (2020). Monitoring and Predicting Drought Based on Multiple Indicators in an Arid Area, China. Remote Sens. 12, 2298. https://doi.org/10.3390/rs12142298

Advanced Technologies in Water Efficiency

Razi University

homepage:https://atwe.razi.ac.ir

Online ISSN:2783-4964

Prediction of fluctuations in the groundwater level of Sonqor Plain using machine learning methods

Abbas Rasool Javad Al-Suraifi[1], Reza Shirinabadi[2]✉, HamidReza Rabiefar[3], Mohsen Najarchi[4]

[1] Ph.D. student of Civil Engineering, Department of Civil Engineering and Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: abbasalsarifi@gmail.com

[2] Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering and Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: re.shirinabadi@gmail.com

[3] Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Research Center for Modeling and Optimization in Science and Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. E-mail: H_rabieifar@azad.ac.ir

[4] Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: mohsennajarchi@yahoo.com

ABSTRACT

The fluctuation of groundwater level is one of the important criteria required for decision-making in many water resources exploitation models. The lack of reliable and complete data is one of the most important challenges in analyzing the decline and predictions of the groundwater level in water management. In recent years, the use of different numerical models has been noticed as a reliable solution. These models are able to estimate based on extensive statistics and information and based on various land maps and measurements such as pumping tests, geophysics, soil and land use maps, topography and slope data, different boundary conditions and using complex equations. The level of groundwater in any region. In the present research, first, by using available statistics and information and maps, the fluctuations of the groundwater level of Sonqor Plain were simulated by the GMS model, and the accuracy of the model was evaluated in two stages of calibration and validation. Then, due to the need for much less data in machine learning methods, GWO-ANN and PSO-ANN hybrid methods and LSTM and SAELM models were used. The results showed that the output of the SAELM model had the best fit with the observational data with a correlation coefficient equal to 0.97, and it also had the best and closest distribution of points around the 45 degree line, and in this sense, it is considered the most accurate model. Therefore, to predict the level of groundwater in the whole plain, instead of using the complex GMS model with a very large volume of data and also a very time-consuming calibration and validation process, SAELM model can be used with confidence. This approach greatly helps the researchers of the groundwater sector to predict the changes of the groundwater level in dry and wet years without using numerical models with a complex and time-consuming structure using artificial intelligence with high accuracy.

Keywords: Groundwater level, GMS, Hybrid models, LSTM, SAELM

Article Type: Research Article
Article history: Received: 16 December 2023 **Revised:** 19 February 2024 **Accepted:** 07 March 2024 **ePublished:** 26 March 2024

1.Introduction

The fluctuation of groundwater level is one of the important criteria required for decision-making in many water resources exploitation models. The lack of reliable and complete data is one of the most important challenges in analyzing the decline and predictions of the groundwater level in water management. In recent years, the use of different numerical models has been noticed as a reliable solution. These models are able to estimate based on extensive statistics and information and based on various land maps and measurements such as pumping tests, geophysics, soil and land use maps, topography and slope data, different boundary conditions and using complex equations. The level of groundwater in any region.

The studied area is Sonqor plain in the west of Iran, located at a distance of 100 km northwest of Kermanshah city (Figure (1)). Sonqor plain is one of the fertile plains in Kermanshah province, whose needs are provided by two systems of surface water and groundwater. Part of the water needed in the plain is provided by Shohada Dam and the rest is provided by 278 deep wells dug in the south and west of the plain.

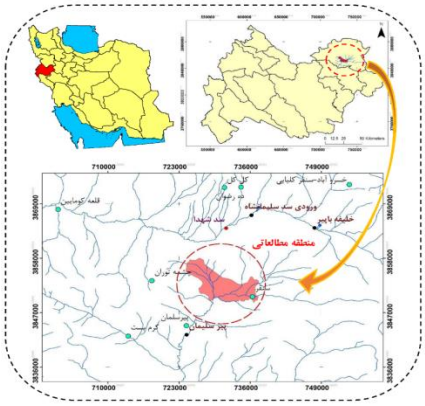


Figure 1. The location of the study area

2. Methodology

In the present research, first, by using available statistics and information and maps, the fluctuations of the groundwater level of Sonqor Plain were simulated by the GMS model, and the accuracy of the model was evaluated in two stages of calibration and validation. Then, due to the need for much less data volume in machine learning methods, GWO-ANN and PSO-ANN hybrid methods and LSTM and SAELM models were used.

Based on the general direction of the groundwater flow in the entire Sonqor plain, the grid direction was considered to be 250x250 meters in the north direction. Therefore, the model network was built with 2596 cells (44 rows and 59 columns) with 250 meters intervals, which included 908 active cells and 1688 inactive cells. In this study, the general head boundary package was used to simulate the entry and exit borders of Sangar plain. In this package, the inlet or outlet flow is affected by the hydraulic gradient at the boundary and the conductance of the boundary cell. Using the prepared geophysical sections and the data log of the wells, a bedrock map of the plain was prepared. Also, the DEM map of the plain was used to determine the upper limits of the layer in the groundwater model. In the GMS model, the WELL package was used to simulate exploitation wells in Sonqor Plain (278 wells) and well cells were identified. The recharge of the plain is one of the important parameters in the groundwater model. Usually, due to the different characteristics of soil, geology, vegetation, rainfall intensity and the slope of the land, the amount of groundwater recharge is different in different places. In the GMS model, the RCH package is used to consider the recharge. The zoning method was used to estimate the hydrodynamic parameters of the aquifer. The zoning of the area for hydraulic guidance and specific yield was done based on the well log, exploratory and piezometric wells, as well as geophysical sections prepared from the area. According to the type of soil and sediments of each zone, the initial values of hydraulic conductivity and specific yield were estimated. Finally, after performing the calibration process, for each zone, the optimized value of hydraulic conductivity and specific drainage was taken into account. In the groundwater simulation section, after the calibration and validation tests of the model in two permanent and non-permanent modes and ensuring its accuracy, the final zoning of the main parameters of the model, i.e. hydraulic conductivity and specific drainage, was prepared so that the model can predict the changes in the groundwater level for 6 years. Simulate consecutively. Because all the required information was available for 6 years (October 2019 to September 2015).

3. Results and discussion

The results of calibration and validation of the GMS model in transient state during the 6-year period from October 2009 to September 2015 showed that the model is able to accurately predict the changes in the groundwater level due to the stresses applied to it. So that the value of RMSE considering all simulation months is around 0.42. The results showed that the output of the SAELM model had the best fit with the observational data with a correlation coefficient equal to 0.97, and it also had the best and closest distribution of points around the 45 degree line, and in this sense, it is considered the most accurate model. Therefore, to predict the level of groundwater in the whole plain, instead of using the complex GMS model with a very large volume of data and also a very time-consumingcalibration and validation process, SAELM model can be used with confidence.

4. Conclusions

This approach greatly helps the researchers of the groundwater sector to predict the changes of the groundwater level in dry and wet years without using numerical models with a complex and time-consuming structure using artificial intelligence with high accuracy.

5. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Al-Suraifi, A.R.J., Shirinabadi, R., Rabiefar, H.R., & Najarchi, M. (2024). Prediction of fluctuations in the groundwater level of Sonqor Plain using machine learning methods, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 99-118. DOI: 10.22126/atwe.2024.10418.1117

Publisher: Razi University
© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سنقر با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین

عباس رسول جواد الصریفی[۱]، رضا شیرین آبادی[۲]✉، حمید رضا ربیعی فر[۳]، محسن نجارچی[۴]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران و مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران، ایران. رایانامه: abbasalsarifi@gmail.com

[۲] نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران و مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران، ایران. رایانامه: re.shirinabadi@gmail.com

[۳] استادیار، گروه مهندسی عمران و مرکز تحقیقات مدل سازی و بهینه سازی در علوم و مهندسی واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، تهران، ایران. رایانامه: H_rabieifar@azad.ac.ir

[۴] دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران. رایانامه: mohsennajarchi@yahoo.com

چکیده

نوسانات تراز آب زیرزمینی از معیارهای مهم موردنیاز برای تصمیم‌گیری در بسیاری از مدل‌های بهره‌برداری از منابع آب است. کمبود داده‌های قابل‌اعتماد و کامل از مهم‌ترین چالش‌ها در واکاوی افت و پیش‌بینی‌های تراز آب زیرزمینی در مدیریت آب است. طی سالیان اخیر استفاده از مدل‌های عددی مختلف توانسته است به‌عنوان یک راهکار قابل‌اطمینان موردتوجه قرار گیرد. این مدل‌ها بر اساس آمار و اطلاعات گسترده و بر اساس نقشه‌ها و اندازه‌گیری‌های متنوع زمینی مانند آزمایش‌های پمپاژ، ژئوفیزیک، نقشه‌های خاک و کاربری اراضی، داده‌های توپوگرافی و شیب، شرایط مرزی مختلف و بهره‌گیری از معادلات پیچیده قادر به تخمین تراز آب زیرزمینی در هر منطقه‌ای هستند. در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از آمار و اطلاعات و نقشه‌های موجود نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سنقر توسط مدل GMS شبیه‌سازی شد و دقت مدل در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به دلیل نیاز به حجم داده بسیار کمتر در روش‌های یادگیری ماشین، روش‌های هیبرید GWO-ANN و PSO-ANN و مدل‌های LSTM و SAELM مورداستفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد خروجی مدل SAELM دارای بهترین برازش با داده‌های مشاهداتی با ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۷ بود، همچنین دارای بهترین و نزدیک‌ترین پراکندگی نقاط در اطراف خط x=y بود و از این نظر دقیق‌ترین مدل در بین مدل‌های مورداستفاده محسوب می‌شود. لذا برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در کل دشت بجای استفاده از مدل پیچیده GMS با حجم داده‌های بسیار زیاد و همچنین فرآیند واسنجی و صحت‌سنجی بسیار وقت‌گیر در آن، می‌توان با اطمینان از مدل SAELM استفاده کرد. این رویکرد کمک زیادی به محققین بخش آب زیرزمینی می‌کند تا بدون استفاده از مدل‌های عددی با ساختار پیچیده و وقت‌گیر با استفاده از هوش مصنوعی با دقت بالا تغییرات تراز آب زیرزمینی را در سال‌های خشک و تر پیش‌بینی نمایند.

واژه‌های کلیدی: تراز آب زیرزمینی، GMS، مدل‌های هیبرید، LSTM، SAELM

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۵ آذر ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۳۰ بهمن ۱۴۰۲ **پذیرش:** ۱۷ اسفند ۱۴۰۲ **چاپ الکترونیکی:** ۰۷ فروردین ۱۴۰۳

استناد: الصریفی، ع. ر. ج.، شیرین‌آبادی، ر.، ربیعی‌فر، ح.ر.، و نجارچی، م. (۱۴۰۳). پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سنقر با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۱۱۸-۹۹. شناسه دیجیتال:10.22126/atwe.2024.10418.1117

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

CC BY NC

مقدمه

افزایش بی‌رویه جمعیت، محدودیت منابع آب‌های سطحی و بهره‌برداری بیش‌ازاندازه از آبخوان‌ها باعث وارد آمدن خسارات جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی ایران در سال‌های گذشته شده است. علاوه برافت شدید سطح آب در آبخوان‌ها، فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری آلاینده‌های مختلفی را به آبخوان‌ها تحمیل می‌کنند که برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، مدیریت بهره‌برداری و حفاظت از آب‌های زیرزمینی باید به‌عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. با گسترش سکونت در مناطقی که آب سطحی وجود ندارد یا مقدار آن کم است، استفاده از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان جایگزینی مطمئن، موردتوجه قرار گرفت. به‌طوری‌که در برخی مناطق آب‌های زیرزمینی به‌عنوان تنها منبع تأمین آب محسوب می‌شوند. لذا برای برنامه‌ریزی بهتر و استفاده بنی از منابع آب زیرزمینی باید راهکارهایی برای پیش‌بینی دقیق نوسانات آب زیرزمینی بخصوص در سالهای خشک و کم آب بکار گرفته شود. به‌منظور ارزیابی اثرات ناشی از توسعه، بر روی منابع آب‌های زیرزمینی چه ازنقطه‌نظر کمی و چه کیفی، شبیه‌سازی ریاضی و کامپیوتری این منابع ابزاری قوی در بهره‌برداری بهینه از این منابع محسوب می‌گردد. در سال‌های اخیر مدل‌های ریاضی و کامپیوتری متعددی به‌منظور شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی منابع آب‌های زیرزمینی و پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی موردتوجه قرارگرفته است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

بررسی روند پیشرفت مدل‌های عددی نشان می‌دهد مجموعه‌ای از عوامل مختلف مانند شرایط مرزی و محیطی، خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی آبخوان، مقاطع رودخانه و سطح خیس شده، پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، نحوه توزیع و برداشت آب در دشت، پارامترهای تغذیه آبخوان، عوامل توپوگرافی و زمین‌شناسی و غیره در شبیه‌سازی تغییرات تراز آب زیرزمینی مؤثر هستند (یوسفاند و شعبانلو[1]، ۲۰۲۰؛ پورسعید و همکاران[2]، ۲۰۲۰، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲.، گورانی و شعبانلو[3]، ۲۰۲۱؛ ترابی و همکاران[4]، ۲۰۲۴.، و عزیزی و همکاران[5]، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴). بسیاری از این مدل‌ها مانند MODFLOW و GMS بر مبنای روش عددی تفاضل محدود توسعه‌یافته‌اند و در تحقیقات مختلف به تعریف و آماده‌سازی اطلاعات و نقشه‌های ورودی زیادی بر اساس یک استاندارد خاص نیاز دارند (محمد و همکاران[6]، ۲۰۲۳.، عزیز پور و همکاران[7]، ۲۰۲۱، ۲۰۲۲.، مزرعه و همکاران[8]، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴.، رجبی و شعبانلو[9]، ۲۰۱۲.، و فلاحی و همکاران[10]، ۲۰۲۳).

در چنین ساختارهایی بررسی پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارش بر کل سیستم و پیش‌بینی تغییرات تراز آب زیرزمینی در سال‌های آتی تحت تأثیر این پارامترها با استفاده از مدل‌سازی ریاضی موضوع را پیچیده‌تر می‌کند و استخراج نتایج معتبر در این زمینه نیاز به زمان و هزینه زیادی دارد (شرستا و همکاران[11]، ۲۰۱۶.، و لمیووکس و همکاران[12]، ۲۰۱۵)

به خاطر ارتباط غیرقابل‌انکار آب‌های سطحی و زیرزمینی، استفاده از مدل‌های تلفیقی و بررسی اثر متقابل برداشت از آب سطحی و زیرزمینی بر تغییرات تراز آبخوان موردتوجه محققان قرار گرفت که نیازمند اضافه کردن اطلاعات و پارامترهای جدید مرتبط با آب سطحی و زیرزمینی است که گاهی این اطلاعات در دسترس نیستند (گراهام و همکاران[13]، ۲۰۱۵.، جورج و همکاران[14]، ۲۰۱۳.، و ژی و همکاران[15]، ۲۰۱۶).

---

[1] Yosefvand & Shabanlou
[2] Poursaeid et al
[3] Goorani & Shabanlou
[4] Torabi et al
[5] Azizi et al
[6] Mohammad et al
[7] Azizpour et al
[8] Mazraeh et al
[9] Rajabi & Shabanlou
[10] Fallahi et al
[11] Shrestha et al
[12] Lemieux et al
[13] Graham et al
[14] Jorge et al
[15] Xie et al

در برخی تحقیقات، برای پیش‌بینی تغییرات تراز آب زیرزمینی در کل دشت، اتصال مدل‌های آب سطحی و زیرزمینی بر اساس شبیه‌سازی ناحیه اشباع و غیراشباع صورت گرفته است. منطقه غیراشباع مرز بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی است. مزیت شبیه‌سازی هم‌زمان منطقه اشباع و غیراشباع خاک در مدل لینک شده آب سطحی و زیرزمینی این است که می‌تواند تبادل بین آب‌های سطحی و زیرزمینی را در فواصل زمانی و مکانی مختلف بر اساس بیلان کامل هیدروکلیماتولوژی در هر منطقه محاسبه نماید اما به دلیل نیاز به طیف وسیعی از داده‌ها و نقشه‌های پیچیده اجرای این روش در بسیاری از آبخوان‌ها امکان‌پذیر نیست (زینعلی و همکاران[1]، ۲۰۲۰الف و ب).

مزیت روش‌های شبیه‌سازی در توانایی آن‌ها برای حل مسائل مربوط به سیستم‌های پیوسته منابع آب سطحی و زیرزمینی است که دارای روابط و معادلات پیچیده هستند. لذا نیاز به یک یا چند ابزار شبیه‌سازی قدرتمند که بتواند سیستم‌های پیچیده را بر اساس واقعیت موجود شرح داده و به کاربر اجازه شرکت در توسعه مدل را به‌منظور افزایش اعتماد در فرآیند مدل‌سازی بدهد، وجود دارد که معمولاً این مدل‌ها گران‌قیمت هستند (هو و هوانگ[2]، ۲۰۱۶.، ایوکوویچ[3]، ۲۰۰۹.، پاهار و دهار[4]، ۲۰۱۴.، و بایسته و آذری[5]، ۲۰۲۱).

از طرفی جزئیات سیستم واقعی و رفتار آن ممکن است بسیار پیچیده‌تر از آن چیزی باشد که در مدل در نظر گرفته‌شده است. اگر سیستم موردمطالعه بیشتر از حد موردنیاز ساده‌سازی گردد ممکن است نتوانیم اطلاعات موردنیاز را از مدل به دست آوریم (بییر[6]، ۲۰۱۰). ازاین‌رو جایگزینی روش‌های ساده و قابل‌اعتمادی که نیاز به حجم اطلاعات کمی داشته و درعین‌حال با صرف وقت و هزینه بسیار کم نتایج دقیقی را در مقایسه با روش‌های عددی و مدل‌های ریاضی داشته باشند بسیار پراهمیت است. در اکثر این روش‌ها پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بدون استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی معمولاً به‌صورت یک سری میانگین بوده و نقشه توزیعی برای دشت ارائه نمی‌دهد اما در زمان کمتر و با دقت بالا قادر به‌پیش بینی نوسانات آب زیرزمینی و حجم ذخیره آب زیرزمینی هستند (سلطانی و آذری[7]، ۲۰۲۲.، گوزمان و همکاران[8]، ۲۰۱۹.، و ندیری و همکاران[9]، ۲۰۱۹).

در سال‌های اخیر در کنار روش‌های استوکاستیک (ابتهاج و همکاران[10]، ۲۰۲۰.، زین الدین و همکاران[11]، ۲۰۲۰.، و آذری و همکاران[12]، ۲۰۲۱) به‌صورت گسترده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مانندGMDH ، ELM، ORELMو روش‌های هیبرید برای پیش‌بینی پارامترهای هیدروکلیماتولوژی مانند دما، بارندگی، جریان رودخانه‌ها و تغییرات تراز آب مخازن سطحی و آب زیرزمینی استفاده‌شده است (اسماعیلی و همکاران[13]، ۲۰۲۱.، سلطانی و همکاران، ۲۰۲۱.، زین الدین و همکاران، ۲۰۱۸.، ابتهاج و همکاران، ۲۰۱۶.، گرامی مقدم و همکاران[14]، ۲۰۱۹.، غریب و همکاران[15]، ۲۰۲۰.، شعبانلو[16]، ۲۰۱۸.، عظیمی و همکاران[17]، ۲۰۱۶.، علیزاده و همکاران[18]، ۲۰۲۱.، و زارعی و همکاران[19]، ۲۰۲۰). روش‌های یادگیری ماشین به دلیل سرعت عمل بالا و نیاز به حجم داده‌های کم برای پیش‌بینی پارامترهای هیدروکلیماتولوژی، دبی رودخانه‌ها و نوسانات تراز آب زیرزمینی توسط محققین زیادی توصیه‌شده‌اند (نورمحمدی ده بالایی و همکاران، ۲۰۲۳.، پاول و همکاران[20]، ۲۰۲۳، مرادی و همکاران، ۲۰۲۳.، سامانی و همکاران، ۲۰۲۲.، بلالی و همکاران[21]، ۲۰۲۲.، و پناهی و همکاران[22]، ۲۰۲۲).

---

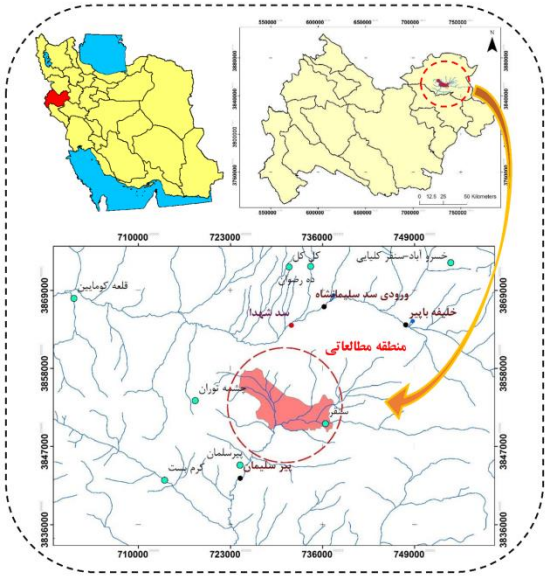
[1] Zeinali et al
[2] Hu & Huang
[3] Ivkovic
[4] Pahar & Dhar
[5] Bayesteh & Azari
[6] Bear
[7] Soltani & Azari
[8] Guzman et al
[9] Nadiri et al
[10] Ebtehajet et al
[11] Zeynoddin et al
[12] Azari et al
[13] Esmaeili et al
[14] Gerami Moghadam et al
[15] Gharib et al
[16] Shabanlou et al
[17] Azimi et al
[18] Alizadeh et al
[19] Zarei
[20] Paul et al
[21] Bilali et al
[22] Panahi et al

بررسی تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد اکثریت مدل‌های ریاضی بکار گرفته‌شده در هر آبخوان نیازمند تعریف شرایط مرزی جدید و اطلاعات و نقشه‌های مربوط به آن منطقه است و عملاً کاربردی نمودن مدل مستلزم انطباق آن با شرایط خاص منطقه موردمطالعه است. به دلیل حجم زیاد آمار و اطلاعات موردنیاز و همچنین لزوم انجام فرآیند واسنجی و صحت سنجی در این مدل‌ها که فرآیندی بسیار وقت‌گیر و پیچیده است، استفاده از یک روش جایگزین که در مقایسه با مدل‌های ریاضی بتواند با همان دقت و در زمان کمتر و با استفاده از داده‌ها و اطلاعات ناچیز نوسانات تراز آب زیرزمینی را پیش‌بینی نماید بسیار حائز اهمیت است. از طرفی در بسیاری از دشت‌ها اطلاعات کافی برای تحلیل هیدرولیکی و شبیه‌سازی سیستمی منابع آب زیرزمینی برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی وجود ندارد یا از دقت کافی برخوردار نیست. هدف از این تحقیق استفاده از ابزار هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری جایگزین و مقایسه آن با نتایج مدل عددی برای پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی است. در این راستا از روش‌های هیبرید GWO-ANN و PSO-ANN و مدل‌های LSTM و SAELM استفاده شد و نتایج آن با مدل عددی GMS مورد مقایسه قرار گرفت.

روش پژوهش

منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه دشت سنقر در غرب ایران واقع در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان کرمانشاه است که در شکل (۱) نشان داده‌شده است. دشت سنقر یکی از دشت‌های حاصلخیز در محدوده استان کرمانشاه بوده که نیاز آن توسط دو سیستم آب‌های سطحی و آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. بخشی از آب موردنیاز دشت توسط سد شهدا تأمین می‌گردد و بقیه آن توسط ۲۷۸ چاه عمیق جنوب و غرب دشت حفرشده‌اند تأمین می‌گردد. یکی از مشکلاتی که همواره قابل‌طرح بوده است بررسی نقش چاه‌های بهره‌برداری در تخلیه و کاهش آبدهی رودخانه‌ها بخصوص در نواحی جنوبی دشت است. در صورت ایجاد گرادیان هیدرولیکی بالا بین سطح آب رودخانه و تراز سطح آب زیرزمینی در اثر کاهش تراز در ناحیه جنوبی و غربی آبخوان، دبی نشت رودخانه به آبخوان افزایش پیدا می‌کند. از طرفی تأمین بخشی از نیازهای منطقه توسط سد شهدا و نفوذ آب سطحی به آبخوان در مناطق شمالی دشت باعث شده تبادل رودخانه و آبخوان در این منطقه با پیچیدگی‌هایی همراه باشد. لذا ارائه مدلی ساده و با دقت زیاد بر اساس ساختار هوش مصنوعی بدون نیاز به بررسی اندرکنش رودخانه و آبخوان و بدون کمک معادلات پیچیده بجای مدل‌های ریاضی بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق برای اطمینان از توانایی چنین مدل‌هایی عملکرد آن‌ها در مقایسه با مدل‌های ریاضی معتبر مانند GMS مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

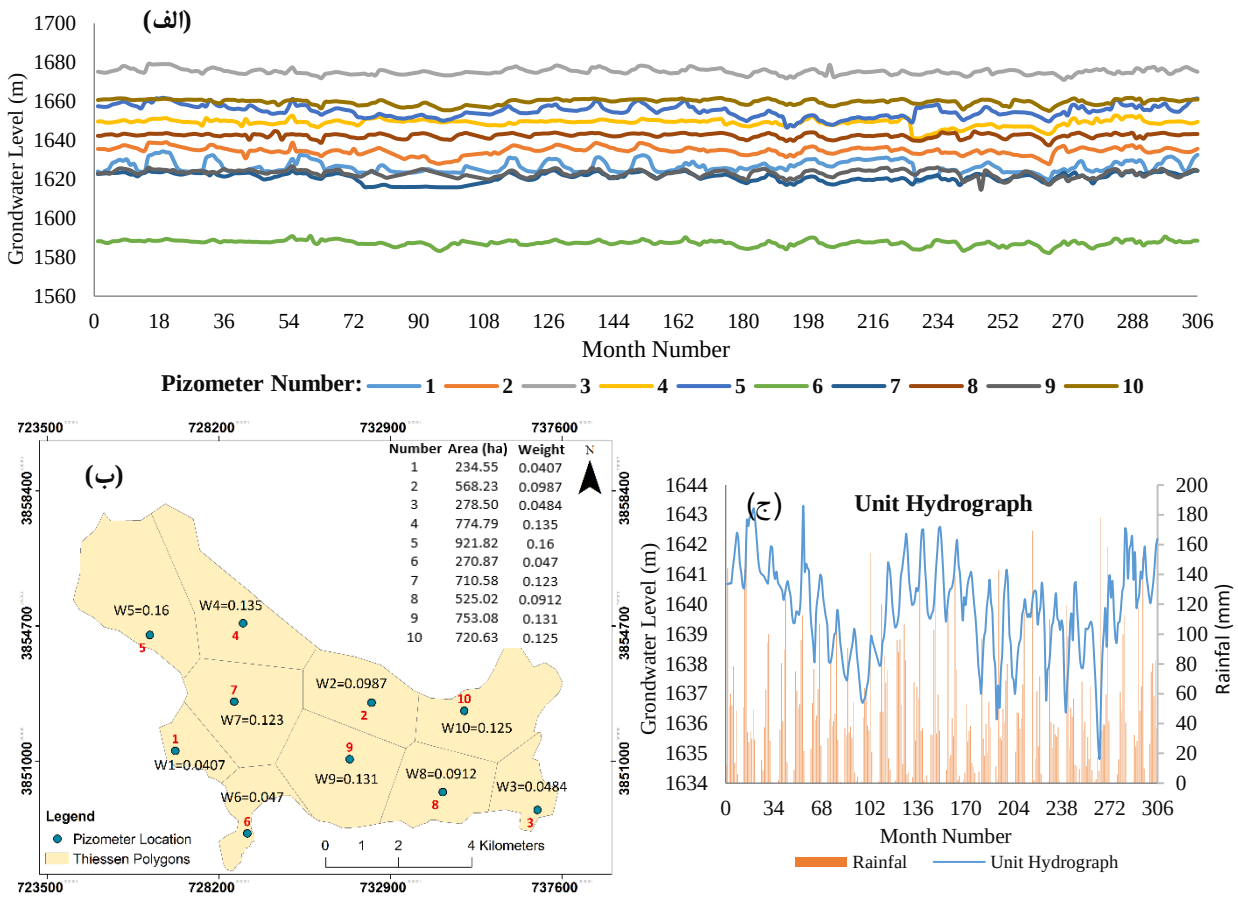
ساخت مدل آب زیرزمینی

بر اساس جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در کل دشت سنقر جهت شبکه‌بندی در راستای شمال شبکه ۲۵۰×۲۵۰ متر در نظر گرفته شد. لذا شبکه‌بندی مدل با تعداد ۲۵۹۶ سلول (۴۴ ردیف و ۵۹ ستون) بافواصل ۲۵۰ متر ساخته شد که شامل ۹۰۸ سلول فعال و ۱۶۸۸ سلول غیرفعال بود. در این مطالعه برای شبیه‌سازی مرزهای ورودی و خروجی دشت سنقر از بسته مرز بار عام استفاده شد. در این بسته دبی جریان ورودی یا خروجی متأثر از گرادیان هیدرولیکی در مرز و کاندکتانس[1] سلول مرزی است. با استفاده از مقاطع ژئوفیزیکی تهیه‌شده و لوگ (Log) اطلاعات چاه‌ها، نقشه سنگ کف دشت تهیه شد. همچنین نقشه DEM دشت برای تعیین حدود بالای لایه در مدل آب زیرزمینی مورداستفاده قرار گرفت. در مدل GMS برای شبیه‌سازی چاه‌های بهره‌برداری در دشت سنقر (۲۷۸ چاه) از بسته WELL استفاده شد و سلول‌های چاه مشخص گردید. تغذیه دشت یکی از پارامترهای مهم در مدل آب زیرزمینی است. معمولاً به دلیل ویژگی¬های مختلف خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، شدت بارندگی و شیب زمین، در نقاط مختلف میزان تغذیه آب های زیرزمینی متفاوت است. در مدل GMS برای در نظر گرفتن تغذیه از بسته RCH استفاده می‌گردد. برای تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان از روش زون‌بندی استفاده گردید. زون بندی منطقه برای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه بر اساس لوگ حفاری چاه‌های مشاهداتی، اکتشافی و پیزومتری و همچنین مقاطع ژئوفیزیکی تهیه‌شده از منطقه انجام گرفت. با توجه به جنس خاک و رسوبات هر زون مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه تخمین زده شد. درنهایت پس از انجام فرآیند واسنجی، برای هر زون مقدار بهینه‌شده هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه لحاظ شد. در بخش شبیه‌سازی آب زیرزمینی، پس از آزمون‌های واسنجی و صحت سنجی مدل در دو حالت ماندگار و غیر ماندگار و اطمینان از دقت آن، پهنه‌بندی نهایی پارامترهای اصلی مدل یعنی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه تهیه شد تا مدل بتواند تغییرات تراز آب زیرزمینی را برای ۶ سال متوالی شبیه‌سازی کند؛ زیرا کلیه اطلاعات موردنیاز برای ۶ سال (مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۵) موجود بود.

مدل‌های هوش مصنوعی

همان‌طور که گفته شد برای صرفه‌جویی در زمان و پرهیز از پردازش حجم اطلاعات زیاد و با توجه به پیچیدگی‌های مدل‌های ریاضی، در این مطالعه علاوه بر مدل عددی GMS از مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز برای پیش‌بینی نوسانات آب زیرزمینی در دشت سنقر استفاده شد. ابتدا برای ترسیم نوسانات تراز آب زیرزمینی در کل دشت از مجموعه داده‌های تراز آب ۱۰ پیزومتر واقع در دشت سنقر برای به دست آوردن هیدرو گراف واحد آب زیرزمینی دشت در یک دوره آماری ۳۰۶ ماهه (مهر ۱۳۷۳ تا اسفند ۱۳۹۹) استفاده شد. نوسانات سطح آب در این پیزومترها، هیدرو گراف واحد آب زیرزمینی[2] و بارندگی در طول دوره مطالعاتی در شکل (۲) نشان داده‌شده است.

[1] conductance
[2] grondwater unit hydrograph



شکل ۲. الف) نوسانات تراز آب زیرزمینی در هر یک از پیزومترهای دشت، ب) پلیگون های تیسن و وزن هر پیزومتر، ج) هیدروگراف واحد در کل دوره مطالعاتی در دشت (mm) و بارندگی (m) آب زیرزمینی

هیدرو گراف واحد آب زیرزمینی پس از ترسیم پلیگون های تیسن در محیط GIS و به دست آوردن وزن هر پیزومتر ترسیم شد. پس از تنظیم اطلاعات موردنیاز، از روش‌های هیبرید GWO-ANN و PSO-ANN و مدل‌های LSTM و SAELM برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در کل دشت استفاده شد. برای این کار، پارامترهای هیدرو گراف واحد آب زیرزمینی (UH) و بارندگی (P) در ماهه‌ای قبل و با تأخیرهای مختلف به‌عنوان ورودی‌های مدل و مقادیر تراز آب زیرزمینی در ماه حاضر به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن ۷۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های train و ۳۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های test بهترین ساختار مدل با تعداد مختلف ورودی با کمترین میزان خطا و بیشترین ضریب همبستگی با داده‌های مشاهداتی به دست آمد. برای انتخاب بهترین مدل از شاخص‌های آماری RMSE، NRMSE، NSE و R استفاده شد که در معادلات (۱) تا (۴) نشان داده‌شده‌اند.

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i^{obs}-X_i^{sim})^2} \quad (۱)$$

$$NRMSE=\frac{RMSE}{(X_{Max}^{obs}-X_{Min}^{obs})} \quad (۲)$$

$$NSE=1-\left[\sum_{i=1}^{n}(X_i^{obs}-X_i^{sim})^2 / \sum_{i=1}^{n}(X_i^{obs}-X_{Mean}^{obs})^2\right] \quad (۳)$$

$$R=\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i^{obs}-X_{Mean}^{obs})(X_i^{sim}-X_{Mean}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i^{obs}-X_{Mean}^{obs})^2\sum_{i=1}^{n}(X_i^{sim}-X_{Mean}^{sim})^2}}\right) \quad (٤)$$

که X_i^{obs} داده‌های مشاهداتی مربوط به هرماه، X_i^{sim} داده‌های شبیه‌سازی‌شده مربوط به هرماه، X_{Mean}^{obs} و X_{Mean}^{sim} به ترتیب میانگین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده و n تعداد کل داده‌هاست.

ماشین آموزش نیرومند[1]

ماشین آموزش نیرومند (ELM) یک شبکه عصبی پیشخور[2] تک لایه بوده و توسط هوانگ و همکاران[3] (۲۰۰۴، ۲۰۰۶) ارائه‌شده است. ELM وزن‌های ورودی را به‌صورت تصادفی وزن‌های خروجی را به‌صورت تحلیلی[4] تعیین می‌کند. ساختار کلی این الگوریتم در شکل (2.a) ارائه‌شده است. تنها تفاوت ELM با شبکه عصبی پیشخور تک لایه[5] (SLFFNN)، عدم استفاده از بایاس[6] برای نرون خروجی است. نرون‌های لایه ورودی با همه نرون‌های لایه مخفی در ارتباط است. تابع فعال‌سازی نرون‌های مخفی می‌تواند به‌صورت تابع پیوسته تکه‌ای[7] باشد درحالی‌که برای نرون لایه خروجی به‌صورت خطی است. مدل ELM از الگوریتم‌های مختلفی جهت محاسبه وزن‌ها و بایاس‌ها استفاده می‌کند که درنتیجه کاهش قابل‌توجه زمان آموزش شبکه را به همراه دارد. توصیف ریاضی شبکه‌عصبی پیشخور تک لایه با تعداد n گره مخفی، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_n(x) = \sum_{i=1}^{n}\beta_i G(a_i,b_i,x) \quad (۵)$$

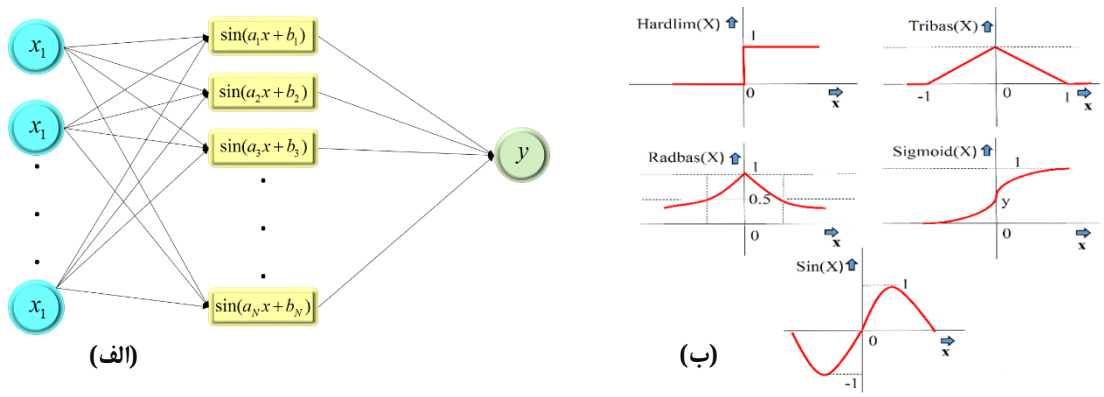
که β_i وزن بین گره مخفی i ام و گره خروجی، a_i ($a_i \in R^n$) و b_i فاکتورهای آموزش گره‌های مخفی و $G(a_i, b_i, x)$ خروجی گره i ام برای ورودی x است. تابع فعال‌سازی g(x) (که دارای انواع مختلفی می‌باشند) برای گره مخفی افزاینده[8] $G(a_i, b_i, x)$ را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$G(a_i,b_i,x) = g(a_i.x+b_i) \quad (۶)$$

از توابع فعال‌سازی به‌منظور محاسبه خروجی پاسخ نرون ها استفاده می‌شود. زمانی که مجموعه‌ای از سیگنال ورودی وزن‌دار اعمال می‌شود، برای به دست آوردن پاسخ از توابع فعال‌سازی استفاده می‌شود (پندی و گووینده[9]، ۲۰۱۶). توابع فعال‌سازی غیرخطی ELM که در این مطالعه موردبررسی قرارگرفته است شامل تابع پله‌ای (hardlim)، سیگموید[10] (sig)، سینوسی (sin)، بایاس مثلثی (tribas) و بایاس شعاعی (radbas) است که به‌صورت شکل (۳) تعریف می‌شوند.

---

[1] Extreme Learning Machine (ELM)
[2] feed-forward
[3] Huang et al
[4] Analytical
[5] single layer feed forward neural network
[6] bias
[7] piecewise continuous function
[8] additive
[9] Pandey & Govind
[10] sigmoid



شکل ۳. الف) ساختار شبکه ELM، ب) توابع فعال‌سازی مختلف در مدل ELM

فعال‌سازی نرون‌های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی در یک شبکه ELM با تعداد"j" نرون در لایه مخفی، "i" نرون ورودی و تعداد "k" نمونه آموزشی، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$H_{jk}=g(\sum (W_{ji}X_{ik})+B_j \quad (۷)$$

که g(.) می‌تواند هر تابع فعال‌سازی غیرخطی پیوسته باشد، W_{ji} وزن نرون ورودی iام و نرون لایه مخفی jام، B_j ، بایاس نرون لایه مخفی jام، X_{ik} ورودی نرون ورودی برای k امین نمونه آموزشی و H_{ik} ماتریس فعال‌سازی j امین نرون لایه مخفی برای k امین نمونه آموزشی است بطوریکه فعال‌سازی همه نرون‌های لایه مخفی برای نمونه‌های مورداستفاده در آموزش توسط این ماتریس ارائه می‌شود. در این ماتریس j ستون و k ردیف است. ماتریس H به‌عنوان ماتریس لایه مخفی خروجی شبکه عصبی بیان می‌شود. وزن‌های بین نرون‌های لایه مخفی و خروجی با استفاده از برازش حداقل مربعات برای مقادیر هدف در حالت آموزش در برابر خروجی‌های نرون-های لایه مخفی برای هر نمونه آموزشی، بکار برده می‌شود که معادل ریاضی آن را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$H\beta=T \quad (۸)$$

$$\beta=\left(\beta_1,\ldots,\beta_j\right)_{j\propto 1} \quad (۹)$$

که β نشان‌دهنده وزن بین نرون لایه خورجی و نرون‌های لایه مخفی است و T بردار نشان‌دهنده مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزش است که به‌صورت معادله (۱۰) بیان می‌شود:

$$T=(T_1,\ldots,T_k)_{k\times 1} \quad (۱۰)$$

نهایتاً وزن‌ها را می‌توان از رابطه (۱۱) محاسبه کرد:

$$\beta=H'T \quad (۱۱)$$

که در آن:

$$H(\tilde{a},\tilde{b},\tilde{x})=\begin{bmatrix} G(a_1,b_1,x_1) & \ldots & G(a_L,b_L,x_L) \\ G(a_1,b_1,x_N) & \ldots & G(a_L,b_L,x_N) \end{bmatrix}_{N\times L} \quad (۱۲)$$

$$\beta=\begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_L^T \end{bmatrix}_{L\times m} \text{ and } T=\begin{bmatrix} T_1^T \\ \vdots \\ T_L^T \end{bmatrix}_{L\times m} \quad (۱۳)$$

که $\tilde{a}=a_1,\ldots,a_L;\tilde{b}=b_1,\ldots,b_L;\tilde{x}=x_1,\ldots x_L$ ، β بردار وزن بین نرون‌های لایه‌های مخفی و لایه پنهان و H' شبه معکوس Moore-Penrose ماتریس H است. T بردار بین وزن‌های نمونه‌های آموزشی است. با توجه به توضیحات ارائه‌شده می‌توان گفت که آموزش ELM شامل دو مرحله است: مرحله اول، اختصاص تصادفی وزن‌ها و بایاس‌ها به نرون‌های لایه پنهان و محاسبه خروجی لایه پنهان ماتریس H و مرحله دوم، محاسبه وزن‌های خروجی با استفاده از شبه معکوس Moore-Penrose ماتریس H و مقادیر هدف برای نمونه‌های آموزشی

مختلف. روند آموزش جهت پیدا کردن ماتریس لایه پنهان (H)، سریع است بطوریکه از سرعت بالاتری نسبت به الگوریتم‌های مبتنی بر تکرار رایج مانند لونبرگ–مارکوآردت[1] که در آن هیچ نوع روالی از بهینه‌سازی غیرخطی را در برنمی‌گیرد، برخوردار است؛ بنابراین زمان آموزش شبکه به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد (هوآنگ، ۲۰۰۶).

استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی به‌صورت خود تطبیقی توانایی غلبه بر محدودیت‌های موجود مانند پارامترهای کنترل در الگوریتم، انتخاب استراتژی بردار trial را داراست. ازاین‌رو، الگوریتم ماشین آموزش نیرومند خود تطبیقی[2] (SAELM) جهت بهینه‌سازی وزن‌های ورودی شبکه و بایاس‌های نود مخفی، توسط وانگ و همکاران[3] (۲۰۱۶) ارائه‌شده است. با داشتن مجموعه داده‌های آموزشی، تعداد L نود مخفی و تابع فعال‌سازی g(x)، می‌توان الگوریتم SAELM را فرمول نویسی کرد. بدین منظور، ابتدا جمعیت اولیه با استفاده از بردارهای جمعیت (NP) که نودهای مخفی را در برمی‌گیرند، تولید می‌شود. سپس با مقایسه مقادیر پیش‌بینی با مقادیر مشاهداتی بهترین وزن‌ها برای انتقال به مرحله بعد انتخاب می‌شوند و بعد از تولید وزن‌های جدید الگوریتم مجدداً اجرا می‌شود. این فرآیند تا رسیدن به بهترین نتایج پیش‌بینی ادامه پیدا می‌کند.

مدل یادگیری عمیق حافظه کوتاه مدت–بلند مدت (LSTM)

مدل‌های یادگیری عمیق زیرمجموعه‌ای از مدل‌های هوش مصنوعی هستند که برای حل مسائل غیرخطی توالی بهبودیافته‌اند. یک مدل یادگیری عمیق معروف، شبکه حافظه کوتاه مدت–بلند مدت[4] (LSTM) است. معماری LSTM برای مدل‌سازی داده‌های دنباله‌ای مانند سری‌های زمانی مناسب است و می‌تواند وابستگی‌های بلندمدت را به‌صورت سری برای پیش‌بینی مراحل آینده بیاموزد. یک بلوک حافظه ساده LSTM در شکل (۳) ارائه‌شده است. مدل LSTM از چندین گیت تشکیل‌شده است که جریان اطلاعات را کنترل کرده و بر نتایج تولیدشده تأثیر می‌گذارد. این گیت‌ها ورودی، فراموشی و خروجی هستند که داده‌های ورودی به بلوک‌های حافظه ct را کنترل می‌کنند که باید فراموش شوند و اجازه ادامه فرآیندهای بعدی رادارند.

LSTM یک نگاشت را از یک دنباله ورودی x به یک دنباله خروجی y با استفاده از معادلات بعدی به‌صورت تکراری از t = 1 تا t = t با مقادیر اولیه C0 = 0 و h0 = 0 انجام می‌دهد (لانگریج و همکاران[5]، ۲۰۲۰):

$$f_t=\sigma\left(W_f A_{L,t}+U_f h_{t-1}+b_f\right) \quad (۱۴)$$

$$\mathcal{E}_t=\tanh\left(W_{\mathcal{E}_f} A_{L,t}+U_{\mathcal{E}_f} h_{t-1}+b_{\mathcal{E}_f}\right) \quad (۱۵)$$

$A_{L,t}$ ورودی بردار در زمان t و h_{t-1} حالت سلول پنهان در زمان t-1 است. U، W به ترتیب ماتریس‌های وزن برای اتصالات ورودی به پنهان و پنهان به پنهان هستند.

f_t یک بردار نتیجه با مقادیر در محدوده (۰، ۱) است، σ(·) تابع سیگموئید لجستیک را نشان می‌دهد و W_f ، U_f و b_f مجموعه پارامترهای قابل یادگیری را برای دریچه فراموشی تعریف می‌کنند. $C_t^{\%}$ یک بردار به‌روزرسانی با بازه (۱، ۱−) برای حالت سلول است که در زمان t محاسبه‌شده است. (*) tanh تانژانت هذلولی است و $W_{C\%t}$، $U_{C\%t}$ و $b_{C\%t}$ مجموعه‌های پارامترهای قابل یادگیری دیگر هستند.

$$i_t=\sigma(W_i x_t+U_i h_t+b_i) \quad (۱۶)$$

it دریچه فراموشی با برد (۰،۱) است. Wi، Ui و bi مجموعه‌ای از پارامترهای قابل یادگیری هستند که برای دریچه ورودی تعریف‌شده‌اند. نتایج معادلات ۱۴ تا ۱۶ باعث به‌روزرسانی وضعیت سلولمی گردد:

$$c_t=f_t O c_{t-1}+t_t O \mathcal{E}_t \quad (۱۷)$$

O به معنای ضرب متناظر عناصر ماتریکس است و دریچه خروجی به‌عنوان آخرین دریچه، وضعیت سلول ct را کنترل می‌کند.

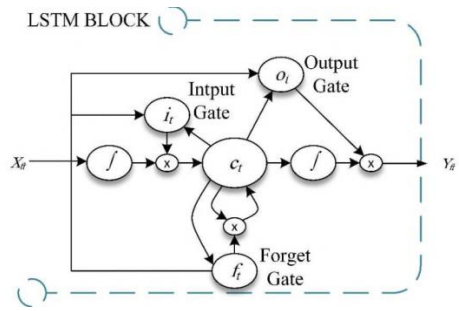
$$o_t=\sigma(W_o x_t+U_o h_{t-1}+b_o) \quad (۱۸)$$

---

[1] Levenberg-Marquardt
[2] Self-adaptive extreme learning machine algorithm
[3] Wang et al
[4] Long-Short-Term Memory
[5] Langridge et al

o_t در محدوده (۰، ۱) است و W_o، U_o و b_o مجموعه‌ای از پارامترهای قابل یادگیری هستند که برای دروازه خروجی تعریف‌شده‌اند. h_t به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h_t=\tanh(c_t)Oo_t \quad (۱۹)$$



شکل ٤. یک بلوک ساده LSTM

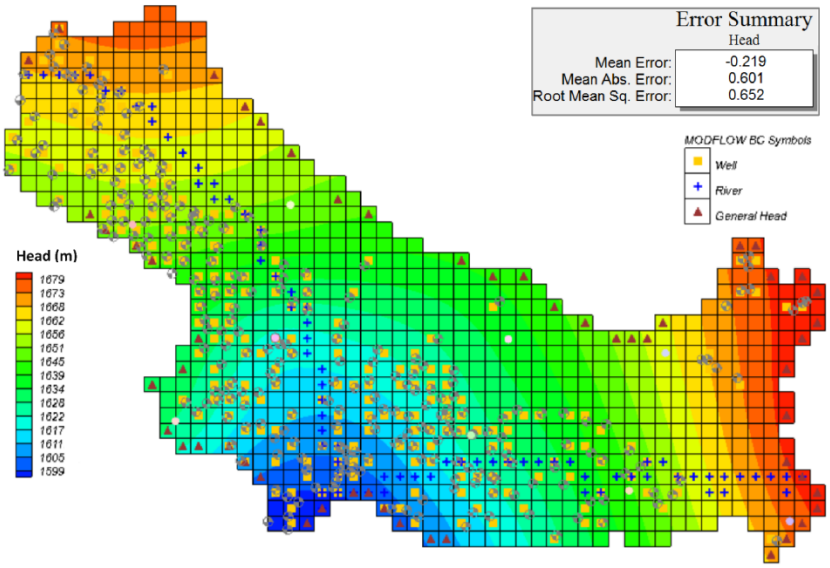
مدل‌های هیبرید PSO-ANN و GWO-ANN

یکی از ساده‌ترین و کارآمدترین روش‌های پیشنهادی برای استفاده در طراحی شبکه‌های عصبی، مدل پرسپترون چندلایه (Multi layer perceptron(MLP)) است که از یک‌لایه ورودی، یک یا چندلایه پنهان و یک‌لایه خروجی تشکیل یافته است. در این ساختار، تمام نرون های یک‌لایه به تمام نرون های لایه بعد متصل هستند. این چیدمان اصطلاحاً یک شبکه با اتصالات کامل را تشکیل می‌دهد. برخلاف شبکه‌های عصبی پرسپترون تک لایه، شبکه‌های چندلایه می‌توانند برای یادگیری مسائل غیرخطی و همچنین مسائلی با تصمیم‌گیری‌های متعدد بکار روند. اگر مجموعه داده دارای m ویژگی باشد بنابراین در شبکه¬های عصبی لایه ورودی نیز دارای m نورون است و ازاین‌رو نیاز به n تا وزن W نیز هست که در ورودی‌ها ضرب شوند. ویژگی‌های مجموعه داده‌ها، متغیرهای مستقلی هستند که بر خروجی یا متغیر وابسته تأثیر می‌گذارند. همچنین با داشتن n نورون درون لایه پنهان، نیاز به n تا مجموعه وزن‌های ($W_1, W_2,...,W_n$) دارید تا بتوان عملیات ضرب وزن‌ها در ورودی‌های X انجام شود. برای پیش‌بینی دقیق خروجی مدل، باید وزن‌های شبکه در تمام لایه‌ها اصلاح‌شده و مقادیر بهینه آن‌ها به دست آید. به‌منظور آموزش شبکه و اصلاح وزن‌ها تا رسیدن به یک خطای معنادار، روش‌های بسیار زیادی وجود دارد. یکی از روش‌های مؤثر در این زمینه ترکیب مدل MLP با الگوریتم بهینه‌سازی در قالب یک مدل هیبرید است. در این تحقیق از دو مدل هیبرید PSO-ANN و GWO-ANN استفاده شد. در ساختار این مدل‌ها، وزن‌های بهینه توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و رقابت استعماری به دست می‌آیند. تابع هدف در این مدل‌ها کمینه‌سازی مقدار RMSE است. تولید و اصلاح وزن‌ها در ساختار مدل تا رسیدن به کمترین خطا ادامه می‌یابد و تعداد تکرار الگوریتم بر این اساس تنظیم می‌شود.

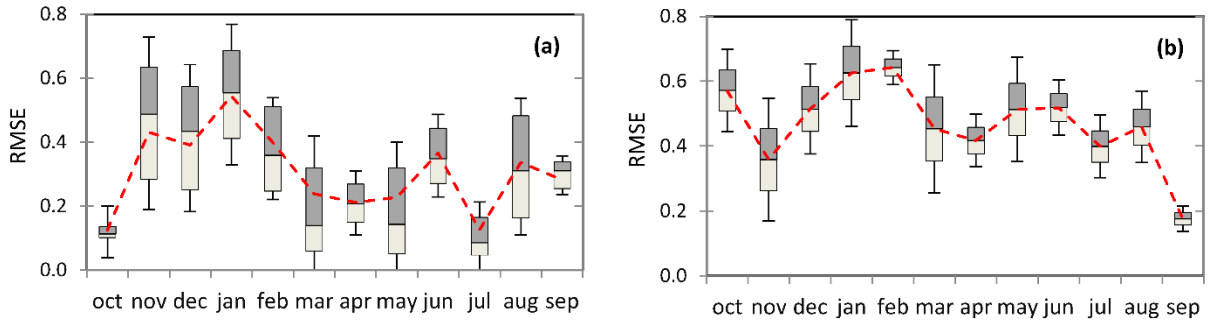
یافته‌ها

نتایج شبیه‌سازی عددی

مدل آب زیرزمینی برای پارامترهای اصلی مدل یعنی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، واسنجی و صحت‌سنجی شد. در این مرحله برای مقایسه آماری مقادیر محاسباتی و مشاهداتی تراز آب زیرزمینی در محل چاهک‌های مشاهده‌ای در دشت سنقر از آماره RMSE استفاده شد. نتایج حاصل از این بررسی در شکل (۵) نشان می‌دهد مقدار این آماره در مدل ماندگار در حدود ۰/۶۵ است. نتایج واسنجی و صحت سنجی مدل آب زیرزمینی در حالت غیر ماندگار در طول دوره ۶ ساله از اکتبر ۲۰۰۹ تا سپتامبر ۲۰۱۵ (شکل (۶))، نشان داد مدل با دقت خوبی قادر به‌پیش بینی تغییرات تراز آب زیرزمینی در اثر تنش‌های واردشده به آن است طوری که مقدار RMSE با در نظر گرفتن تمامی ماه‌های شبیه‌سازی در حدود ۰/۴۲ است.



شکل ۵. اجزای مدل عددی تهیه‌شده و تراز آب زیرزمینی دشت در حالت ماندگار



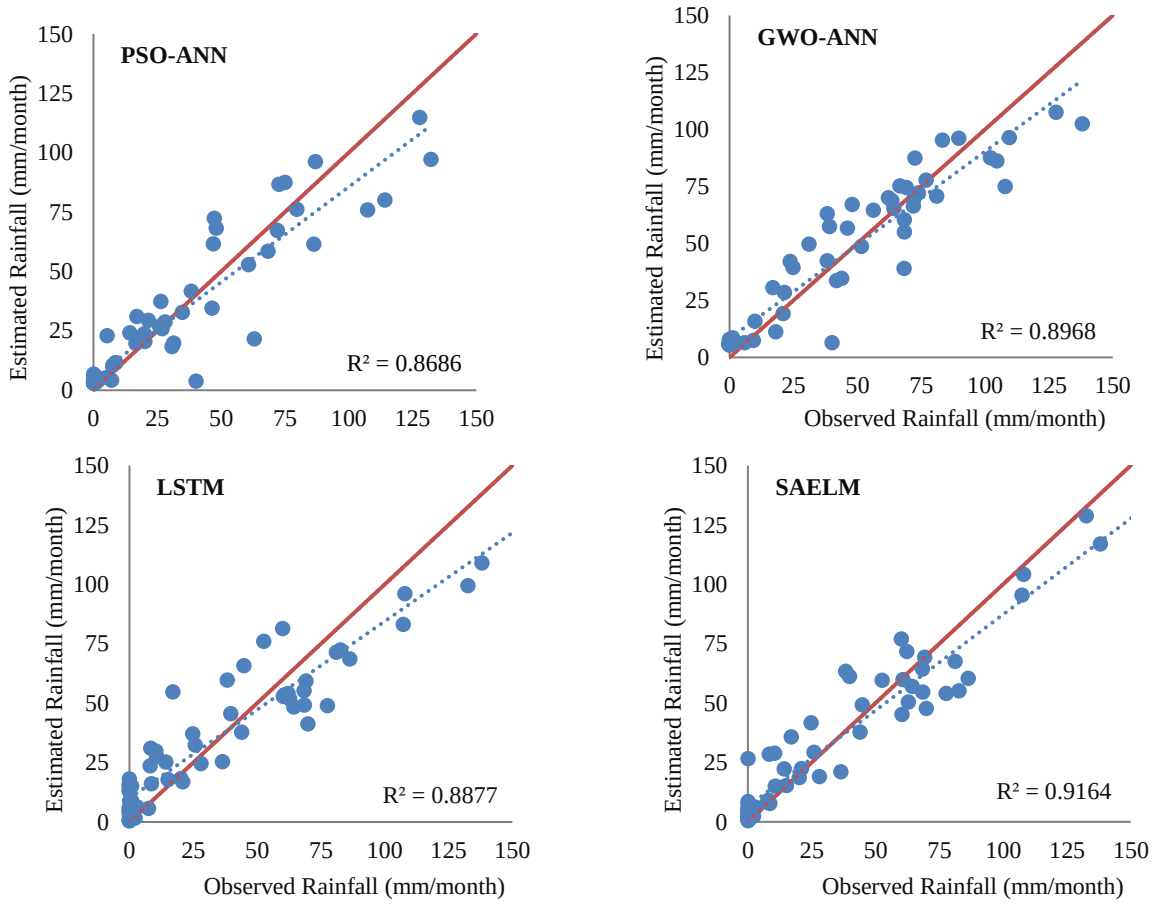
شکل ٦. مقادیر آماره میانگین قدر مطلق خطای تراز آب در مدل مادفلو در حالت غیر ماندگار در طول دوره الف- واسنجی ب- صحت سنجی

شکل (۶) نمودار جعبه‌ای مربوط به مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر خطای شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی را در ماه‌های مختلف در کل منطقه دشت نشان می‌دهد.

پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بر اساس هوش مصنوعی

در این مطالعه از روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سری زمانی تراز آب زیرزمینی در مقایسه با مدل‌های عددی پیچیده با حجم داده‌های انبوه مانند GMS استفاده‌شده است تا بتوان قابلیت جایگزینی این روش‌ها با مدل‌های پیچیده را بررسی کرد. این امر برای جایی که شرایط مطلوب برای به‌کارگیری مدل‌های عددی پیچیده برقرار نیست و یا اینکه اطلاعات کافی در دست نیست بسیار حائز اهمیت است. طوری که بتوان بر اساس تعداد ورودی‌های بسیار اندک، نوسانات تراز آب زیرزمینی را بتوان با دقت زیاد پیش‌بینی نمود. با توجه به اهداف این تحقیق در تمامی روش‌های هوش مصنوعی و مدل‌های هیبرید از داده‌های ماهیانه بارندگی و تراز آب زیرزمینی در ماه‌های قبل (t-1, t-2, t-3, t-6, t-12, t-24) به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل استفاده شد. خروجی مدل نیز داده‌های تراز آب زیرزمینی دشت (هیدرو گراف واحد آب زیرزمینی) در ماه حاضر (t) است که بر اساس داده‌های مشاهداتی در پیزومترها استخراج‌شده است. برای پیش‌بینی نوسانات تراز

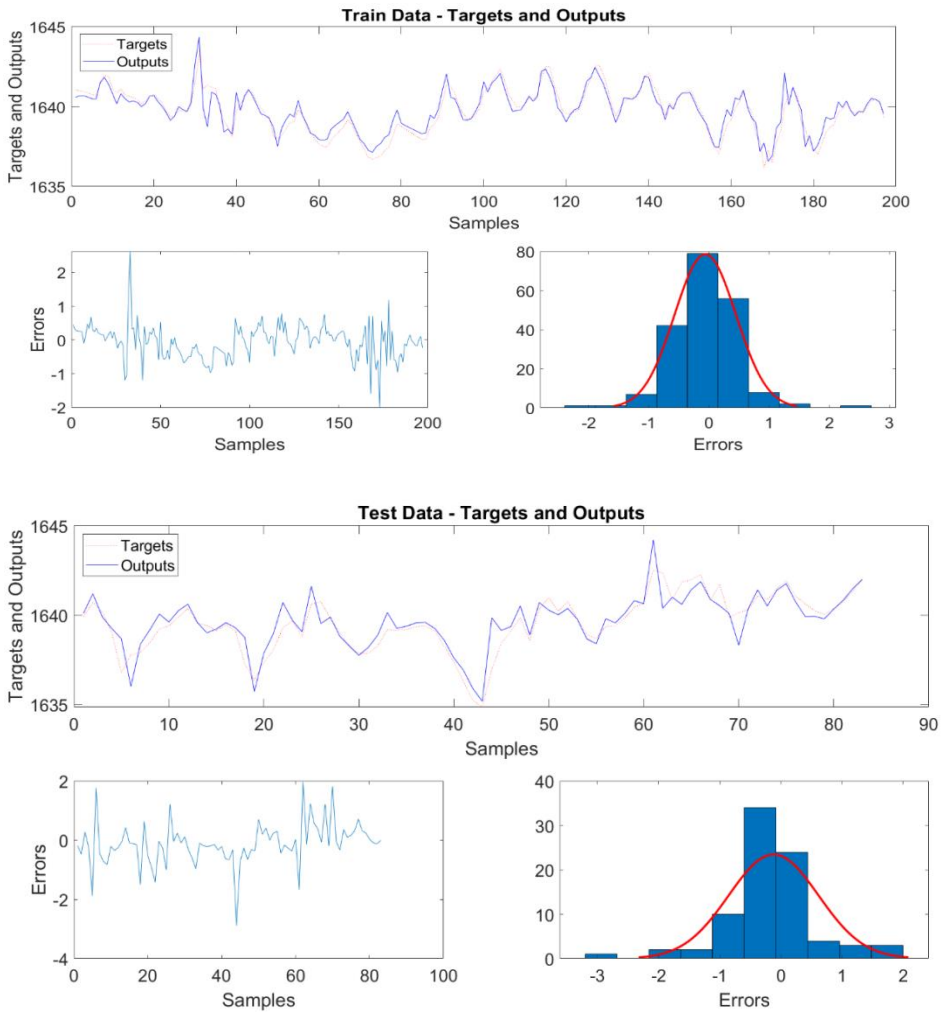
آب زیرزمینی در دشت سنقر، عملکرد این مدل‌ها بر اساس شاخص‌های RMSE، NRMSE، NASH و R مورد ارزیابی قرارگرفت. بهترین نتایج حاصل از اجرای هرکدام از این مدل‌ها در جدول (۱) ارائه‌شده است. بر اساس این جدول مدل SAELM با توجه به‌تمامی شاخص‌ها دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در مراحل آموزش و آزمون است. پس‌ازآن مدل ELM در رده دوم ازنظر دقت پیش‌بینی قرار دارد. شکل (۷) پراکندگی نقاط در اطراف خط Y=X و مقدار مجذور ضریب همبستگی برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی در مرحله تست مدل‌سازی برای هر یک از مدل‌های GWO-AN، PSO-ANN، LSTM و SAELM نشان می‌دهد. پراکنش منظم‌تر و نزدیک‌تر نقاط در اطراف خط Y=X در مدل SAELM نیز حاکی از دقت بیشتر این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها است. بر این اساس سری زمانی مقادیر پیش‌بینی‌شده تراز آب زیرزمینی بر اساس مدل برتر (SAELM) در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در مراحل آموزش و تست در شکل (۸) نشان داده‌شده است.



شکل ۷. نمایش گرافیکی پراکندگی نقاط در اطراف خط Y=X و مقدار مجذور ضریب همبستگی برای انتخاب بهترین مدل هوش مصنوعی در مرحله تست مدل‌سازی

جدول ۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های GWO-AN، PSO-ANN، LSTM و SAELM در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی بر اساس شاخص‌های آماری در مراحل آموزش و تست

Model Type	Input combination		Terain				Test			
	GWL	Rainfal	RMSE	NRMSE	NASH	R	RMSE	NRMSE	NASH	R
PSO-ANN	t-1	t, t-1	0.5459	0.0827	0.882	0.942	0.5608	0.0696	0.865	0.93
GWO-ANN	t-1	t-1	0.585	0.0817	0.866	0.932	0.5954	0.0713	0.845	0.919
LSTM	t-1, t-2	-	0.5372	0.075	0.854	0.924	0.823	0.1073	0.722	0.858
SAELM	t-1, t-2, t-3	-	0.3731	0.0521	0.93	0.966	0.4189	0.0546	0.928	0.966



شکل ۷. سری زمانی مقادیر پیش‌بینی‌شده تراز آب زیرزمینی بر اساس مدل برتر (SAELM) در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در مراحل آموزش و تست

نتایج حاصل از کاربرد مدل هوش مصنوعی SAELM نشان می‌دهد این روش توانسته است در دوره آماری ۳۰۶ ماهه با کمترین میزان خطا در مراحل train و test تراز آب زیرزمینی را پیش‌بینی نماید. به‌طوری‌که مقدار RMSE در این روش در دو مرحله train و test به

ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۴۲ بود. مقدار RMSE در مدل عددی GMS با در نظر گرفتن دوره غیر ماندگار ۶ ساله در حدود ۰/۴۲ بود که این مقدار نشان می‌دهد مدل SAELM بدون نیاز به اطلاعات و داده‌های فراوان و بدون بهره‌گیری از فرآیند پیچیده مدل‌سازی بر اساس معادلات حاکم و با صرف زمان بسیار کمتر نوسانات تراز آب زیرزمینی را به‌درستی و با دقت زیاد پیش‌بینی نماید. لازم به ذکر است طول دوره شبیه‌سازی در مدل GMS به دلیل نیاز به حجم وسیعی از اطلاعات و نقشه‌های مرتبط و عدم وجود اطلاعات کافی حدود ۷۲ ماه بود؛ اما در مدل‌های هوش مصنوعی به دلیل اینکه تنها از اطلاعات بارش و تراز آب زیرزمینی ثبت‌شده پیزومترها استفاده می‌کنند بر اساس موجود بودن داده‌ها طول دوره پیش‌بینی ۳۰۶ ماه در نظر گرفته شد.

بحث

امکان پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی برای یک دوره بلندمدت بر اساس حجم اطلاعات بسیار کم نسبت به مدل‌های عددی و تنها با استفاده از داده‌های پیزومتری و اطلاعات بارندگی یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق است. در این حالت بدون نیاز به پارامترهای هواشناسی، خاک، زمین‌شناسی، اطلاعات لایه‌بندی و ژئوفیزیک، جایگاه (Log) چاه‌های بهره‌برداری، اطلاعات برداشت آب از چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها، داده‌های اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی و بدون نیاز به نقشه‌ها و نرم‌افزارهای پیچیده و بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های ریاضی، تراز آب زیرزمینی بر اساس روش‌های هوش مصنوعی پیش‌بینی می‌گردد. این امر کمک بزرگی به متخصصین بخش منابع آب در حوضه‌های فاقد آمار یا آبخوان‌هایی که فاقد اطلاعات پایه‌ای و نقشه‌های دقیق بوده و یا دشت‌هایی که با نقص آمار مواجه هستند می‌کند؛ زیرا با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی با صرف زمان و هزینه بسیار کم اطلاعات مدیریتی بسیار ارزشمندی در خصوص پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی در سال‌های خشک و تر به دست می‌آید. ارزیابی عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی (GWO-AN، PSO-ANN، LSTM و SAELM) در دشت سنقر نشان داد این مدل‌ها دقت بسیار خوبی در پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی در مقایسه با مدل عددی GMS دارند. طوری که از بین این مدل‌ها، مدل SAELM با مقدار RMSE در حدود ۰/۳۷ و ۰/۴۲ در دو مرحله train و test دارای بیشترین دقت بود. در تمامی روش‌های مورداستفاده تعداد تکرار برای رسیدن به بهترین جواب ۱۰۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، از بین همه روش‌ها، مدل SAELM به دلیل ساختار پیشرفته‌تر شبکه در مدت‌زمان کمتری به جواب رسید. با توجه به اهمیت آگاهی از تغییرات تراز آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای بیلان منابع آب می‌توان مدل‌های هوش مصنوعی مورداستفاده در این تحقیق را بخصوص برای مناطق فاقد آمار پایه و یا در شرایطی که امکان استفاده از مدل‌های ریاضی وجود ندارد توصیه نمود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان مدل‌های توسعه داده‌شده در این تحقیق را برای سایر مناطق مطالعاتی با رویکرد بهره‌برداری تلفیقی از رودخانه و آبخوان مانند دشت سنقر نیز پیشنهاد داد. در این صورت بدون نیاز به روابط و معادلات پیچیده برای بررسی اثر برهمکنش آب سطحی و زیرزمینی و تنها بر اساس اطلاعات پیزومتری و داده‌های بارندگی می‌توان تراز آب زیرزمینی را در دشت موردمطالعه در دوره‌های خشک و تر با دقت زیاد پیش‌بینی نمود.

References

Alizadeh, A., Rajabi, A., Shabanlou, S. Yaghoubi, B., & Yosefvand, F. (2021). Modeling long-term rainfall-runoff time series through wavelet-weighted regularization extreme learning machine. Earth Sci Inform, 14, 1047–1063. https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-021-00603-8

Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. Earth Science Informatic. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1

Azari, A., Zeynoddin, M., Ebtehaj, I., Sattar, A. M. A., Gharabaghi, B., & Bonakdari, H. (2021). Integrated preprocessing techniques with linear stochastic approaches in groundwater level forecasting. Acta Geophysica, 69, 1395–1411. https://doi.org/10.1007/s11600-021-00617-2

Azimi, H., Shabanlou, S., Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2016). Discharge Coefficient of Rectangular Side Weirs on Circular Channels. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 17(7-8), 391-399. http://dx.doi.org/10.1515/ijnsns-2016-0033

Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2023). Modelling and prediction of groundwater level using wavelet transform and machine learning methods: A case study for the Sahneh Plain, Iran. Irrigation and Drainage, 72(3), 747–762. Available from: https://doi.org/10.1002/ird.2794

Azizi, E., Yosefvand, F., Yaghoubi, B., Izadbakhsh, M.A., & Shabanlou, S. (2024). Prediction of groundwater level using GMDH artificial neural network based on climate change scenarios. Appl Water Sci 14, 77 (2024). https://doi.org/10.1007/s13201-024-02126-1

Azizpour, A., Izadbakhsh, M.A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Rajabi, A. (2021). Estimation of water level fluctuations in groundwater through a hybrid learning machine. Groundwater for Sustainable Development, 15, 100687. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100687

Azizpour, A., Izadbakhsh, M.A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Rajabi, A. (2022). Simulation of time-series groundwater parameters using a hybrid metaheuristic neuro-fuzzy model. Environment Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17879-4

Bayesteh, M., & Azari, A. (2021). Stochastic Optimization of Reservoir Operation by Applying Hedging Rules. J Water Resour Plann Manage, 147(2), 04020099. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001312

Bear, J. (2010). Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport. Springer Verlag, 23, 834. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-6682-5

Bilali, A. E., Lamane, H., Taleb, A., & Nafii, A. (2022). A framework based on multivariate distribution-based virtual sample generation and DNN for predicting water quality with small data. Journal of Cleaner Production, 368, 133227. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133227

Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Shamshirband, S. (2016). Extreme learning machine assessment for estimating sediment transport in open channels. Eng Comput, 32, 691–704. https://10.1007/s00366-016-0446-1

Ebtehaj, I., Bonakdari, H., Zeynoddin, M., Gharabaghi, B., & Azari, A. (2020). Evaluation of preprocessing techniques for improving the accuracy of stochastic rainfall forecast models. International Journal of Environmental Science and Technology. 17, 505–524. https://doi.org/10.1007/s13762-019-02361-z

Esmaeili, F., Shabanlou, S. & Saadat, M. A. (2021). Wavelet-outlier robust extreme learning machine for rainfall forecasting in Ardabil City, Iran. Earth Sci Inform, https://doi.org/10.1007/s12145-021-00681-8

Fallahi, M.M., Shabanlou, S., & Rajabi, A. (2023). Effects of climate change on groundwater level variations affected by uncertainty (case study: Razan aquifer). Appl Water Sci, 13, 143. https://doi.org/10.1007/s13201-023-01949-8

Gharib, R., Heydari, M., Kardar, S., & Shabanlou, S. (2020). Simulation of discharge coefficient of side weirs placed on convergent canals using modern self-adaptive extreme learning machine. Appl Water Sci, 10, 50. https://doi.org/10.1007/s13201-019-1136-0

Goorani, Z., Shabanlou, S. Multi-objective optimization of quantitative-qualitative operation of water resources systems with approach of supplying environmental demands of Shadegan Wetland. Journal of Environmental Management. 292. 112769. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112769

Graham, P. W., Andersen, M. S., McCabe, M. F., Ajami, H., Baker, A., & Acworth, I. (2015). To what extent do long-duration high-volume dam releases influence river–aquifer interactions? A case study in New South Wales, Australia. Hydrogeology Journal, 23, 319–334. https://10.1007/s10040-014-1212-3

Guzman, S. M., Paz, J. O., Tagert, M. L. M., & Mercer, A. E. (2019). Evaluation of Seasonally Classified Inputs for the Prediction of Daily Groundwater Levels: NARX Networks Vs Support Vector Machines. Environmental Modeling & Assessment, 24(2), 223-234. https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-018-9639-x

Hu, L., Xu, Z., & Huang, W. (2016). Development of a river-groundwater interaction model and its application to a catchment in Northwestern China. Journal of Hydrology, 543, 483–500. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.028

Huang, G. B., & Siew, C. K. (2004). Extreme learning machine: RBF network case, in: Proceedings of the Eighth International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV 2004), Kunming, China. https://doi.org/10.1007/11760191_17

Huang, G. B., Zhu, Q. Y., & Siew, C. K. (2006). Extreme learning machine: theory and applications. Neurocomputing, 70(1-3), 489-501. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2005.12.126

Ivkovic, K. M. (2009). A top–down approach to characterise aquifer–river interaction processes. Journal of Hydrology, 365, 145–155. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.021

Jorge Ramírez-Hernández., OsvelHinojosa-Huerta., MauricioPeregrina-Llanes., Alejandra Calvo-Fonseca and EdgarCarrera-Villa. (2013). Groundwater responses to controlled water releases in the limitrophe region of the Colorado River: Implications for management and restoration. J. of Ecological Engineering, 59. 93–103. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.016

Langridge, M., Gharabaghi, B., McBean, E., Bonakdari, H., & Walton, R. (2020). Understanding the dynamic nature of Time-to-Peak in UK streams. J. Hydrol, 583, 124630. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124630

Lemieux, J., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., & Ouellet, M. (2015). Simulating the impact of climate change onthe groundwater resources of the Magdalen Islands. Journal of Hydrology, 3, 400–423. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.011

Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2023). A Hybrid Machine Learning Model for Modeling Nitrate Concentration in Water Sources. Water, Air, & Soil Pollution, 234(11), 1-22. http://dx.doi.org/10.1007/s11270-023-06745-3

Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm, Groundwater for Sustainable Development, 24, 101062. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062

Moghadam, R.G., Izadbakhsh, M.A., Yosefvand, F., & Shabanlou, S. (2019). Optimization of ANFIS network using firefly algorithm for simulating discharge coefficient of side orifices. Appl Water Sci, 9, 84. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0950-8

Mohammed, K.S., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level fluctuations using artificial intelligence-based models and GMS. Applied Water Science, 13, 54. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01861-7

Moradi, A., Akhtari, A., & Azari, A. (2023). Prediction of groundwater level fluctuation using methods based on machine learning and numerical model. Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 10 (1), 20-28. https://doi.org/10.22126/arww.2023.7707.1246

Nadiri, A. A., Naderi, K., Khatibi, R., & Gharekhani, M. (2019). Modelling groundwater level variations by learning from multiple models using fuzzy logic. Hydrological sciences journal, 64(2), 210-226. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1554940

Nourmohammadi Dehbalaei, F., Azari, A., & Akhtari, A. A. (2023). Development of a linear–nonlinear hybrid special model to predict monthly runof in a catchment area and evaluate its performance with novel machine learning methods. Applied Water Science, 13 (5), 1-23. https://doi.org/10.1007/s13201-023-01917-2

Pahar, G., & Dhar, A. (2014). A Dry Zone-Wet Zone Based Modeling of Surface Water and Groundwater Interaction for Generalized Ground Profile. Journal of Hydrology, 519(27), 2215-2223. http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.088

Panahi, J., Mastouri, R., & Shabanlou, S. (2022) Insights into enhanced machine learning techniques for surface water quantity and quality prediction based on data pre-processing algorithms. Journal of Hydroinformatics, 24 (4), 875–897. https://doi.org/10.2166/hydro.2022.022

Paul, A., Afroosa, M., Baduru, B., & Paul, B. (2023). Showcasing model performance across space and time using single diagrams. Ocean Modelling, 181, 102150. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.102150

Poursaeid, M., Mastouri, R., & Shabanlou, S. (2020). Estimation of total dissolved solids, electrical conductivity, salinity and groundwater levels using novel learning machines. Environ Earth Sci, 79, 453. https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-020-09190-1

Poursaeid, M., Mastouri, R., Shabanlou, S., & Najarchi, M. (2021). Modelling qualitative and quantitative parameters of groundwater using a new wavelet conjunction heuristic method: wavelet extreme learning machine versus wavelet neural networks. Water Environ. J, 35, 67-83. https://doi.org/10.1111/wej.12595

Poursaeid, M., Poursaeid, A.H., & Shabanlou, S. (2022). A Comparative Study of Artificial Intelligence Models and A Statistical Method for Groundwater Level Prediction. Water Resour Manage, 36, 1499–1519. http://dx.doi.org/10.1007/s11269-022-03070-y

Rajabi, A., & Shabanlou, S. (2012). Climate index changes in future by using SDSM in Kermanshah, Iran. Journal of Environmental Research and Development, 7(1), 37-44. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20123377231

Shabanlou, S. (2018). Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on the end of circular channels. Flow Measurement and Instrumentation, 59, 63-71. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.003

Shrestha, S., Bach, T. V., & Pandey, V. P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. Environmental Science and Policy, 61, 1–13. http://10.1016/j.envsci.2016.03.010

Samani, S., Vadiati, M., Delkash, M., & Bonakdari, H. (2022). A hybrid wavelet–machine learning model for qanat water flow prediction. Acta Geophysica, 1-19. http://dx.doi.org/10.1007/s11600-022-00964-8

Soltani, K., Ebtehaj, I., Amiri, A., Azari, A., Gharabaghi, B., & Bonakdari, H. (2021). Mapping the spatial and temporal variability of flood susceptibility using remotely sensed normalized difference vegetation index and the forecasted changes in the future. Science of The Total Environment, 770, 145288. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145288

Soltani., K., & Azari, A. (2022). Forecasting groundwater anomaly in the future using satellite information and machine learning. Journal of Hydrology, 612 (2), 128052. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128052

Torabi, A., Yosefvand, F., Shabanlou, S., Rajabi, A., & Yaghoubi, B. (2024). Optimization of Integrated Operation of Surface and Groundwater Resources using Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO) Algorithm. Water Resour Manage 38, 2079–2099. https://doi.org/10.1007/s11269-024-03744-9

Xie, Y., Cook, P G., Shanafield, M., Simmons, C T., & Zheng, C. (2016). Uncertainty of natural tracer methods for quantifying river–aquifer interaction in a large river. Journal of Hydrology, 535 ,135–147. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.071

Yosefvand, F., & Shabanlou, S. (2020). Forecasting of Groundwater Level Using Ensemble Hybrid Wavelet–Self-adaptive Extreme Learning Machine-Based Models. Nat Resour Res, 29, 3215–3232. http://dx.doi.org/10.1007/s11053-020-09642-2

Wang, G. G, Lu, M., Dong, Y. Q., & Zhao, X. J. (2016). Self-adaptive extreme learning machine. Neural Computing and Applications, 27(2), 291-303. http://dx.doi.org/10.1007/s00521-015-1874-3

Zarei, S., Yosefvand, F., & Shabanlou, S. (2020). Discharge coefficient of side weirs on converging channels using extreme learning machine modeling method. Measurement, 152, 107321. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107321

Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. (2020a). Simulating Unsaturated Zone of Soil for Estimating the Recharge Rate and Flow Exchange Between a River and an Aquifer. Water Resources Management, 34, 425–443. https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-019-02458-7

Zeinali, M., Azari, A., & Heidari, M. (2020b). Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water–Groundwater Model. Journal of Water Resource Planning and Management (ASCE), 146(5), 04020020. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001189

Zeynoddin, M., Bonakdari, H., Ebtehaj, I., Azari, A., & Gharabaghi, B. (2020). A generalized linear stochastic model for lake level prediction. Science of The Total Environment, 723, 138015. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138015

Zhang, K., & Luo, M. (2015). Outlier-robust extreme learning machine for regression problems. Neurocomputing, 151, 1519-1527. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.09.022