

Numerical hydraulic modeling of the flow in the composite structure of the multiple rectangular Lopac Gate with gradual transformation

Behnam Adineh¹, Seyed Mohsen Sajjadi², Javad Ahadiyan³, and Mohammad Karamdokht Behbahani⁴

1. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: mohamadkb050@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.sajjadi@scu.ac.ir
3. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: j.ahadiyan@scu.ac.ir
4. Department of Water structures, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: karamdokhtmohamad@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received 15 July 2025
Received in revised form 11 November 2025
Accepted 27 December 2025
Available online 23 September 2026

Keywords:

Lopac Gate,
gradual transformation,
maximum shear stress,
flow coefficient,
Flow3D.

ABSTRACT

Objective: This comprehensive study systematically evaluates the hydraulic characteristics of multi-rectangular Lopac gates incorporating gradual transformation features, with particular emphasis on their comparative performance against traditional non-transformed gate designs.

Method: Through detailed experimental analysis under controlled flow conditions (20–60 L/s), the hydraulic behavior of multi-rectangular Lopac gates with 5° and 10° transformation angles was investigated at gate openings of 30°, 45°, and 60°. Shear stress distribution, discharge characteristics, flow coefficients, and vortex dynamics were evaluated using detailed flow visualization studies.

Results: For shear stress distribution, the 5° transformed configuration demonstrated substantial reductions of 27%, 13%, and 10% in maximum floor stress at gate openings of 30°, 45°, and 60°, respectively. Conversely, the 10° transformation increased floor stresses by 53%, 21%, and 24% at corresponding openings. The 5° transformation enhanced flow coefficients by 2.4%, 3.0%, and 3.4% for 30°, 45°, and 60° openings, respectively, while the 10° transformation yielded improvements of 8%, 13%, and 10%. Flow visualization showed that transformed gates produce larger, more organized vortices with reduced frequency, whereas conventional designs generate numerous smaller and more chaotic vortices.

Conclusions: The findings show that gradually transformed multi-rectangular Lopac gates improve stress distribution, flow efficiency, and vortex control. The 5° transformation reduces floor stress, while the 10° transformation improves flow coefficients but increases stress. An optimal transformation angle between 5° and 10° may further enhance gate performance.

Cite this article: Adineh, B., Sajjadi, S.M., Ahadiyan, J., & Karamdokht Behbahani, M. (2026). Numerical hydraulic modeling of the flow in the composite structure of the multiple rectangular Lopac Gate with gradual transformation. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 1-25. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12435.1176>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12435.1176>

Publisher: Razi University.

Introduction

Accurate flow measurement in open canals and irrigation networks represents a critical component of sustainable water resources management. As global water scarcity intensifies, optimizing the efficiency of water distribution systems has become increasingly vital. Among various control structures, gates and spillways have received considerable research attention due to their pivotal role in flow regulation. The Lopac Gate, a unique water-sealing structure designed for precise depth control, employs a distinctive dual-rectangular plate configuration mounted to channel walls. This innovative design enables simultaneous upstream water level adjustment and downstream flow regulation across varying discharge rates and gate openings, offering distinct advantages over conventional gate systems in irrigation applications.

Method

Experimental Setup

The experimental investigation was conducted in the state-of-the-art hydraulic laboratory at Shahid Chamran University of Ahvaz's Faculty of Water Sciences. The primary test facility consisted of a 10-meter long rectangular flume with 0.8 m width and height, featuring an aluminum base, transparent glass sidewalls for flow visualization, and a reinforced metal sheet floor to withstand prolonged hydraulic loading.

The study employed a precisely calibrated elliptical Lopac Gate prototype fabricated from 2 mm galvanized steel sheet (40 cm $\times$ 40 cm dimensions), mechanically hinged to the flume wall at 4.1 m downstream from the inlet. Experimental parameters systematically varied included:

Flow rates: 25, 35, and 45 L/s (controlled via calibrated flow meters). Gate openings: 35°, 40°, 45°, 50°, and 52.5° (measured with digital inclinometer). Submergence ratios: 70%, 80%, and 90% of gate height. Figure 1 illustrates the experimental configuration, showing both the flume cross-section and the elliptical Lopac Gate assembly. All tests were conducted under steady-state flow conditions, with measurements recorded after complete flow stabilization to ensure data reliability.

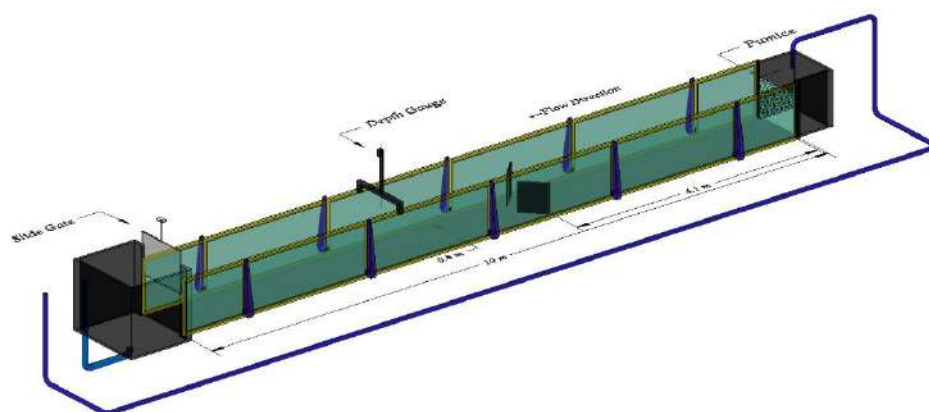


Figure 1. Overview of the laboratory flume

Verification of the physical model

For this purpose, 5 rectangular salon valve models from experiments were simulated at a flow rate of 25 (liters per second), an opening of (30, 35, 40, 45, 50, and 52.5) degrees, and a submergence of 70 percent, and their results were evaluated and compared with the values obtained with the laboratory model. After the studies, it was found that the modeling performed in the Flow3D software

did not differ significantly from the experimental values and had a small error percentage of 1.23 percent. The calibration results between the numerical modeling values and their comparison with the laboratory sample are shown in Figure 2.

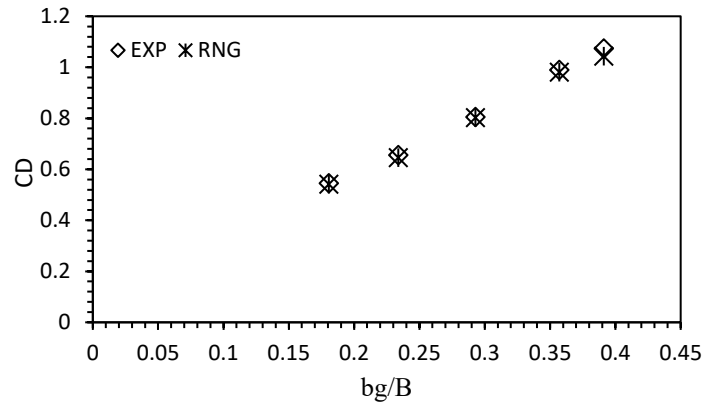


Figure 2. Laboratory model validation results compared to numerical simulation

Meshing and boundary conditions in model simulation

In this study, in order to achieve the best meshing, three mesh groups with numbers (500,000, 1,000,000, and 2,000,000) were selected for the entire mesh block area. For this purpose, in the present study, by simulating a laboratory model of a rectangular Lopac Gate with a flow rate of 25 liters per second, an opening of 52.5 degrees, and a submergence of 70%, and comparing the increase in the agreement of the results with the laboratory data, the optimal meshing was finally selected for the aforementioned model. The absolute error percentage between the laboratory and numerical results was calculated to be 2.048 percent. Finally, the number of mesh cells of 1,000,000 was used for simulation.

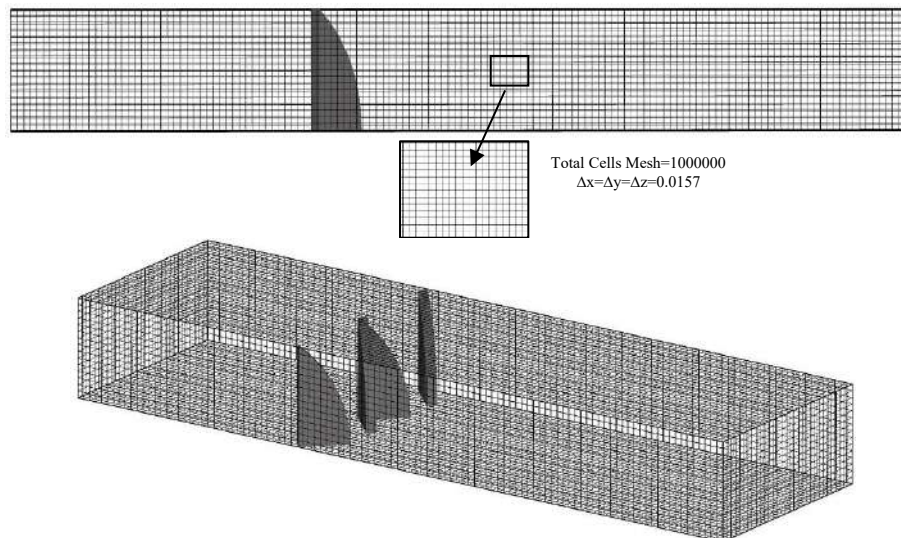


Figure 3. Simulation network meshing

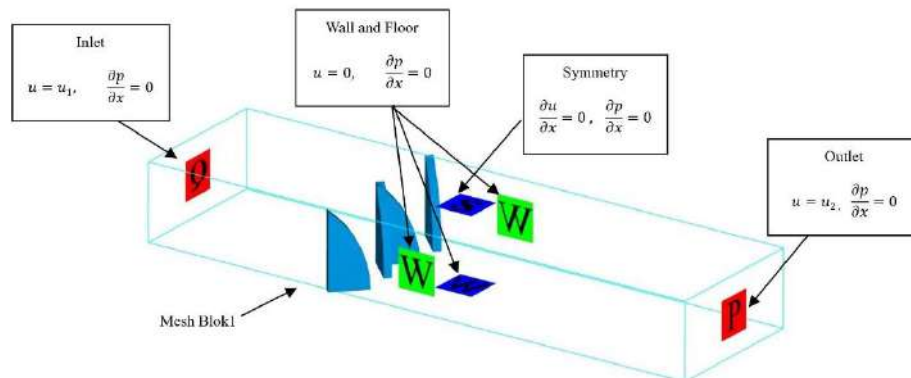


Figure 4. Boundary conditions applied to the computational domain of the multiple elliptical valve under consideration

Results

Investigation of the flow coefficient in multiple Lopac Gates

It is observed that by creating a gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the flow coefficient will increase compared to the Gate condition without gradual transformation. In this way, the flow coefficient value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual transformation at an angle of 5 degrees at flow rates of (20, 40 and 60) liters per second, at openings of 30, 45 and 60 degrees will increase by 2.4%, 3% and 3.4% respectively compared to the multiple rectangular Lopac Gate without gradual transformation. Also, the flow coefficient value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual conversion at an angle of 10 degrees at flow rates of (20, 40, and 60) liters per second, at openings of 30, 45, and 60 degrees will increase by 8%, 13%, and 10%, respectively, compared to multiple rectangular Lopac Gates without gradual conversion.

Shear stress study in multiple Lopac Gates

It is observed that by creating a gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the maximum shear stress will increase compared to the valve condition without gradual transformation. In such a way that the maximum shear stress value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual transformation with an angle of 5 degrees at flow rates of (20, 40 and 60) liters per second, at openings of 30, 45 and 60 degrees will increase by 27%, 13% and 10% respectively compared to the multiple rectangular Lopac Gate without gradual transformation. Also, the maximum shear stress value on multiple rectangular Lopac Gates with gradual transformation at an angle of 10 degrees at flow rates of (20, 40, and 60) liters per second, at openings of 30, 45, and 60 degrees will increase by 51%, 21%, and 24%, respectively, compared to multiple rectangular Lopac Gates without gradual transformation.

Investigation of flow vortices in multiple rectangular Lopac Gates

The results showed that the vortices created by the flow around the Lopac Gate often occur near the gate, which can be observed by observing the decrease in velocity values and color changes in these areas. Finally, According to the shapes related to multiple rectangular Lopac gates with gradual transformation, it was found that the water flow and vortices are

diverted towards the channel walls. However, considering the shapes related to multiple rectangular Lopac gates without gradual transformation at opening angles (45 and 60) degrees, it was found that the flow and vortices created often occur in the center of the channel, which causes erosion and scouring in the center of the channel.

Conclusions

In this study, the effect of gradual transformation on the performance of multiple rectangular Lopac Gates in free flow conditions and its comparison with multiple Lopac Gates without gradual transformation and the investigation of parameters such as discharge coefficient, maximum shear stress on the channel floor and flow lines at different discharges and openings using Flow3D software have been carried out. The aim of this study is to improve and increase the efficiency of multiple rectangular Lopac Gates in comparison with other models of this structure. The results showed that by creating gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the discharge coefficient will increase compared to the Gate condition without gradual transformation. It was also observed that by creating gradual transformation on multiple rectangular Lopac Gates, the maximum shear stress will increase compared to the Gate condition without gradual transformation.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

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

Ethical Considerations

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

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



مدل سازی عددی هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی

بهنام آدینه^۱، سیدمحسن سجادی^{۲*}، جواد احدیان^۳، و محمد کرم دخت بهبانی^۴

۱. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: mohamadkb050@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.sadjadi@scu.ac.ir

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

۴. گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: Karamdokhtmohamad@gmail.com

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: هدف این پژوهش، ارزیابی پارامترهای هیدرولیکی دریاچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارای تبدیل تدریجی و مقایسه عملکرد آن‌ها با دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه فاقد تبدیل تدریجی است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	روش پژوهش: آزمایش‌ها با دبی‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ لیتر بر ثانیه و در بازدهی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه انجام شد. عملکرد دریاچه‌ها با تبدیل تدریجی در زوایای ۵ و ۱۰ درجه و دریاچه فاقد تبدیل تدریجی، از نظر تنش برشی کف، ضریب دبی عبوری و ویژگی‌های گردابه‌های جریان مورد بررسی قرار گرفت.
کلیدواژه‌ها: دریاچه سالونی، تبدیل تدریجی، تنش برشی حداکثر، ضریب دبی، Flow3D	یافته‌ها: در تبدیل ۵ درجه، تنش حداکثر وارد بر کف در بازدهی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه به ترتیب ۲۷، ۱۳ و ۱۰ درصد و در تبدیل ۱۰ درجه به ترتیب ۵۳، ۲۱ و ۲۴ درصد نسبت به دریاچه فاقد تبدیل تدریجی افزایش یافت. ضریب دبی در تبدیل ۵ درجه به ترتیب ۴/۲، ۳ و ۳/۴ درصد و در تبدیل ۱۰ درجه به ترتیب ۸، ۱۳ و ۱۰ درصد افزایش یافت. همچنین، در دریاچه‌های دارای تبدیل تدریجی، گردابه‌های بزرگ‌تر و منظم‌تری مشاهده شد، درحالی‌که در دریاچه فاقد تبدیل، گردابه‌ها کوچک‌تر و تعداد آن‌ها بیشتر بود.
	نتیجه‌گیری: دریاچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارای تبدیل تدریجی، با بهبود عملکرد هیدرولیکی، می‌توانند به‌عنوان ابزاری قابل‌اعتماد برای اندازه‌گیری و کنترل جریان در کانال‌های روباز مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: آدینه، بهنام؛ سجادی، سیدمحسن؛ احدیان، جواد؛ و کرم دخت بهبانی، محمد. (۱۴۰۵). مدل سازی عددی هیدرولیک جریان در سازه ترکیبی دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۳)، ۲۵-۱.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12435.1176>



مقدمه

اندازه‌گیری دبی در کانال‌های باز و شبکه‌های آبیاری یکی از ارکان اساسی مدیریت آب است (اسکوگر بو و همکاران^۱، ۱۹۷۲). دریاچه‌ها، سرریزها و همچنین پارشال فلوم‌ها به طور عمده در اندازه‌گیری جریان عبوری و کنترل سطح آب در کانال‌ها و مجراها مورد استفاده قرار می‌گیرند (العابدی و خاسف^۲، ۲۰۲۴؛ آیزلدین و همکاران^۳، ۲۰۲۳؛ پوری و همکاران^۴، ۲۰۲۳). داشتن روابط و بهره‌برداری ساده از مهم‌ترین دلایل استفاده از دریاچه‌ها و سرریزها، تحت عنوان سازه‌های اندازه‌گیری و کنترل جریان است (چاو^۵، ۱۹۵۹؛ دانشفراز و همکاران^۶، ۲۰۲۲a). یکی از نکات بسیار مهم در دریاچه‌ها برای بهره‌برداری ساده‌تر مسئله نیروی درگ ناشی از وجود و رشد نیزار در پایین‌دست دریاچه‌ها و اعمال نیروی کششی ناشی از آنها است که می‌تواند شرایط هیدرولیکی جریان در پایین‌دست را دچار تغییرات فراوانی نماید (فتیحی مقدم و همکاران، ۲۰۲۴؛ صلاحی و همکاران، ۲۰۲۴؛ سلمان‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴). به جهت افزایش راندمان و بهبود عملکرد سیستم‌های آبرسانی و شبکه‌های توزیع جریان مطالعات گسترده‌ای در زمینه دریاچه‌ها و سرریزها صورت گرفته است (نگم و همکاران^۷، ۲۰۰۲؛ هایاوی و همکاران^۸، ۲۰۰۸؛ کارولو و همکاران^۹، ۲۰۱۳؛ افضلیان و احدیان، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ و سجادی و همکاران، ۲۰۱۷؛ یارمحمدی و احدیان، ۲۰۱۶؛ منصوری و احدیان، ۲۰۱۶؛ احدیان و همکاران، ۲۰۲۴؛ شریفی فرد و همکاران، ۲۰۲۴). دریاچه‌ها در برخی مواقع به عنوان یک‌بند برای تنظیم جریان در مسیر رودخانه‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این حالت نوع بهره‌برداری از آنها و عملیات هماهنگی که بین دریاچه‌های مختلف در سدها اتفاق می‌افتد نیز در کنترل و تنظیم جریان پایین‌دست هم در شرایط نرمال و شرایط سیلابی بسیار حائز اهمیت است (احدیان و همکاران، ۲۰۲۴؛ چناری و همکاران، ۲۰۲۴؛ سجادی و همکاران، ۲۰۲۳؛ نیسی و همکاران، ۲۰۲۴).

دریاچه‌ها انواع مختلفی دارند که یکی از آنها دریاچه‌های سالونی بوده که به عنوان آب‌بند یا سازه کنترل عمق جریان مطرح است (کرم دخت بهبهانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ سجادی و همکاران، ۲۰۲۰). دریاچه‌های سالونی به صورت دو ورق مستطیلی شکل بوده که به دیواره کانال متصل می‌شود، این سازه قابلیت تنظیم سطح آب در بالادست دریاچه و تنظیم توزیع آب عبوری در پایین‌دست دریاچه را در دبی‌ها و بازشدگی‌های مختلف دارا است (آواد و کینزلی^{۱۰}، ۲۰۰۶). از طرفی دریاچه‌های سالونی به دو دسته مستطیلی و بیضوی تقسیم شده‌اند (لانگمن و همکاران^{۱۱}، ۱۹۸۰؛ کاکس و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۴؛ خیبر و همکاران، ۲۰۲۰). در ادامه به مروری بر پژوهش‌های مرتبط با دریاچه سالونی پرداخته می‌شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه پژوهش حاضر به انجام رسیده است که به صورت مختصر در دو طبقه‌بندی مطالعات داخل و خارج از کشور ارائه می‌گردد.

¹ Skogerboe et al

² Alabedi and Khassaf

³ Eizeldin et al

⁴ Puri et al

⁵ Chow

⁶ Daneshfaraz et al

⁷ Negm et al

⁸ Hayawi et al

⁹ Carollo et al

¹⁰ Oad and Kinzli

¹¹ Langeman et al

¹² Cox et al

۱. مطالعات داخل کشور

خیر و همکاران (۱۴۰۴) در تحقیقی سرریزهای جانبی لولایی خاص با وجود آستانه را به صورت آزمایشگاهی مورد تحلیل قرار دادند. آنها گونه‌ای از سرریزهای لبه تیز مایل را معرفی نمودند. در تحقیق آنها یک سرریز لولایی تحت عنوان *PSW-HC* (مدل سرریز جانبی لولایی با کناره ابتدایی باز و انتهای بسته) نسبت به مدل شاهد بهینه‌تر بوده و ضریب دبی و راندمان بیشتری دارد. طاهری طلاوری و همکاران (۱۴۰۳) در یک بررسی عددی، شرایط دریچه‌های سالونی چندگانه را مورد شبیه‌سازی قرار داد. در این پژوهش آنها پارامترهای هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق بررسی شد. یافته‌های این محققین نشان داد ضریب دبی دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط مستغرق در مقایسه با شرایط جریان آزاد، در بازشدگی ۳۰ درجه، به طور متوسط با افزایش درصد استغراق می‌تواند تا حدود ۴۵ درصد، و برای بازشدگی ۴۵ درجه، تا حدود ۵۴ درصد، کاهش یابد.

خیر و همکاران (۱۴۰۳) از یک بخش آستانه با زاویه قائم ثابت و یک بخش لولایی مایل با قابلیت تغییر زاویه این بررسی‌ها را ادامه دادند. این محققین یک رابطه خطی به منظور محاسبه ضریب دبی مدل‌های آزمایشگاهی به دست آوردند. یافته‌های آنها نشان داد که بازشدگی مدل رو به کانال فرعی باعث عملکرد مثبت‌تر در سرریز جانبی لولایی می‌شود.

فتحی و همکاران (۱۴۰۳a,b)، در دو تحقیق جداگانه، در یکی به بررسی پارامترهای هیدرولیکی نظیر ضریب تخلیه، مقدار استهلاک انرژی، شرایط پروفیل جریان و در دیگری به بررسی پارامترهای هیدرودینامیکی نظیر، گردابه‌ها، پروفیل سرعت و تغییرات تنش برشی در محدوده دریچه‌های سالونی چندگانه مستطیلی پرداختند. بررسی بیشینه سرعت در تحقیق آنها نشان داد که این پارامتر با میزان استغراق رابطه عکس دارد؛ به گونه‌ای که با افزایش استغراق، بیشینه سرعت کاهش می‌یابد. همچنین در تحقیق دوم با بررسی کیفی گردابه‌های جریان مشخص نمود که گردابه‌ها در حالت تک دریچه قدرت و کشیدگی بیشتری نسبت به حالت دو دریچه دارند. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد استغراق، کشیدگی و قدرت گردابه‌ها کاهش می‌یابد. از طرفی محدوده توزیع سرعت و تنش برشی با دبی و زاویه بازشدگی رابطه‌ای مستقیم داشته‌اند. همچنین بیشینه نیروی افقی وارده بر دریچه با دبی، زاویه بازشدگی و استغراق رابطه مستقیم دارد و در حالت چندگانه نسبت به حالت تک دریچه ۳۳.۵ درصد کاهش می‌یابد.

کرم دخت بهبهانی و همکاران (۱۴۰۲)، به مدلسازی پارامترهای مؤثر هیدرولیکی نظیر سرعت و استهلاک انرژی در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در حالت مستغرق با میزان استغراق ۷۰ درصد پرداختند. نتایج این محققین نشان داد در حالت مستغرق سرعت بیشینه و استهلاک نسبت به حالت آزاد در تمامی سناریوهای آزمایشی به طور متوسط حدود ۳۲ و ۶۱ درصد کاهش می‌یابد. از طرفی جریان عبوری از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه در حالت آزاد، گردابه‌های با قدرت زیاد و محدوده اثرگذاری وسیع در جریان ایجاد می‌نماید که تا پایین دست دریچه نیز امتداد دارد؛ ولی حالت مستغرق باعث کاهش قدرت گردابه‌ها می‌شود.

کرم دخت بهبهانی و همکاران (۱۴۰۲)، مدلسازی هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه با استفاده از *Flow-3D* را انجام دادند. نتایج نشان داد که در زمان استفاده از دریچه‌های سالونی چندگانه، تنش برشی بیشینه نسبت به حالت تک دریچه در تمامی آزمایش‌ها در بازشدگی‌ها و دبی‌های مختلف به طور میانگین ۳۸ درصد کاهش یافته است. در بررسی کیفی گردابه‌های جریان نیز بررسی‌ها نشان داد، در زمان استفاده از دو دریچه، وسعت گردابه، کشیدگی و قدرت آن نسبت به حالت تک دریچه کاهش یافته و تعداد گردابه‌ها در مقایسه با زمانی که از تک دریچه استفاده می‌شود، افزایش می‌یابد. مبارک و همکاران (۱۴۰۰) دریچه‌های سالونی بیضوی را مورد بررسی و تحلیل آزمایشگاهی قرار دادند و اثر میزان کشیدگی هندسی بیضی در شکل دریچه‌ها را بررسی نمودند. این محققین به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت قطرهای بیضی و یا به عبارتی افزایش کشیدگی بیضوی باعث کاهش تنش برشی اعمال شده از سوی جریان بر کف مجرای دریچه‌ها می‌شود. همچنین یافته‌های آنان نشان داد که گردابه‌های پس از دریچه با افزایش این نسبت کاهش می‌یابد.

شفاعی بجستان و همکاران (۱۳۹۹)، ضریب دبی دریچه‌های سالونی بیضوی مسلح شده با تبدیل تدریجی را به صورت تک دریچه در حالت مستغرق بررسی نمودند. نتایج تحقیق این محققین به صورت آزمایشگاهی نشان داد که حداکثر مقدار افزایش

ضریب دبی تا ۱۰ درصد می تواند به وقوع بپیوندد که این افزایش به دلیل قرارگیری تبدیل تدریجی در بالادست دریاچه سالونی اتفاق می افتد.

خیبر و همکاران (۱۳۹۹)، با کمک معادله انرژی و نتایج آزمایشگاهی، به بررسی خصوصیات جریان عبوری از دریاچه های سالونی بیضوی و مقایسه با دریاچه سالونی مستطیلی به صورت تک دریاچه را در شرایط جریان آزاد پرداختند. آزمایش ها نشان داد که در وضعیت جریان آزاد، ضریب دبی تنها تابعی از نسبت بازشدگی دریاچه است. همچنین مشخص شد در وضعیت یکسان، با کم شدن بازشدگی، ضریب دبی دریاچه سالونی- بیضوی نسبت به دریاچه سالونی مستطیلی افزایش می یابد. در همین راستا مقایسه نتایج تحقیق یاد شده با تحقیقی که به تبدیل ناگهانی مجهز شده است در مطالعه سجادی و همکاران (۱۳۹۹) دیده می شود. یوسفوند و همکاران (۱۳۹۴)، در یک مطالعه آزمایشگاهی-تئوری به بررسی ضریب تخلیه دریاچه های سالونی مستطیلی با حالات مختلف نسبت استغراق پرداختند. این محققین یک رابطه نیمه تجربی با دقت قابل قبولی برای محاسبه ضریب دبی این دریاچه ها بر حسب مقدار بازشدگی و نسبت استغراق ارائه دادند.

۲. مطالعات خارج از کشور

کرم دخت بهبهانی و همکاران (۲۰۲۵) طراحی جدیدی از یک سری دریاچه سالونی ارائه دادند. آنها به صورت عددی به بررسی عملکرد هیدرولیکی ساختار پیشنهادی و مقایسه آنها با دریاچه شاهد تحت شرایط یکسان پرداختند. بر اساس بهینه سازی عددی برای این منظور تعداد مش بهینه در تحقیق آنها ۱,۰۰۰,۰۰۰ در نظر گرفته شد و مدل تلاطمی RNG بهترین عملکرد هیدرودینامیکی را داشت. نتایج این محققین نشان داد که استفاده از چندین دریاچه LOPAC، میانگین حداکثر سرعت در مقایسه با حالت تک دریاچه حدود ۱۸ درصد کاهش می دهد. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج تحقیق آنها ضریب تخلیه دریاچه های چندگانه با حالت مشابه ولی تک دریاچه، تفاوت زیادی نخواهد داشت.

در تحقیقی دیگر پیل بالا و همکاران (۲۰۲۳)، تأثیر نسبت بیضوی بر عملکرد هیدرولیکی دریاچه LOPAC با استفاده از شبیه سازی های CFD بررسی نمودند. بر اساس نتایج این محققین، این دریاچه ها وقتی به دایره ای به کار گرفته شوند، شرایط مناسب تری برای تخلیه جریان را باعث می شوند. ایشان بیان نمودند در برخی مواقع در پیش بینی های مدل، چرخش نامتقارن در پایین دست دریاچه مشاهده می شود. آنان مقادیر استهلاک انرژی، ضریب آبگذری و ضریب اتلاف انرژی را در دبی ها، بازشدگی ها و در نسبت های مختلف مورد بررسی قرار دادند.

تائو و همکاران ^۱ (۲۰۲۲)، ضریب تخلیه در یک دریاچه شعاعی را ارزیابی کردند. مدل های یادگیری ماشینی عملکرد پیش بینی قابل قبولی داشتند و دقت پیش بینی مدل ها در شرایط جریان آزاد بهتر بود. سیهاگ و همکاران ^۲ (۲۰۲۲)، ضرایب تخلیه دریاچه های شعاعی را با استفاده از رویکردهای رگرسیون فرابتنکاری بررسی کردند و نتایج، مفید بودن روش رگرسیون GP را برای پیش بینی ضریب تخلیه نشان داد.

دانشفراز و همکاران ^۳ (۲۰۲۲) به صورت تجربی و عددی به بررسی تأثیر آستانه ها با مشخصات هندسی متفاوت بر ویژگی های هیدرولیکی جریان عبوری از دریاچه های کشویی پرداختند. نتایج شبیه سازی نشان داد که شاخص های آماری مدل آشفتگی RNG در مقایسه با مدل های آشفتگی $k-\epsilon$ و $k-\omega$ و LES دقت بالاتری دارد. همچنین ایشان به این نتیجه رسیدند که ضریب دبی رابطه معکوسی با بازشدگی دریاچه دارد. از طرفی نتایج این محققین نشان داد ضریب تخلیه دریاچه ها با ضخامت آستانه متفاوت، همواره بیشتر از حالت بدون آستانه است.

خیبر و همکاران ^۴ (۲۰۲۱)، به جهت توسعه ی دریاچه های سالونی به صورت تک دریاچه به مطالعه ی تأثیر تنگ شدگی ناگهانی مقطع بر روی عملکرد هیدرولیکی دریاچه های سالونی بیضوی در دبی ها و استغراق های مختلف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب آبگذری با میزان استغراق دریاچه و انقباض کانال رابطه غیر مستقیم داشته و با بازشدگی دریاچه رابطه مستقیم دارد.

¹ Tao et al

² Sihag et al

³ Daneshfaraz et al

⁴ Kheybar et al

پیل بالا و همکاران^۱ (۲۰۲۱) در یک تحلیل آزمایشگاهی، ارتباط بین زاویه بازشدگی و میزان تخلیه تک دریچه سالونی بیضوی در حالت جریان مستغرق را بررسی نمودند. نتایج این محققین نشان داد که حداکثر تا ۲۰ درصد کاهش افت انرژی نسبی و به تبع آن افزایش ضریب تخلیه دریچه ممکن است رخ دهد.

شادهی و بی‌جن‌خان^۲ (۲۰۲۰)، آزمایش‌هایی بر جت‌های موازی خروجی از دریچه‌های تنظیم‌کننده برای شرایط جریان آزاد و مستغرق انجام داده‌اند. این محققین از ضرایب تصحیح مونتوم مرتبط، β_2 ، برای شرایط جریان آزاد استفاده نمودند. نتایج این محققین نشان داد که رابطه نیمه‌تجربی برای دریچه‌های نصب‌شده به‌صورت موازی با بازشدگی‌ها و عرض‌های مختلف دریچه تمایز بین شرایط جریان آزاد و مستغرق را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند.

کاکس و همکاران^۳ (۲۰۱۴) سرریزهای لبه تیز بیضوی نوینی برای تخلیه جریان‌های چگال پیشنهاد دادند. آنها یک مدل فیزیکی با شرایط واقعی را ساختند و داده‌های دبی-اشل سرریز جدید را جمع‌آوری نمودند. این محققین از تقریب انتگرالی سیمسون و دوزنقه‌ای برای توسعه راه‌حل صریح استفاده نمودند. میانگین درصد خطای مطلق تنها ۳/۵۵ برآورد.

نگم و همکاران^۴ (۲۰۰۶) تأثیر هم‌زمان چندین دریچه بر الگوی جریان و سرعت در پایین‌دست دریچه برای حالت جریان مستغرق را بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که الگوی جریان و سرعت در حالات مختلف بازشدگی دریچه‌ها، به نوع آنها (اصلی یا اضطراری)، نسبت استغراق و عدد فرود در ناحیه جمع‌شدگی جریان وابسته است.

سامانه‌های آکوا^۵ (۲۰۰۰) برای ارائه یک راه‌حل کارآمد و به‌صرفه باهدف کنترل جریان در کانال‌های حاوی ابعاد متفاوت دریچه سالونی ارائه داده است. در راه حل آنها روابطی برای تخمین دبی و ضریب آگذری جریان در شرایط آزاد و مستغرق با آستانه درجه استغراق ۰/۳ ارائه شده است.

با بررسی پیشینه پژوهش یافت شد که تاکنون مطالعات مرتبط با دریچه‌های سالونی به طور عمده در حالت تک دریچه انجام شده است که این موضوع حاکی از کمبود مطالعات در زمینه حالت‌های چندگانه و نیاز به مطالعه بیشتر بر این شرایط است. از طرفی تأثیر استفاده از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه به‌جای دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در این دو حالت با یکدیگر مقایسه نشده است؛ بنابراین، در مطالعه حاضر به بررسی عددی دریچه سالونی بیضوی چندگانه و دریچه سالونی مستطیلی چندگانه و مقایسه عملکرد آنها نسبت به هم دیگر با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D پرداخته خواهد شد. نتایج پژوهش حاضر در ۴ بخش، تغییرات حداکثر سرعت، اتلاف انرژی، ضریب دبی و الگوی جریان در شرایط آزاد ارائه خواهد شد. انجام این پژوهش مؤثر در افزایش کارایی و همچنین ارتقا و صرفه‌جویی در هزینه‌های طراحی و ساخت، در شبکه انتقال آب است و منجر به دستیابی به بینش بیشتری نسبت به عملکرد و رفتار هیدرولیکی در زمینه دریچه‌های سالونی می‌گردد. همچنین عملکرد این دو سازه در مقایسه با سایر تحقیقات گذشته ارزیابی و امکان استفاده از آن در شبکه‌های انتقال آب برای کنترل سطح آب بررسی می‌گردد. در نهایت این یافته‌ها اهمیت استفاده از CFD را به‌عنوان ابزاری برای حمایت از تصمیم‌گیری و طراحی سازه‌های هیدرولیکی برجسته می‌کنند.

روش پژوهش

۱. مشاهدات آزمایشگاهی

داده‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق از نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط پیل بالا و همکاران^۶ (۲۰۲۱) اخذ گردید. این آزمایش‌ها در یک کانال (فلوم) مستطیلی به طول ۱۰ متر، عرض ۰/۸ متر و ارتفاع ۰/۸ متر، ساخته شده با پایه آلومینیومی و دیوارهای جانبی شیشه‌ای و کف از جنس ورق فلزی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی آب و محیط زیست

^۱ Pilbala et al

^۲ Shaddehi and Bijankhan

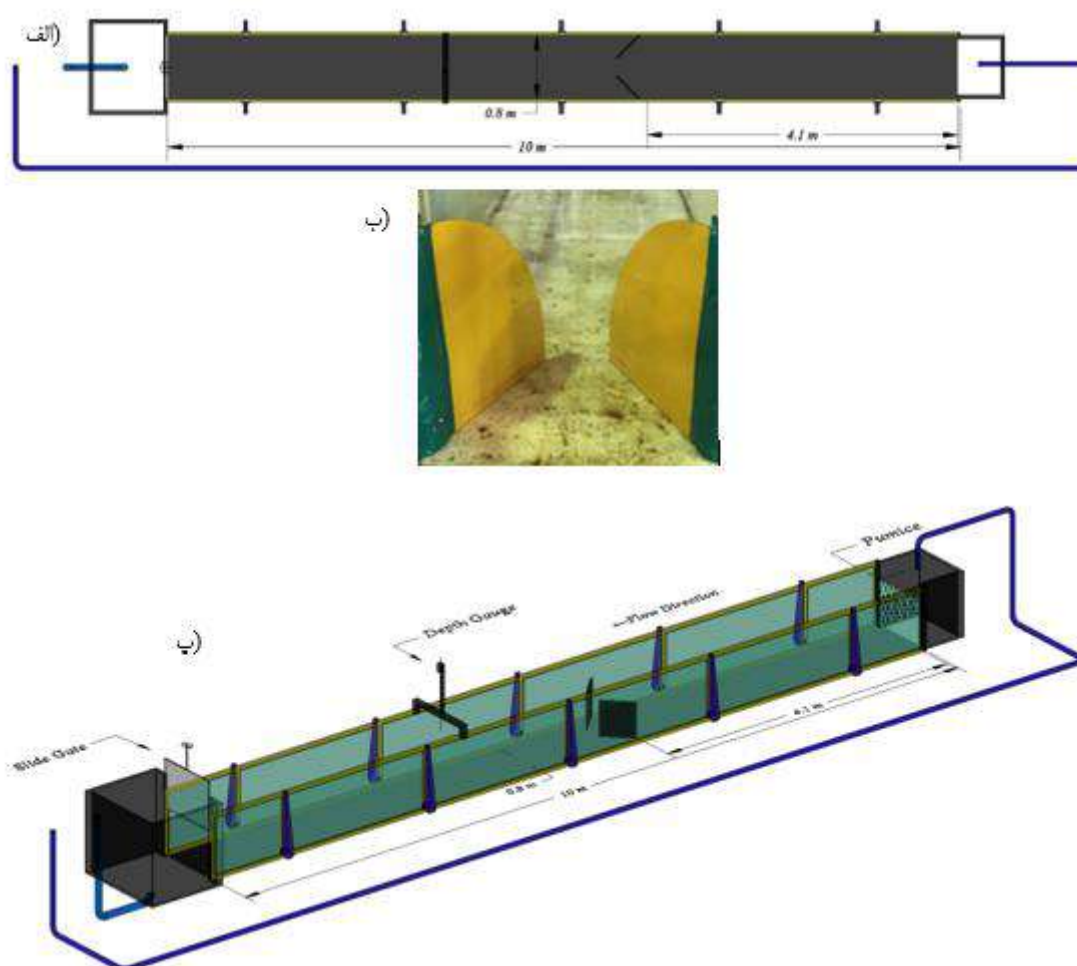
^۳ Cox et al

^۴ Negm et al

^۵ Aqua Systems

^۶ Pilbala et al

دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد (شکل ۱-الف). در فلوم آزمایشگاهی مورد استفاده یک سرریز لبه تیز مستطیلی در بخش انتهایی آن قبل از مخزن جمع کننده وجود داشت که می توان با استفاده از آن دبی ورودی را اندازه گیری نمود. در این پژوهش از دبی های ۲۵، ۳۵ و ۴۵ لیتر بر ثانیه استفاده شده است. یک سبد توری پر شده از پوکه های معدنی با هدف آرام کردن جریان ورودی و از بین بردن امواج در ابتدای کانال قرار داده شده است. همچنین به منظور ایجاد استغراق در پایین دست کانال آزمایشگاهی، از یک دریچه کشویی در انتهای فلوم استفاده شده است. در این پژوهش آزمایشگاهی از میزان استغراق های ۷۰، ۸۰ و ۹۰ درصد استفاده شده است. علاوه بر آن به منظور برداشت عمق جریان از یک عمق سنج دستی استفاده شده است. مشخصات فنی مدل آزمایشگاهی دریچه سالونی بیضوی مورد استفاده شامل ورق گالوانیزه به ضخامت ۲ میلیمتر و به عرض و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر بوده که به دیواره فلوم لولا شده است (شکل ۱-ب). نتایج این آزمایش ها برای واسنجی مدل عددی استفاده می شود. فاصله دریچه ها از ابتدای فلوم ۴/۱ متر است. آزمایش های مورد استفاده به این منظور در این پژوهش با باز شدگی های ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲/۵ درجه نسبت به خط مرکزی است. در شکل (شکل ۱-پ) نمایی جانبی فلوم آزمایشگاهی و دریچه سالونی بیضوی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) مشاهده می گردد. در تحقیق حاضر با مساحت باز شدگی یکسان از چندین دریچه به جای یک دریچه برای تحلیل نتایج به صورت عددی و مدلسازی استفاده شده است و نتایج آزمایشگاهی (استفاده از تک دریچه بر اساس توضیحات یاد شده) برای اعتبارسنجی مدل عددی به کار گرفته شده است.



شکل ۱. الف: نمای پلان کانال (فلوم) آزمایشگاهی ب: نمای دریچه سالونی بیضوی آزمایشگاهی پ: نمای جانبی و جزئیات آن

۲. معادلات حاکم در مدل Flow-3D

در این پژوهش به منظور مدل سازی و بررسی تأثیر دریچه سالونی مستطیلی چندگانه در شرایط جریان مستغرق، از مدل Flow-3D که یک مدل بسیار قوی در زمینه CFD است استفاده شده است. در این نرم افزار از دو تکنیک عددی برای مدل سازی استفاده خواهد شد. روش حجم سیال (VOF) که از طریق سعی و خطا و تحلیل هم زمان معادلات ناویر-استوکس و تلاطم با انواع روش های CFD به محاسبه پارامترهای نظیر سرعت و فشار می پردازد. روش دوم روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) بوده که در شبیه سازی سطوح و اجسام صلب نظیر مرزهای هندسی کاربرد دارد.

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$$V_F \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right] = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) + G_z + f_z \quad (5)$$

معادله (۱) شرط تراکم ناپذیری اصلاح شده را نشان می دهد (معمولاً در روش های عددی برای کوپل کردن فشار و سرعت استفاده می شود. در Flow-3D، این رابطه ممکن است به عنوان بخشی از الگوریتم تصحیح فشار (Pressure Poisson Equation) استفاده شود. معادله (۲)، رابطه پیوستگی بوده که به طور کلی برای شرایط تراکم ناپذیری در تحقیق حاضر استفاده می شود و عملاً تغییرات زمانی دانسیته برابر با صفر می شود. معادلات (۳) تا (۵) معادله مومنتم یا اندازه حرکت در سه راستا هستند. به هر حال در این معادلات پارامتر V_F نسبت کسر حجمی فضای آزاد به جریان سیال، پارامتر ρ دانسیته سیال، پارامتر R_{DIF} معرف پخش تلاطم و همچنین پارامتر R_{SOR} معرف منبع جرم است. مولفه های (u, v, w) مربوط به مولفه های سرعت در جهت های (x, y, z) و یا (r, z, θ) می باشند. مولفه های (A_x, A_y, A_z) معرف مقادیر کسرهای سطح مقطع هستند که مربوط به جریان آزاد بوده و در جهت های (x, y, z) می باشند. در معادلات بالا، مولفه های (G_z, G_y, G_x) نشان دهنده شتاب های بدنه، مولفه های (F_z, F_y, F_x) نشان دهنده شتاب های ویسکوز است.

۳. معادله ضریب دبی

ضریب تخلیه یا ضریب آبگذری دریچه، در واقع نشان دهنده میزان راندمان عملکردی یک سازه هیدرولیکی همانند دریچه است. رابطه (۶) مربوط به ضریب تخلیه بوده که با توجه به ابعاد دریچه و خصوصیات هیدرولیکی جریان و استفاده از معادله انرژی قابل اثبات است.

$$Q = C_d \times B \times Y_{up}^{1.5} \times \sqrt{\frac{2gS^2}{S+1}} \quad (6)$$

ضریب دبی، (CD)، بیان شده در معادله (۶) نشان دهنده ضریب مشخصی از دبی عبوری جریان از دریچه های سالونی است. معادله (۶) در واقع شامل یک فرمول مشخصه برای ارزیابی دبی است و نقش برجسته ای در طبقه بندی عملکرد هیدرولیکی دریچه های سالونی دارد. این معادله جهت محاسبه ضریب آبگذری عبوری از دریچه سالونی بیضوی، با به کارگیری رابطه برنولی بین دو مقطع ۱ و ۲ و استفاده از

شکل کانال و با توجه به رفتار هیدرولیکی دریاچه سالونی و اعمال کردن رابطه پیوستگی و ترکیب روابط، توسط (خیر و همکاران^۱، ۲۰۲۱) ارائه شده است. در این معادله Q دبی ورودی، B عرض، C_d ضریب تخلیه دبی، Y_{up} ارتفاع آب بالادست دریاچه و S نسبت استغراق بوده که از نسبت عمق پایین دست به عمق بالادست $(\frac{Y_t}{Y_u})$ به دست می آید.

در تحقیق حاضر از مدل Flow-3D برای دستیابی به اهداف مدنظر استفاده گردید. معادلات حاکم در این مدل همان معادلات (۱) تا (۵) بوده که بسته به مدل تلاطمی مورد استفاده برای شبیه سازی نرخ استهلاک انرژی جنبشی در جریان های آشفتنه قابل حل به صورت عددی است. همانگونه که در بخش قبل نیز اشاره شد، در این مدل از دو تکنیک عددی روش حجم سیال (VOF) و روش کسر مساحت-حجم مانع (FAVOR) استفاده می شود.

۴. سناریو و شرح انجام شبیه سازی

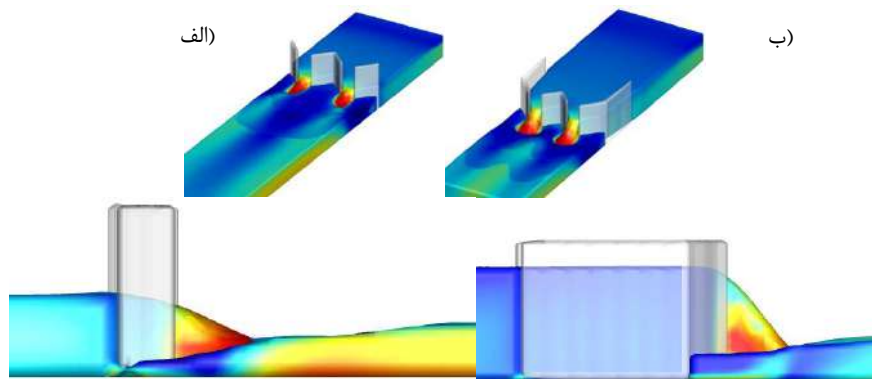
در تحقیق حاضر در مجموع ۱۸ سناریوی مختلف برای بررسی پارامترهای هیدرولیکی دریاچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی شبیه سازی شد. در این سناریوها بازشدگی های (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه، دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه و زوایای تبدیل (۵ و ۱۰) درجه نسبت به دیواره فلوم در نظر گرفته شد. علاوه بر این، تعداد ۹ سناریوی شبیه سازی دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون استفاده از تبدیل تدریجی مطابق با تحقیق (کرم دخت بهبهانی و همکاران، ۱۴۰۲) نیز به مجموعه سناریوها افزوده گردید. در این سناریوهای ۹ گانه دبی ها و بازشدگی های یکسانی به جهت ارزیابی و مقایسه پارامترهای هیدرولیکی نظیر (تنش برشی حداکثر، ضریب دبی و الگوی جریان) با دریاچه دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی، در نرم افزار Flow-3D فراخوانی و مدل سازی گردید. جدول (۱) مشخصات فنی این سناریوها را به طور کلی نمایش می دهد.

جدول ۱. سناریو و پارامترهای هیدرولیک استفاده شده در شبیه سازی ها

دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی				دریاچه سالونی مستطیلی چندگانه فاقد تبدیل تدریجی			
n	Q(l/s)	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	n	Q(l/s)	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$
1		30	5	10		30	-
2	20	45		11	20	45	
3		60		12		60	
4		20		13		20	
5	40	40		14	40	40	
6		60	10	15		60	
7		20		16		20	
8	60	40		17	60	40	
9		60		18		60	

در جدول (۱) n (شماره شبیه سازی)، Q (دبی عبوری جریان)، θ_1 (زاویه بازشدگی) و θ_2 (زاویه تبدیل تدریجی) است. همچنین شکل (۲)، نمایی از دریاچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی و بدون تبدیل تدریجی شبیه سازی شده را نشان می دهد.

¹ Kheybar et al



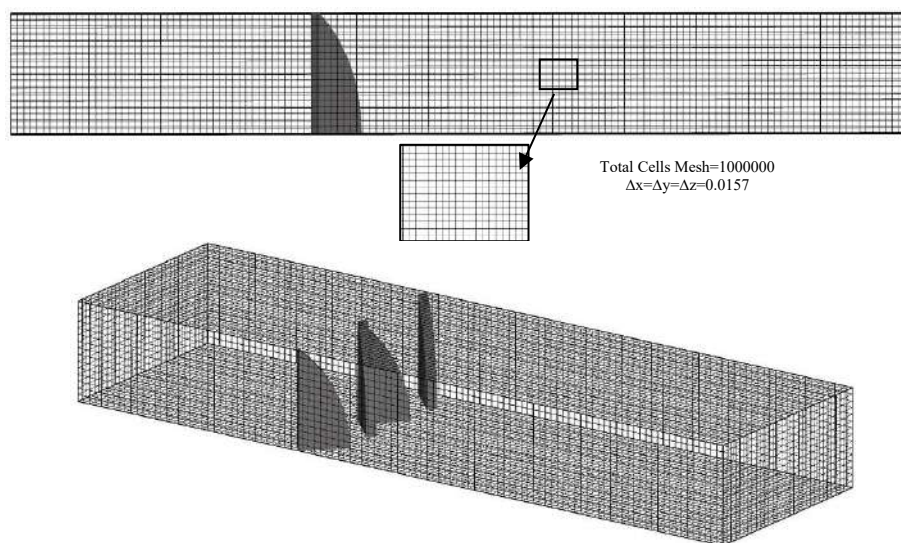
شکل ۲. نمای کلی از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه مورد مطالعه در دو حالت الف: دریچه به همراه تبدیل تدریجی ب: دریچه فاقد تبدیل تدریجی

۵. مش بندی و شرایط مرزی در شبیه سازی مدل

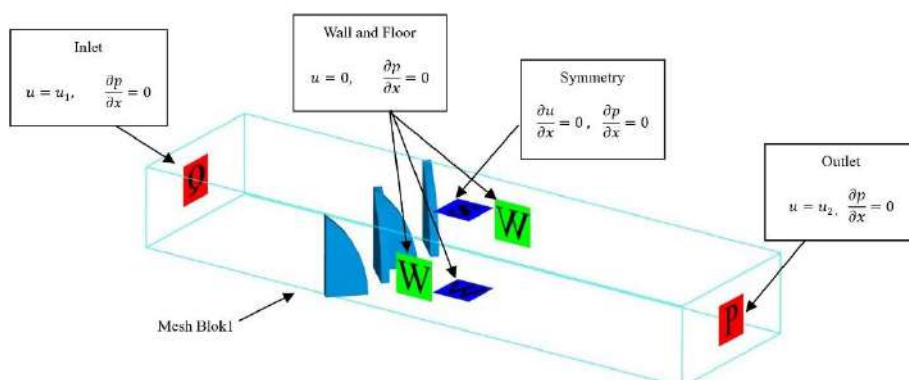
در این پژوهش ناحیه عددی از یک بلوک مش به منظور شبیه سازی دریچه سالونی بیضوی استفاده شده است. به منظور دستیابی به بهترین مش بندی سه گروه مش با تعداد (۵۰۰۰۰۰، ۱۰۰۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰۰۰) برای کل حوزه بلوک مش انتخاب شد. به همین منظور در تحقیق حاضر، ابتدا شبیه سازی مدل آزمایشگاهی دریچه سالونی مستطیلی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) با دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی ۵۲.۵ درجه و استغراق ۷۰ درصد انجام شد. سپس مقایسه نتایج و انطباق آنها با داده های آزمایشگاهی در دستور کار قرار گرفت و در نهایت مش بندی بهینه برای مدل مذکور به دست آمد. برای این کار طبق جدول ۲ نتایج ضریب دبی مدل عددی حاضر با نتایج آزمایشگاهی برای مدل دریچه سالونی مقایسه و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE(%)) محاسبه شد. مطابق جدول ۲ درصد خطای مطلق بین نتایج آزمایشگاهی و عددی ۲/۰۴۸ درصد محاسبه شد. در جدول ۲ (دبی جریان-Q)، (زاویه بازشدگی- θ)، (میزان استغراق-S)، (ضریب دبی عددی- CD_{num}) و (ضریب دبی آزمایشگاهی- CD_{exp}) نشان داده شده است. باتوجه به اینکه اختلاف درصد خطای مش دوم و سوم ناچیز بوده، لذا مش دوم به عنوان مش بهینه با ۱۰۰۰۰۰۰ سلول مش انتخاب شد. در شکل ۴ دامنه محاسباتی و شبکه مش بندی دریچه سالونی بیضوی چندگانه مورد بررسی نشان داده شده است. شرایط مرزی اعمال شده بر روی (Mesh Blok₁) در شکل ۵ نشان داده شده است. شرایط مرزی نرخ جریان خاص (میزان دبی حجمی-Q) برای ورودی جریان در بالادست دریچه (X_{max}) استفاده شد. برای مرز پایین دست کانال (X_{min})، شرایط فشار جریان (فشار مشخص شده-P) به جهت ایجاد استغراق در پایین دست دریچه انتخاب شد. برای مرز بالای شبکه شبیه سازی (Z_{max})، شرایط مرزی (متقارن-S) استفاده شد. این نوع شرایط مرزی شرایط سطح آزاد یا فشار اتمسفر را در نظر می گیرد.

جدول ۲. تحلیل حساسیت مش بندی در شبکه مدل عددی

MAPE (%)	CD_{num}	CD_{exp} (Pilbala et al, 2021)	Mesh cell	S (%)	θ (°)	Q (l/s)	case
16.692	0.8951	1/074483	500000	70	52.5	25	1
2.761	1.04475		1000000				2
2.048	1.05247		1500000				3

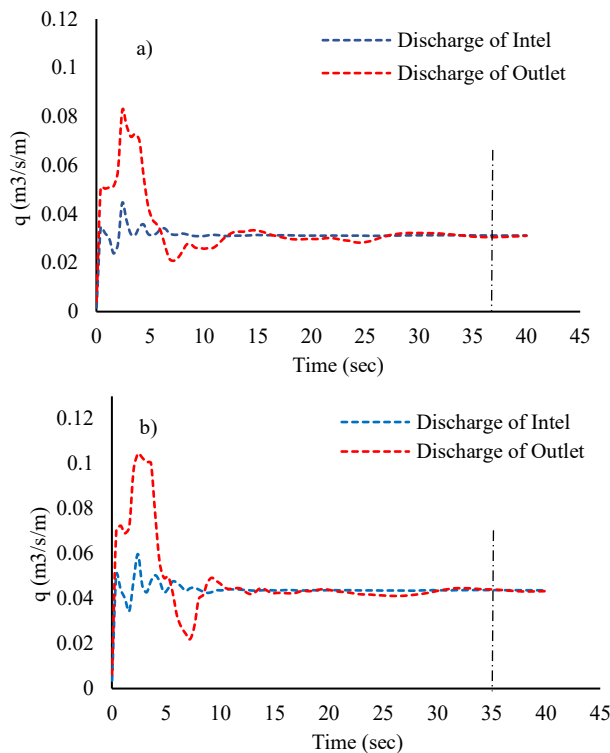


شکل ۴. مش بندی شبکه شبیه سازی



شکل ۵. شرایط مرزی اعمال شده بر روی دامنه محاسباتی دریچه بیضوی چندگانه مورد بررسی

برای دستیابی به اهداف مطابق با شبیه سازی های عددی نیاز است که همگرایی محاسبات عددی رخ دهد. این همگرایی راه حل های حالت پایدار در طول شبیه سازی با نظارت بر تغییرات دبی در شرایط مرزی ورودی کنترل شد. شکل ۶ نمودارهای سری زمانی دبی به دست آمده از مدل عددی با بازشدگی ۴۵ درجه، استغراق ۷۰ درصد در دو دبی اصلی ۲۵ و ۳۵ لیتر بر ثانیه را نشان می دهد. آزمون و خطا در مورد زمان شبیه سازی نشان داد که ۳۵ ثانیه برای رسیدن به تعادل جریان به جهت شبیه سازی دریچه سالونی بیضوی چندگانه مناسب است. تقریباً تمام نوسانات دبی در مدل های بررسی شده از نظر زمانی ناچیز بوده و جریان به ثبات نسبی رسیده است. اما به منظور احتیاط بیشتر، زمان اجرای شبیه سازی روی ۴۰ ثانیه تنظیم شد.



شکل ۶. تغییرات زمانی با دبی در واحد عرض (q) در ورودی و خروجی حوزه شبیه سازی برای بازشدگی ۴۵ درجه، استغراق ۷۰ درصد و دبی (a) ۲۵ لیتر بر ثانیه (b) ۳۵ لیتر بر ثانیه

۶. انتخاب مدل آشفتگی

در نسخه های جدید نرم افزار Flow-3D مدل های آشفتگی شامل مدل های صفر معادله ای (طول اختلاط پراتل)، مدل یک معادله ای، مدل دو معادله ای ($K - \epsilon$)، مدل دارای معادله تنش (RNG) و مدل شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) هستند که معروف ترین آن ها در بحث سازه های هیدرولیکی معادله های LES، $K - \epsilon$ و RNG است. در این تحقیق از نسخه ۱۱. استفاده گردید.

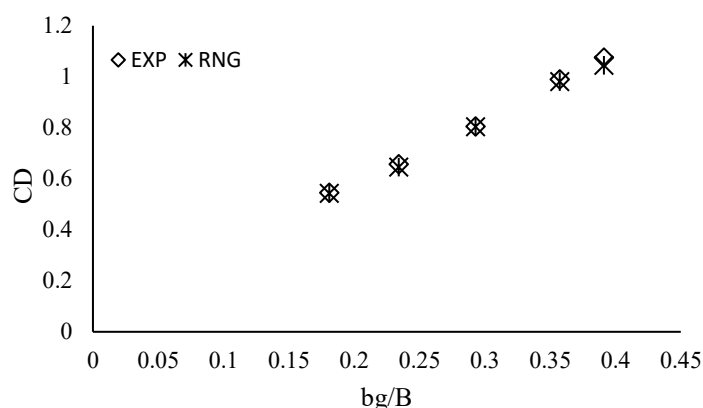
برای انتخاب عملکرد مدل های آشفتگی، از مقایسه نتایج ضریب دبی نسبت به پارامتر بدون بعد بازشدگی دریچه سالونی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) در دبی ۲۵ لیتر بر ثانیه، بازشدگی های (۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲.۵) درجه و در استغراق ۷۰ درصد استفاده شد. مدل های تلاطمی مورد استفاده برای این مقایسه در حل عددی، سه مدل آشفتگی ($RNG, K - \epsilon, K - \omega$) بودند. جدول (۳) نتایج ضریب دبی از شبیه سازی عددی Flow-3D و نتایج آزمایشگاهی را نشان می دهد. در جدول (۳) (دبی جریان - Q)، (زاویه بازشدگی - θ)، (بازشدگی بدون بعد - bg/B) و (میزان استغراق - S) نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می دهد که مدل آشفتگی RNG کمترین خطا را در مقایسه با دیگر مدل های آشفتگی داشته و دارای نزدیک ترین جواب به مدل آزمایشگاهی است. از این رو در تمامی شبیه سازی های تحقیق پیشرو از مدل آشفتگی RNG استفاده خواهد شد.

جدول ۳. درصد خطای نسبی به دست آمده از نتایج حل عددی برای سه مدل آشفتگی $RNG, K - \epsilon$ و $K - \omega$

MAPE (%)			نتایج ضریب دبی				S (%)	bg/B (m)	θ (°)	Q (l/s)	مدل
K- ω	K- ϵ	RNG	K- ω	K- ϵ	RNG	(pilbala et al, 2021)	70	0/39	52/5	25	1
9/130	7/990	2/7601	0/976	0/988	1/044	1/074					
1/990	2/410	0/84	0/9699	0/965	0/98	0/989					2
6/440	4/450	0/21	0/7533	0/7699	0/803	0/8					3
3/053	4/910	1/6501	0/6365	0/624	0/645	0/65					4
5/036	5/680	0/6101	0/5179	0/5144	0/542	0/54					
								0/18	35		5

۷. صحت سنجی نتایج عددی و آزمایشگاهی

گام نهایی در انجام مدل سازی عددی صحت سنجی مدل شبیه سازی شده در Flow-3D با مدل آزمایشگاهی است. به این منظور ۵ مدل درجه سالونی مستطیلی از آزمایش های پیل بالا و همکاران (۲۰۲۱) در دبی ۲۵ (لیتر بر ثانیه)، بازشدگی های (۳۰، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۲.۵) درجه و استغراق ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. این آزمایش ها شبیه سازی شد و نتایج آن با مقادیر به دست آمده از آزمون های آزمایشگاهی مقایسه گردید. پس از بررسی های صورت گرفته مشخص شد که مدل سازی های انجام شده در نرم افزار Flow3D تفاوت چندانی نسبت به مقادیر آزمایشگاهی نداشته و از درصد خطای کمی برخوردار بوده که مقدار آن $1/23$ درصد است. نتایج صحت سنجی بین مقادیر مدل سازی عددی و مقایسه آن با نمونه ی آزمایشگاهی در شکل ۵ آمده است. در واقع در شکل ۵ درصد بازشدگی در برابر ضریب تخلیه برای مقادیر واقعی و شبیه سازی شده با یکدیگر مقایسه شده اند.



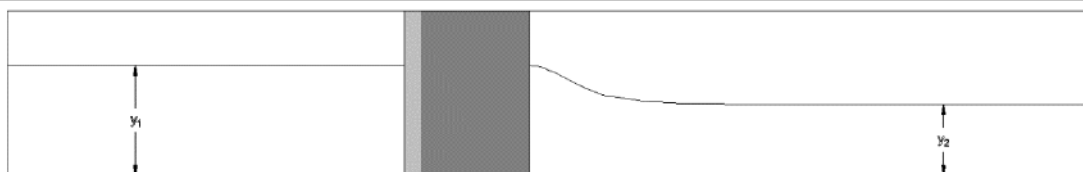
شکل ۵. نتایج صحت سنجی مدل آزمایشگاهی (پیل بالا و همکاران، ۲۰۲۱) در مقایسه با شبیه سازی عددی

یافته های پژوهش

در این بخش نتایج به دست آمده از مدل سازی و محاسبه ویژگی های جریان خروجی از درجه های سالونی مستطیلی چندگانه با تبدیل تدریجی در حالت جریان آزاد در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، سه میزان زاویه بازشدگی (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه و با تبدیل های تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه مورد ارزیابی قرار گرفته است. علاوه بر این پارامترهای هیدرولیکی نظیر، تغییرات تنش برشی در کف، ضریب دبی و گردابه های جریان بررسی و با شرایط جریان آزاد درجه های سالونی بیضوی چندگانه بدون تبدیل تدریجی مقایسه شده است.

۱. بررسی ضریب دبی در درجه های سالونی چندگانه

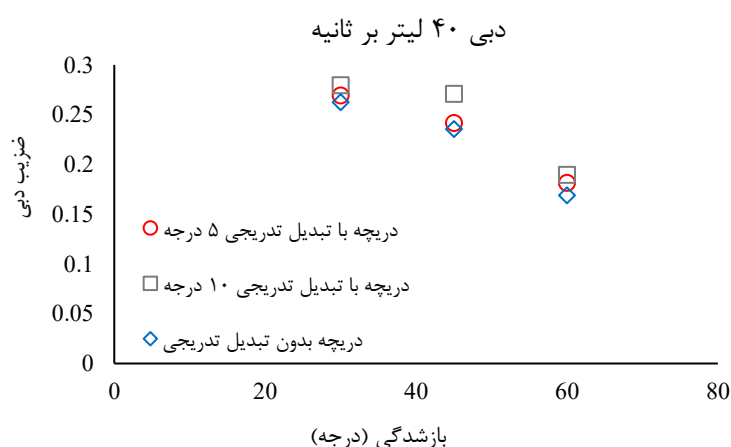
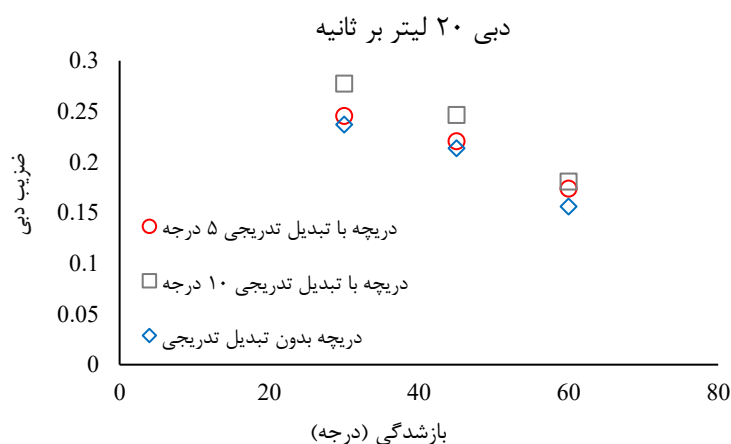
دریچه ها، سازه های هیدرولیکی تنظیم کننده و یا اندازه گیری جریان اند که عمود بر جهت جریان در مجاری روباز قرار می گیرند. دریچه های سالونی نیز به صورت عمود بر جهت جریان در کانال نصب شده و با تغییر زاویه بازشدگی دریچه، سطح آب بالادست خود را در رقوم مورد نظر تنظیم می نماید. همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد، خیبر و همکاران (۲۰۲۱)، جهت محاسبه ضریب آبگذری عبوری از دریچه سالونی بیضوی، با به کارگیری رابطه انرژی قبل و بعد از دریچه و اعمال رابطه پیوستگی با ترکیب روابط، به معادله (۶) دست یافت. در واقع مطابق شکل (۶)، با نوشتن رابطه انرژی بین بالادست و پایین دست دریچه سالونی می توان به معادله اشاره شده (۶) دست یافت.



شکل ۶. پروفیل کلی جریان در بالادست و پایین دست دریچه سالونی در بازه مورد بررسی

در این بخش به بررسی و تحلیل تغییرات ضریب دبی نسبت به تغییرات بازشدگی در سه میزان دبی (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه و سه میزان بازشدگی (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می گردد، شکل های (۷) تغییرات ضریب دبی را در مقابل تغییرات میزان بازشدگی دریچه (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه نشان می دهد. با توجه به روند تغییرات ضریب دبی (CD) نسبت به بازشدگی های دریچه، (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه، مشاهده می گردد که مقادیر ضریب دبی با تغییرات دبی رابطه مستقیم داشته و با میزان درجه بازشدگی دریچه رابطه معکوس دارد. به طوری که با افزایش دبی عبوری جریان مقادیر عددی ضریب دبی افزایش یافته و با افزایش درجه بازشدگی دریچه، ضریب دبی عبوری روندی کاهشی به خود خواهد گرفت. با توجه به روند تغییرات ضریب دبی در شکل های (۷) مشاهده می گردد که با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه، ضریب دبی نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. به این صورت که مقدار ضریب دبی بر روی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۲/۴، ۳ و ۳/۴ درصد افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار ضریب دبی بر روی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه در دبی های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۸، ۱۳ و ۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. کمترین افزایش ضریب دبی دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه، دبی ۶۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۳۰ درجه به

مقدار ۱.۳ درصد و بیشترین افزایش ضریب دبی مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۶۰ درجه به مقدار ۱۳/۵ درصد است.

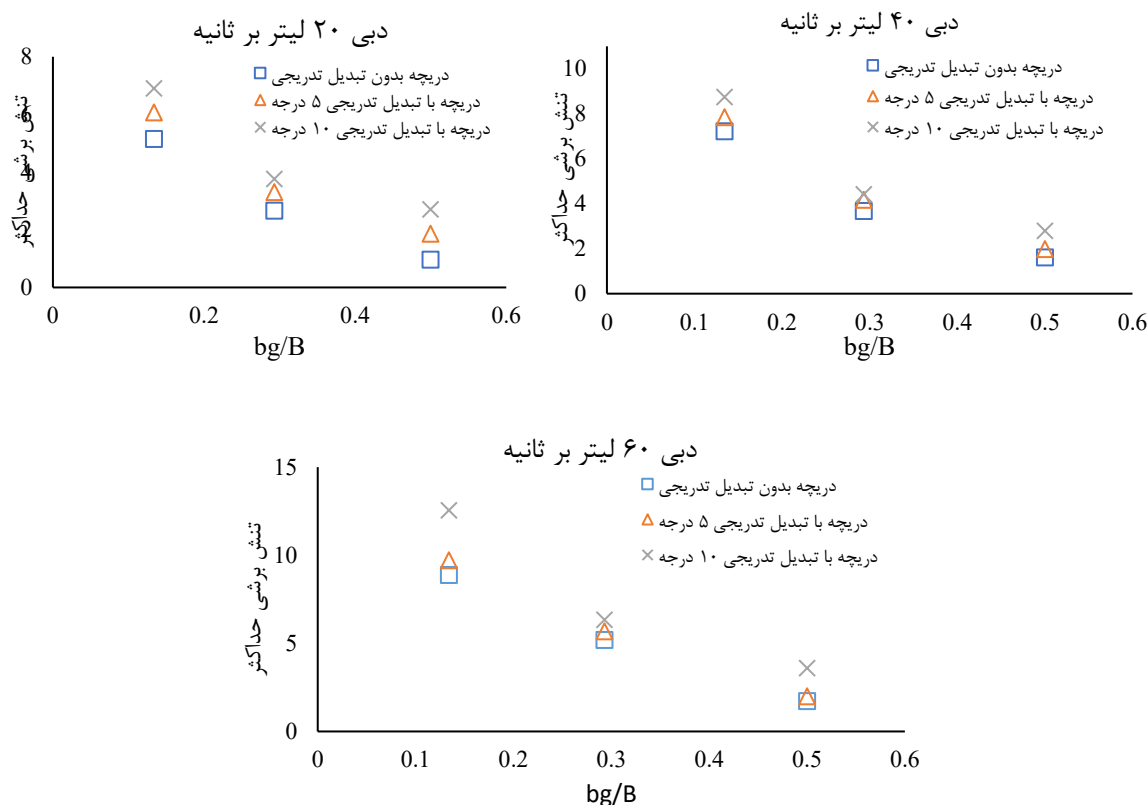


شکل ۷. تغییرات ضریب آبگذری نسبت به تغییرات بازشدگی دریچه

۲. بررسی تنش برشی در دریچه‌های سالونی چندگانه

شکل‌های (۸) تغییرات تنش برشی حداکثر را در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، نسبت به بازشدگی‌های (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه نشان می‌دهد که محور عمود مربوط به میزان تنش برشی حداکثر بوده و محور افق مربوط به بازشدگی‌های بدون بعد دریچه (۱۳۴/۰، ۲۹۳/۰ و ۵/۰) سانتی متر است. باتوجه‌به شکل‌های (۸) قابل مشاهده است که تنش برشی حداکثر با تغییرات دبی رابطه ای مستقیم داشته و با زاویه بازشدگی رابطه معکوس خواهد داشت. به نحوی که با افزایش دبی در بازشدگی‌های ثابت تغییرات

تنش برشی حداکثر روندی افزایشی داشته است. همچنین تنش برشی حداکثر در دبی ثابت، با افزایش مقدار بازشدگی، کاهش خواهد یافت. با توجه به روند تغییرات تنش حداکثر نسبت به تغییرات زاویه بازشدگی در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه در شکل‌های (۸) مشاهده می‌گردد که با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، تنش برشی حداکثر نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. به این صورت که مقدار تنش برشی حداکثر بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۲۷٪، ۱۳٪ و ۱۰٪ افزایش خواهد یافت. همچنین مقدار تنش برشی حداکثر بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه در دبی‌های (۲۰، ۴۰ و ۶۰) لیتر بر ثانیه، در بازشدگی‌های ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی به ترتیب ۵۱٪، ۲۱٪ و ۲۴٪ افزایش خواهد یافت. کمترین افزایش تنش برشی حداکثر دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۵ درجه، دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۶۰ درجه به مقدار ۸٪ و بیشترین افزایش تنش برشی حداکثر مربوط به تبدیل تدریجی با زاویه ۱۰ درجه، دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی ۳۰ درجه به مقدار ۶۴٪ است.



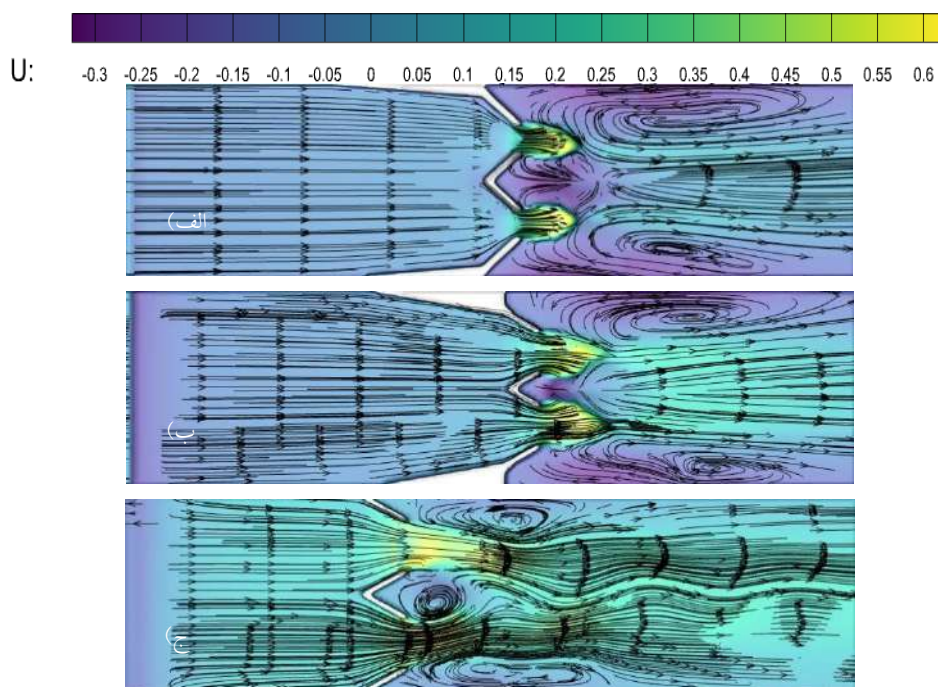
شکل ۸. تغییرات تنش برشی ماکزیمم نسبت به تغییرات عدد فرود

۳. بررسی گردابه‌های جریان در دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه

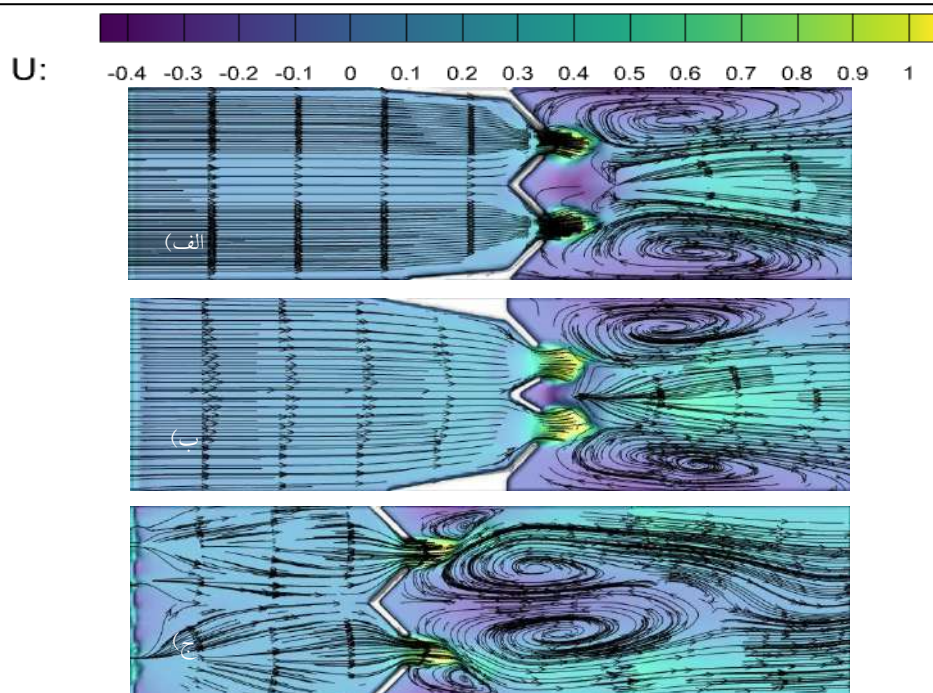
شکل‌های (۹ تا ۱۱) گردابه‌های ایجاد شده در اطراف دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه را در دبی ثابت ۲۰ لیتر بر ثانیه و بازشدگی‌های (۳۰، ۴۵ و ۶۰) درجه، برای هر دو حالت دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه و دریچه بدون تبدیل تدریجی را نشان می‌دهد. نوار راهنمای سرعت آبی، سبز، زرد و نارنجی در شکل‌های (۹ تا ۱۱) نشان‌دهنده مقادیر عددی و چگونگی توزیع نقادیر سرعت در بخش‌های مختلف کانال است. با توجه به چگونگی اختصاص رنگ به قسمت‌های مختلف کانال و اطراف دریچه و مشاهده محدوده توزیع سرعت مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه بازشدگی دریچه (افزایش تنگ‌شدگی) گردابه‌های جریان در اطراف دریچه و ابعاد و وسعت آن کاهش می‌یابد. این اتفاق نشان‌دهنده کاهش مقادیر

عددی سرعت جریان در بخش های مختلف کانال است. علاوه بر این بررسی های صورت گرفته نشان داد که ابعاد گردابه با میزان بازشدگی دریچه رابطه مستقیم خواهد داشت، به صورتی که هرچه زاویه بازشدگی افزایش یابد (دریچه تنگ تر شود) ابعاد و وسعت گردابه های ایجاد شده در اطراف دریچه نیز کاهش می یابد. با بررسی های صورت گرفته مشخص شد که در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه، گردابه های بزرگ با قدرت بالا و محدوده بزرگ در کناره های دریچه و در نزدیکی دیواره های کانال مشاهده می گردد که تا پایاب دریچه نیز ادامه دارد. اما در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی، وسعت و قدرت گردابه های جریان کاهش یافته و تعداد گردابه های به وجود آمده در اطراف دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی در مقایسه با زمانی که از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی استفاده می شود افزایش خواهد یافت.

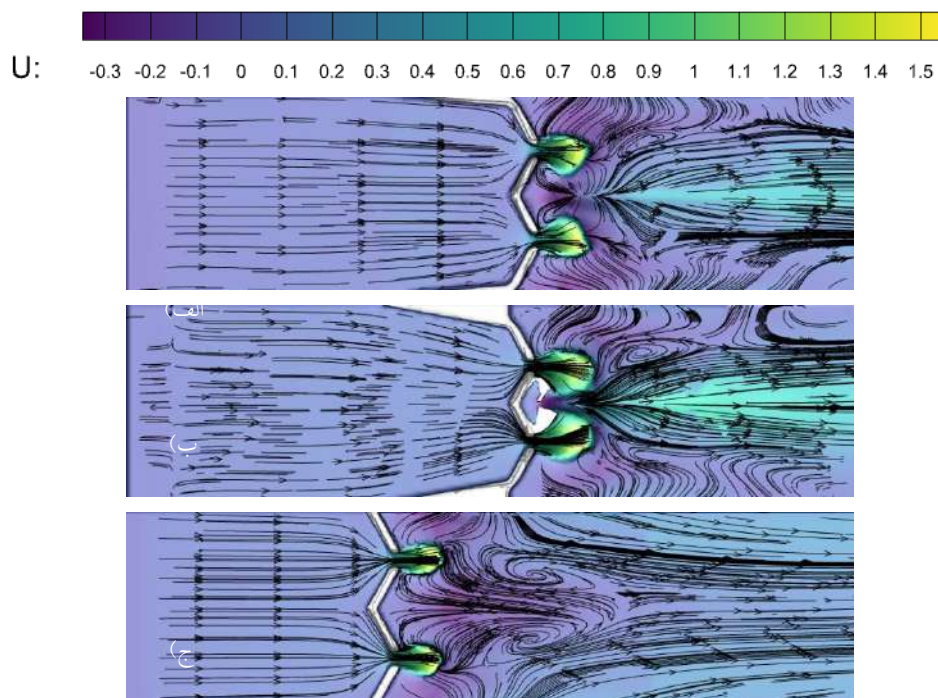
علاوه بر این نتایج نشان داد که گردابه های ایجاد شده جریان اطراف دریچه سالونی اغلب در نزدیکی دریچه به وجود می آید که این پدیده با مشاهده کاهش مقادیر سرعت و تغییر رنگ در این نواحی قابل مشاهده خواهد بود. در انتها باتوجه به شکل های (۹ تا ۱۱) مربوط به دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی مشخص شد که جریان آب و گردابه ها به طرف دیواره های کانال منحرف می شود. اما باتوجه به شکل های (۹ تا ۱۱) مربوط به دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی در زوایای بازشدگی (۴۵ و ۶۰) درجه مشخص شد که جریان و گردابه های ایجاد شده اغلب در مرکز کانال به وجود می آید که این پدیده باعث فرسایش و آبستگی در مرکز کانال می شود.



شکل ۹. میدان سرعت دریچه های سالونی مستطیلی چندگانه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۳۰ درجه (الف) دریچه با تبدیل ۵ درجه (ب) دریچه با تبدیل ۱۰ درجه (ج) دریچه بدون تبدیل



شکل ۱۰. میدان سرعت دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۴۵ درجه (الف) دریچه با تبدیل ۵ درجه (ب) دریچه با تبدیل ۱۰ درجه (ج) دریچه بدون تبدیل



شکل ۱۱. میدان سرعت دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در دبی ۲۰ لیتر بر ثانیه و باز شدگی ۶۰ درجه (الف) دریچه با تبدیل ۵ درجه (ب) دریچه با تبدیل ۱۰ درجه (ج) دریچه بدون تبدیل

بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تبدیل تدریجی تأثیر قابل توجهی بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارد. افزایش دبی موجب افزایش تنش برشی حداکثر و ضریب دبی شده، درحالی که افزایش میزان بازشدگی دریچه در دبی ثابت، کاهش این دو پارامتر را به دنبال دارد. مقایسه دو آرایش نشان داد که ایجاد تبدیل تدریجی، اگرچه موجب افزایش ضریب دبی و در نتیجه بهبود ظرفیت عبور جریان می‌شود، اما هم‌زمان تنش برشی حداکثر وارد بر کف کانال را نیز افزایش می‌دهد که می‌تواند از دیدگاه پایداری و فرسایش بستر حائز اهمیت باشد. ازسوی دیگر، بررسی ساختار گردابه‌ای جریان نشان داد که استفاده از تبدیل تدریجی با زوایای ۵ و ۱۰ درجه، موجب شکل‌گیری گردابه‌هایی بزرگ‌تر و قوی‌تر در مجاورت دریچه و دیواره‌های کانال و تداوم آن‌ها در پایین دست می‌شود؛ در مقابل، در حالت بدون تبدیل تدریجی، اگرچه تعداد گردابه‌های ایجادشده در اطراف دریچه افزایش می‌یابد، اما وسعت و شدت آن‌ها کاهش پیدا می‌کند؛ بنابراین، می‌توان گفت تبدیل تدریجی با ایجاد نوعی مبادله بین افزایش ظرفیت عبور جریان و افزایش تنش برشی و شدت گردابه‌ها همراه است و انتخاب زاویه مناسب تبدیل باید با توجه هم‌زمان به عملکرد هیدرولیکی دریچه، کنترل آشفتگی جریان و ملاحظات مربوط به پایداری و فرسایش کف کانال انجام شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی عددی تأثیر تبدیل تدریجی بر عملکرد دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه در شرایط جریان آزاد و مقایسه آن با دریچه‌های سالونی چندگانه بدون تبدیل تدریجی و بررسی پارامترهایی نظیر ضریب دبی، تنش برشی حداکثر وارد بر کف کانال و گردابه‌های جریان در دبی‌ها و بازشدگی‌های متفاوت پرداخته شده است. نتایج نشان داد، تنش برشی حداکثر با تغییرات دبی رابطه‌ای مستقیم داشته و با زاویه بازشدگی رابطه معکوس خواهد داشت. به‌نحوی که با افزایش دبی در بازشدگی‌های ثابت تغییرات تنش برشی حداکثر روندی افزایشی داشته است. همچنین تنش برشی حداکثر در دبی ثابت، با افزایش مقدار بازشدگی، کاهش خواهد یافت. همچنین با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، تنش برشی حداکثر نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. بررسی‌ها نشان داد، مقادیر ضریب دبی با تغییرات دبی رابطه مستقیم داشته و با میزان درجه بازشدگی دریچه رابطه معکوس دارد. به‌طوری که با افزایش دبی عبوری جریان مقادیر عددی ضریب دبی افزایش یافته و با افزایش درجه بازشدگی دریچه، ضریب دبی عبوری روندی کاهشی به خود خواهد گرفت. همچنین با ایجاد تبدیل تدریجی بر روی دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه، ضریب دبی نسبت به شرایط دریچه بدون تبدیل تدریجی افزایش خواهد یافت. در خصوص بررسی گردابه‌های جریان نتایج نشان داد که در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی با زوایای (۵ و ۱۰) درجه، گردابه‌های بزرگ با قدرت بالا و محدوده بزرگ در کناره‌های دریچه و در نزدیکی دیواره‌های کانال مشاهده می‌گردد که تا پایین دست دریچه نیز ادامه دارد. اما در زمان استفاده از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی، وسعت و قدرت گردابه‌های جریان کاهش یافته و تعداد گردابه‌های به وجود آمده در اطراف دریچه‌های سالونی مستطیلی چندگانه بدون تبدیل تدریجی در مقایسه با زمانی که از دریچه سالونی مستطیلی چندگانه به همراه تبدیل تدریجی استفاده می‌شود افزایش خواهد یافت.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- احمدیان، جواد، و افضلیان، علیرضا. (۱۳۹۶). تحلیل کاربردی سرریزهای کلیدپیانویی به عنوان یک سد انحرافی. نشریه مهندسی عمران/میرکبیر، ۴۹ (۳)، ۴۷۶-۴۶۳. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.694>
- احمدیان، جواد، و افضلیان، علیرضا. (۱۳۹۵). هیدرولیک جریان بر روی سرریزهای کلیدپیانویی تحت هندسه‌ی متفاوت پایه‌ها. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۳ (۲)، ۲۶۷-۲۷۷. <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3068>
- افضلیان، علیرضا، و احمدیان، جواد. (۱۳۹۴). سرریز کلید پیانویی با پاراپت‌وال‌های زاویه‌دار. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۸ (۲)، ۹۱-۱۰۲. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351>
- خیبر، هومن، سجادی، سید محسن، و احمدیان، جواد. (۱۳۹۹). بررسی استهلاک انرژی و دبی عبوری از دریچه سالونی- بیضوی در شرایط وجود تبدیل ناگهانی. نشریه علوم آب و خاک، ۲۴ (۳)، ۸۳-۹۵. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351>
- خیبر، هومن، سجادی، سید محسن، احمدیان، جواد، و قمشی، مهدی. (۱۴۰۴). بررسی هیدرولیک سرریزهای جانبی لولایی با آستانه. مجله تحقیقات آب و خاک/ایران، ۵۶ (۱)، ۲۴۶-۲۲۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790>
- خیبر، هومن، سجادی، سید محسن، احمدیان، جواد، و قمشی، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی ضریب دبی و راندمان سرریزهای جانبی لولایی با آستانه. مجله رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۳ (۲)، ۷۲-۸۸. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096>
- سجادی، سید محسن، احمدیان، جواد، و قنواتی، محبوبه. (۱۳۹۶). بررسی استهلاک انرژی جریان گذرنده از روی سرریز کلید پیانویی با کلید خروجی مانع‌دار. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۸ (۶۹)، ۷۷-۹۲. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.108456.1165>
- سلمان‌زاده، سمیرا، فتحی مقدم، منوچهر، احمدیان، جواد، و سجادی، سید محسن. (۱۴۰۳). بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر ضریب درگ در پوشش گیاهی صلب و انعطاف پذیر. نشریه علوم و مهندسی آبیاری، ۴۷ (۱)، ۱۵-۳۱. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.41559.2035>
- شفاعی بجستان، محمود، زینی وند، مهدی، طهماسبی پور، محسن. (۱۳۹۹). ضریب دبی دریچه سالونی بیضوی همراه با تبدیل تدریجی در شرایط مستغرق. نشریه هیدرولیک، ۱۵ (۲)، ۶۷-۸۰. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.225028.1449>
- طاهری طلاوری، طوبی، سجادی، سید محسن، احمدیان، جواد، عزیزی نادیان، حسین. (۱۴۰۳). بررسی عددی هیدرولیکی جریان عبوری از دریچه‌های سالونی بیضوی چندگانه در شرایط جریان مستغرق. نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴ (۳)، ۴۰-۶۰. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10747.1127>
- فتحی، ستاره، سجادی، سید محسن، احمدیان، جواد، و پارسائی، عباس. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر استغراق‌های مختلف بر پارامترهای هیدرولیکی جریان در دریچه سالونی مستطیلی چندگانه. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۲۴۹-۲۶۱. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365670.1106>
- فتحی، ستاره، سجادی، سید محسن، و احمدیان، جواد. (۱۴۰۳). بررسی خصوصیات هیدرودینامیکی دریچه سالونی چندگانه مستطیلی در جریان مستغرق. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۱ (۲)، ۷۹-۹۸. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22395.3728>
- منصوری، کوثر، و احمدیان، جواد. (۱۳۹۵). انسداد سرریزهای کلید پیانویی در جریان‌های آواری با سیستم آزمایش‌های انفرادی. مجله علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹ (۳)، ۱۷۲-۱۶۳. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12352>
- نیسی، مصطفی، سجادی، محسن، شفاعی بجستان، محمود، و احمدیان، جواد. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان عبوری از سرریز جانبی مثلثی لبه شیب‌دار در شرایط زیر بحرانی. علوم آب و خاک، ۲۸ (۳)، ۱۱۷-۱۲۹. <https://doi.org/10.47176/jwss.28.3.19853>

یارمحمدی، بهاره، و احدیان، جواد. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی هیدرولیک جریان سرریز کلید پیانویی در ترکیب های مختلف دیواره سپری. *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۹ (۴)، ۴۷-۵۸. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12495>

یوسفوند، فاطمه، منعم، محمد جواد، و کاویانپور، محمدرضا. (۱۳۹۴). ارزیابی آزمایشگاهی و تحلیلی ضریب دبی دریچه سالونی در شرایط جریان مستغرق. *شریه آبیاری و زهکشی ایران* ۹ (۵)، ۸۱۱-۸۱۹. https://idj.iaid.ir/article_55126.html?lang=fa

References

- Aqua Systems 2000 Incorporation (AS21). (2013). Leaders in Water Management and Control. <http://www.as2i.net/products/control-gates/hydra-lopac-gate>
- Afzalian, A. R., & Ahadiyan, J. (2015). Piano key weir with sloped parapet wall, *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(2), 91-102. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351> [In Persian]
- Ahadiyan, J., & Afzalian, A. (2016). Effect of Pier Geometry on the Hydraulic Properties of Piano Key Weirs, *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2), 267-277. <https://doi.org/10.22069/jwfs.2016.3068> [In Persian]
- Afzalian, A. R., & Ahadiyan, J. (2015). Piano key weir with sloped parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*, 38(2), 91-102. <https://doi.org/10.22055/jise.2015.11351> [In Persian]
- Ahadiyan, J., Sadeghi, B., Shafai Bejestan, M., & Sajjadi, S. M. (2024). Effect of longitudinal training wall (LTW) on improving the inlet flow pattern at the side channel intakes. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(4), 51-67. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10776.1128> [In Persian]
- Ahadian, J., & Afzalian, A. (2017). Applied analysis of Piano Key Weir (PKW) structures as a diversion dam. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(3), 463-476. <https://doi.org/10.22060/ceej.2016.694> [In Persian]
- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (2024). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003>
- Alabedi, H. J., & Khassaf, S. I. (2024). Numerical study on the discharge capacity of a piano key side weir with various ratios of the crest length to the width. *Open Engineering*, 14(1), 1-10, 20220536. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0536>
- Carollo, F. G., Ferro, V., & Pampalone, V. (2012). Experimental investigation of the outflow process over a triangular labyrinth-weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(1), 73-79. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000366)
- Chenari, S. A., Nadian, H. A., Ahadiyan, J., Valipour, M., Oliveto, G., & Sajjadi, S. M. (2024). Enhancing hydraulic efficiency of side intakes using spur dikes: A case study of Hemmat water intake, Iran. *Water*, 16(16), 2254. <https://doi.org/10.3390/w16162254>
- Chow, V. T. (1959). Open channel hydraulics. *McGraw-Hill Book Company, Inc.*, New York, NY, USA. <https://books.google.com/books?id=OwZSAAAAMAAJ>
- Cox, A. L., Kullberg, E. G., MacKenzie, K. A., & Thornton, C. I. (2014). Stage-discharge rating equation for an elliptical sharp-crested weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 04014018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000730](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000730)
- Daneshfaraz, R., Norouzi, R., Abbaszadeh, H., Kuriqi, A., & Di Francesco, S. (2022). Influence of sill on the hydraulic regime in sluice gates: An experimental and numerical analysis. *Fluids*, 7(7), 244. <https://doi.org/10.3390/fluids7070244>
- Eizeldin, M. A., Ali, A. M., & Farag, A. S. (2023). Investigation of flow characteristics downstream vertical sluice gates of the Bahr Yousef regulator physical model. *Water Science*, 37(1), 225-238. <https://doi.org/10.1080/23570008.2023.2236385>
- Fathi, S., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Parsaie, A. (2024). Investigation of the effect of different submerging on the flow hydraulic parameters in multiple rectangular LOPAC gates. *Water and Irrigation Management*, 14(2), 249-261. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.365670.1106> [In Persian]

- Fathi, S., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2024). Investigating the hydrodynamic characteristics of the multiple rectangular LOPAC gates in submerged flow. *Journal of Water and Soil Conservation*, 31(2), 79–98. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2024.22395.3728> [In Persian]
- Fathi-Moghadam, M., Salmanzadeh, S., Ahadiyan, J., & Sajjadi, M. (2024). Drag coefficient of rigid and flexible deciduous trees in riparian forests. *Journal of Hydraulic Engineering*, 150(5), 04024027. <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13709>
- Hayawi, H. A. M., Yahia, A. A. G., & Hayawi, G. A. M. (2008). Free combined flow over a triangular weir and under a rectangular gate. *Damascus University Journal*, 24(1), 9–22. <https://damascusuniversity.edu.sy/mag/law/images/stories/9-22.pdf>
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2024). Hydraulic investigation of the flow through multiple rectangular LOPAC gates in free flow and submerged mode by Flow-3D software. *Irrigation and Water Engineering*, 14(4), 19–32. <https://doi.org/10.22125/iwe.2024.437092.1786> [In Persian]
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Abraham, J., & Azizi-Nadian, H. (2025). Hydraulic performance of multiple and single LOPAC gates. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, jws2025280. <https://doi.org/10.2166/aqua.2025.280>
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., Azizi-Nadian, H., & Abraham, J. (2025). Hydraulic performance of multiple and single LOPAC gates. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, jws2025280. <https://doi.org/10.2166/aqua.2025.280>
- Karamdokht-Bahbahani, M., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of the flow through multiple rectangular LOPAC gates with Flow-3D software. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28(1), 51–64. <https://doi.org/10.47176/jwss.28.1.19852> [In Persian]
- Kheibar, H., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2020). Evaluation of energy dissipation and flow rate of elliptical-LOPAC gate under sudden transition condition. *Journal of Water and Soil Sciences*, 24(3), 83–95. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3947-en.html> [In Persian]
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., & Ahadiyan, J. (2021). Effect of sudden canal contraction on the discharge coefficient and the energy dissipation coefficient of the elliptical LOPAC gate. *Irrigation and Drainage*, 70(5), 1145–1154. <https://doi.org/10.1002/ird.2622>
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Ghomeshi, M. (2025). Investigating the discharge coefficient and efficiency of the pivot side weirs with threshold. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3(2), 72–88. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.467874.1096> [In Persian]
- Kheybar, H., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Ghomeshi, M. (2025). Hydraulic analysis of pivot side weirs with sill. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1), 229–246. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.382426.669790> [In Persian]
- Craig, K. R., Elser, P. G., Allen, L., & Langeman, P. (2006). Irrigation gate system (U.S. Patent No. 7,114,878 B2). *United States Patent and Trademark Office*, Washington, DC, USA. <https://patents.google.com/patent/US7114878B2>
- Mansouri, K., & Ahadian, J. (2016). Blockage of piano key weirs in debris flow with individual experiments. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), 163–172. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12352> [In Persian]
- Mobarak, F., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Zeynivand, M. (2022). Numerical modeling of the effect of elliptical elongation on the hydraulic performance of an elliptical LOPAC gate. *Water and Irrigation Management*, 12(2), 263–275. <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.335817.952> [In Persian]

- Negm, A. M., Abdelaal, G. M., Elfiky, M. M., Abdalla, Y. M., & Afifi, M. (2006). Effects of multi-gates operations on bottom velocity pattern under submerged flow conditions. In *Proceedings of the 10th International Water Technology Conference (IWTC10)*, Alexandria, Egypt. https://www.academia.edu/7712760/Effects_of_Multi_Gates_Operations_on_Bottom_Velocity_Pattern_Under_Submerged_Flow_Conditions
- Negm, A. A. M., Al-Brahim, A. M., & Alhamid, A. A. (2002). Combined-free flow over weirs and below gates. *Journal of Hydraulic Research*, 40(3), 359–365. <https://doi.org/10.1080/00221680209499950>
- Neisi, M., Sajjadi, M., Shafai Bejestan, M., & Ahadiyan, J. (2024). Experimental study of flow over the triangular side weir with inclined crest in subcritical flow. *Journal of Water and Soil Sciences*, 28(3), 117–129. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4423-en.html> [In Persian]
- Oad, R., & Kinzli, K. (2006). SCADA employed in Middle Rio Grande Valley to help deliver water efficiently. *Colorado Water Newsletter of the Water Center at Colorado State University*, Colorado, USA. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=868983>
- Pilbala, A., Sajjadi, S., & Bejestan, M. S. (2021). Hydraulic performance of elliptical-LOPAC gate under submerged flow conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.007>
- Pilbala, A., Shafai Bejestan, M., Sajjadi, S. M., & Fraccarollo, L. (2023). Investigation of the different models of elliptical-LOPAC gate performance under submerged flow conditions. *Water Resources Management*, 37, 3527–3542. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03512-1>
- Puri, D., Sihag, P., Sadeghifar, T., Dursun, O. F., & Thakur, M. S. (2023). Soft computing-based model development for estimating the aeration efficiency through Parshall flume and Venturi flumes. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 6(3), 401–413. <https://doi.org/10.1007/s41939-023-00153-0>
- Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Qanavati, M. (2017). Effect of baffled outlet keys at Piano Key Weir on dissipating energy. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(69), 77–92. <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.108456.1165> [In Persian]
- Sajjadi, S. M., Barihi, S., Ahadiyan, J., Azizi Nadian, H., Valipour, M., Bahmanpouri, F., & Khedri, P. (2023). Redesigning the fuse plug, emergency spillway, and flood warning system: An application of flood management. *Water*, 16(24), 3694. <https://doi.org/10.3390/w16243694>
- Sajjadi, S. M., Kheibar, H., & Ahadiyan, J. (2020). Investigation of the effect of sudden transition on the elliptical-LOPAC gate discharge coefficient under submerged flow conditions. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(1), 115–124. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20087942.1399.14.1.10.3> [In Persian]
- Salahi, K., Ahadiyan, J., Zeng, Y.-H., Azizi, H. N., & Sajjadi, S. M. (2024). Laboratory investigation of the effect of particle and vegetation roughness on changes in drag force in an open channel. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 12(3), 221–230. <https://doi.org/10.5890/JEAM2024.09>
- Salmanzadeh, S., Fathi-Moghadam, M., Ahadiyan, J., & Sajjadi, S. M. (2024). Investigation of the effective parameters on the drag coefficient in rigid and flexible vegetation. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(1), 15–31. <https://doi.org/10.22055/jise.2022.41559.2035> [In Persian]
- Shaddehi, F. R., & Bijankhan, M. (2020). Experimental study on free and submerged multi-jets. *Flow Measurement and Instrumentation*, 75, 101805. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101805>

- Shafai Bejestan, M., Zeinivand, M., & Tahmasebi Poor, M. (2020). Discharge coefficient of elliptical LOPAC gate with gradual transition in submergence condition. *Journal of Hydraulics*, 15(2), 67–80. <https://doi.org/10.30482/jhyd.2020.225028.1449> [In Persian]
- Sharififard, E., Azizipour, M., Ahadiyan, J., & Haghighi, A. (2024). Determination of creep function coefficients of viscoelastic pipes using a transient-guided machine learning model. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(11), 2132–2149. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.091>
- Sihag, P., Nouri, M., Ahmadpari, H., Seyedzadeh, A., & Kisi, O. (2022). Approximation of the discharge coefficient of radial gates using metaheuristic regression approaches. *Sustainability*, 14(22), 15145. <https://doi.org/10.3390/su142215145>
- Skogerboe, G. V., Bennett, R. S., & Walker, W. R. (1972). Generalized discharge relations for cutthroat flumes. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 98(4), 569–583. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000891>
- Taheri Talavari, T., Sajjadi, S. M., Ahadiyan, J., & Azizi Nadian, H. (2024). Numerical hydraulic and hydrodynamic investigation of flow passing through multiple elliptic LOPAC gates with Flow-3D software. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 40–60. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10747.1127> [In Persian]
- Tao, H., Jamei, M., Ahmadianfar, I., Khedher, K. M., Farooque, A. A., & Yaseen, Z. M. (2022). Discharge coefficient prediction of canal radial gate using neurocomputing models: An investigation of free and submerged flow scenarios. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 16(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/19942060.2021.2002721>
- Yarmohammadi, B., & Ahadian, J. (2016). Experimental study of flow hydraulic in piano key weirs at different parapet wall. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(4), 47–58. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12495> [In Persian]
- Yousofvand, F., Monem, M. J., & Kavianpour, M. R. (2015). Experimental and theoretical analysis of discharge coefficient for submerged LOPAC gate. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(5), 811–819. https://idj.iaid.ir/article_55126.html?lang=en [In Persian]



Predicting temperature and precipitation changes in the Shahrood region using CMIP6 climate models with a novel multi-criteria decision-making approach: OPLO-POCOD

Sina Khoshnevisan¹ , Samad Emamgholizadeh^{2✉} , and Reza Ashouri³

1. Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: sinakhoshnevisan@shahroodut.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: s_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Shahrood Institute of Higher Education, Shahrood, Iran. E-mail: reza.ashouri1400@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received 07 August 2025
Received in revised form 08 December 2025
Accepted 10 February 2026
Available online 23 September 2026

Keywords:

climate change,
multi-criteria decision
making,
precipitation and
temperature,
emission scenarios,
APOLO-POCOD.

ABSTRACT

Objective: Climate change threatens water security in semi-arid Shahrood by increasing evaporation and water demand while reducing precipitation and groundwater recharge. This study assesses these impacts using advanced climate models and future climate scenarios.

Method: This study uses Shahrood's monthly precipitation and temperature data and evaluates three CMIP6 climate models using the OPLO-POCOD MCDM method based on R^2 , MAE, and KGE. The best-performing model was then downscaled using the delta change factor method.

Results: CMCC-EMS2 was identified as the best-performing model for both precipitation and temperature. OPLO-POCOD confirmed its superiority with the lowest lost-opportunity values. Future projections indicate 1.5–7.3% decreases in precipitation and temperature increases of about 1.4–1.9°C under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios.

Conclusions: Climate change is expected to reduce runoff and aquifer recharge while increasing groundwater pressure and water-resource instability. The OPLO-POCOD method provides a reliable approach for climate-model selection. Future research should use ensemble models and compare CMIP6 with CMIP5 to reduce uncertainty and improve projections.

Cite this article: Khoshnevisan, S., Emamgholizadeh, S., & Ashouri, R. (2026). Predicting temperature and precipitation changes in the Shahrood region using CMIP6 climate models with a novel multi-criteria decision-making approach: OPLO-POCOD. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 26-55. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>

Publisher: Razi University.

Introduction

Climate change presents a significant and multifaceted threat to water resources, particularly in semi-arid regions. These areas are especially vulnerable due to their already limited water availability and high dependence on consistent precipitation patterns. Rising temperatures and reduced precipitation are two primary manifestations of climate change that pose a dual threat to these regions. On one hand, increasing temperatures enhance evaporation rates, thereby decreasing the availability of surface water. On the other hand, altered precipitation patterns lead to reduced natural recharge of aquifers. Concurrently, higher temperatures and changing weather patterns increase water demand for agricultural, industrial, and domestic uses, leading to excessive extraction of groundwater resources. The sustainability of water resources in such regions is thus seriously challenged. Ensuring water security requires a comprehensive understanding of how climate change impacts both surface and groundwater resources. This study aims to investigate these impacts in the Shahrood region, a semi-arid area where water scarcity is a pressing issue. By employing advanced climate models and innovative evaluation techniques, this research seeks to provide insights into the future climate scenarios.

Method

This study focuses on the Shahrood region, utilizing monthly precipitation and temperature data to assess climate change impacts. We employed three climate models from the CMIP6: CMCC-EMS2, MPI-ESM1-2-LR, and CNRM-CM6-1-HR. To evaluate and rank these climate models, we applied the OPLO-POCOD technique, a recently developed multi-criteria decision-making (MCDM) method. OPLO-POCOD (Opportunity Lost–Polar Coordinates Distance) integrates the concept of opportunity loss with the calculation of distances in polar coordinates to provide a comprehensive and fair comparison among alternatives. The method constructs an initial decision matrix, derives the opportunity loss matrix, and transforms the results into a polar coordinate framework where distances from the ideal solution are computed and weighted according to the importance of criteria. This approach not only captures both gains and losses across criteria but also allows a robust ranking of models by minimizing lost opportunities and maximizing achieved potential. Statistical indices such as R^2 , MAE, and KGE were used as performance criteria. Finally, to downscale the model outputs to a finer resolution, we applied the delta change factor method.

Results

To evaluate base on the metrics the CMCC-EMS2 model demonstrated superior performance, with the highest R^2 value of 0.188 for precipitation, indicating a better fit to observed data. It also had the lowest MAE value of 12.254 mm, suggesting smaller average errors in its predictions, and the highest KGE value of 0.381, reflecting a good balance between correlation, bias, and variability. For temperature, CMCC-EMS2 again performed best with an R^2 value of 0.928, an MAE of 3.161°C, and a KGE of 0.733. Using the OPLO-POCOD

technique, which evaluates models based on lost opportunity values in polar coordinates, the CMCC-EMS2 model was identified as the most suitable for both precipitation and temperature simulations. It had the lowest lost opportunity values of 0.29547 for precipitation and 0.22376 for temperature, indicating its superior performance relative to the other models. Subsequently, the CMCC-EMS2 model's outputs were analyzed for near-future (2015–2034) and far-future (2035–2056) periods under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The SSP2-4.5 scenario, representing moderate socio-economic trends, showed a 1.5% decrease in average annual precipitation compared to the baseline period (1995–2014). The more extreme SSP5-8.5 scenario exhibited a 7.3% reduction in precipitation. Additionally, the analysis of temperature data revealed significant changes under both scenarios. In the near-future period (2015–2034), both the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios showed an increase in the average annual temperature by approximately 1.4 degrees Celsius compared to the baseline period (1995–2014). However, in the far-future period (2035–2056) Under the SSP2-4.5 scenario, the average annual temperature increased to about 1.9 degrees Celsius, while the SSP5-8.5 scenario projected a similar increase, indicating a consistent rise in temperature across both scenarios.

Conclusions

The findings suggest that climate change will lead to decreased runoff, reduced aquifer recharge, and increased pressure on groundwater resources, ultimately resulting in heightened water resource instability. The use of the OPLO-POCOD technique for evaluating and ranking climate models offers a robust and comprehensive approach to selecting the most suitable model for climate change analysis. The results underscore the importance of considering multiple criteria and statistical indices in the evaluation process to ensure accurate and reliable predictions. The insights gained from this study can enable policymakers and water resource managers to reduce pressure on water resources and minimize their vulnerability to climate change through the development of smart strategies and optimal management practices. By understanding the potential impacts of climate change on precipitation and temperature, proactive measures can be taken to enhance water resource resilience and sustainability. For future research, it is recommended to employ ensemble models to aggregate results from multiple models, thereby reducing uncertainty and providing more accurate climate projections. Additionally, comparing the performance of CMIP6 models with those from CMIP5 could offer valuable insights into the structural and content improvements of the newer models.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

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

Ethical Considerations

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

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در منطقه شاهرود با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی CMIP6 استفاده از رویکرد نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD

سینا خوشنویسان^۱، صمد امامقلی زاده^۲، و رضا آشوری^۳

۱. گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: sinakhoshnevisan@shahrootut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: s_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir
۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir
۴. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: reza.ashouri1400@gmail.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	هدف: هدف این پژوهش، ارزیابی تغییرات اقلیمی و بررسی پیامدهای احتمالی آن بر منابع آب در بخش شمالی شهرستان شاهرود، با تمرکز بر تغییرات دما و بارش و شناسایی مناسب‌ترین مدل اقلیمی برای پیش‌بینی شرایط آینده است. روش پژوهش: در این مطالعه، سه مدل اقلیمی CMIP6 شامل MPI-ESM1-2-LR، CMCC-EMS2 و CNRM-CM6-1-HR با استفاده از شاخص‌های آماری R^2، MAE و KGE ارزیابی شدند. سپس با بهره‌گیری از روش چندمعیاره OPLO-POCOD، مدل‌ها رتبه‌بندی و مدل برتر برای شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و آینده دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶) انتخاب شد.
کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، تصمیم‌گیری چندمعیاره، بارش و دما، سناریوهای انتشار، APOLO-POCOD	یافته‌ها: نتایج نشان داد CMCC-EMS2 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش و دما دارد. پیش‌بینی‌ها کاهش ۵/۱ و ۷/۳ درصدی بارش سالانه و افزایش ۴/۱ تا ۹/۱ درجه سانتی‌گرادی دمای سالانه را نسبت به دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ نشان دادند. همچنین، کاهش بارش زمستانه و تغییر در الگوی زمانی بارش پیش‌بینی شد. نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی می‌تواند با کاهش بارش و رواناب و محدود شدن تغذیه آبخوان‌ها، فشار بر منابع آب زیرزمینی و ناپایداری منابع آبی در منطقه را افزایش دهد. از این رو، اتخاذ راهبردهای سازگاری و مدیریت پایدار منابع آب برای کاهش آسیب‌پذیری منطقه در برابر تغییرات اقلیمی ضروری است.

استناد: خوشنویسان، سینا؛ امامقلی زاده، صمد؛ و آشوری، رضا. (۱۴۰۵). پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در منطقه شاهرود با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی CMIP6 با استفاده از رویکرد نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۳)، ۵۵-۲۶.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>



مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است؛ چالشی که ریشه در فعالیت‌های انسانی همچون صنعتی‌شدن، رشد جمعیت، و وابستگی فزاینده به سوخت‌های فسیلی دارد (دیتز و همکاران^۱، ۲۰۲۰؛ هوک و تانگ^۲، ۲۰۱۳). این روند منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن، متان و بخار آب در جو زمین شده و با تشدید پدیده گلخانه‌ای، موجب برهم‌خوردن تعادل سیستم اقلیمی کره زمین گردیده است. شواهد علمی نشان می‌دهد که میانگین دمای کره زمین طی ۱۰۰ سال گذشته حدود ۰٫۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بر اساس پیش‌بینی‌ها، این افزایش ممکن است تا پایان قرن جاری به حدود ۳ درجه سانتی‌گراد برسد (لویسون و فتنینگ^۳، ۲۰۱۳). این گرمایش جهانی، همراه با نوسانات بارشی، خشکسالی‌های شدید، افزایش پیک سیلاب‌ها و اختلال در چرخه هیدرولوژیکی پیامدهای گسترده‌ای به همراه دارد (دلقندی و همکاران^۴، ۲۰۱۷؛ ایمانی و همکاران^۵، ۲۰۲۳). از جمله پیامدهای مهم می‌توان به کاهش منابع آب در دسترس برای مصارف کشاورزی و آشامیدن، اختلال در تولیدات کشاورزی، افزایش فشار بر جوامع روستایی، ضرورت بهره‌گیری از روش‌های نوین آبیاری، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، و تهدید فزاینده امنیت غذایی و معیشت جمعیت‌های وابسته به منابع طبیعی اشاره کرد (خوشنویسان و همکاران، ۱۴۰۳؛ پولادگر و همکاران، ۱۴۰۱). در چنین شرایطی، پایش دقیق روندهای اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات آتی، به‌ویژه، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران از اهمیت بالایی برخوردار است (الماسی و همکاران، ۱۴۰۳؛ لی و همکاران^۶، ۲۰۲۰). افزایش دما نه‌تنها موجب تشدید تبخیر و تعرق و کاهش رطوبت خاک می‌شود، بلکه می‌تواند به کاهش رواناب، کاهش بازده آبیاری، تغییر زمان‌بندی رشد گیاهان و افت بهره‌وری محصولات کشاورزی بینجامد. هم‌زمان، نوسانات بارشی و تغییر در الگوی فصلی بارش نیز منابع آب تجدیدپذیر و بیلان آب را تحت‌تأثیر قرار داده و پایداری سامانه‌های طبیعی و انسانی را با چالش مواجه می‌سازد (ایرز و دادمان^۷، ۲۰۱۰؛ مناهان و ثوبالد^۸، ۲۰۱۸). از این‌رو، پایش و تحلیل روند تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی و منابع آب، برای درک بهتر رفتار اقلیم، به‌منظور تدوین راهبردهای سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک ضرورت انکارناپذیر است (ایمانی و همکاران، ۱۴۰۱).

در پاسخ به نگرانی‌های فزاینده درباره روند گرم‌شدن زمین و پیامدهای آن، هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم^۹ (IPCC) در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان ملل متحد و سازمان جهانی هواشناسی تأسیس شد. این هیئت با مشارکت هزاران دانشمند از سراسر جهان، وظیفه دارد آخرین یافته‌های علمی درباره تغییر اقلیم را گردآوری، ارزیابی و در قالب گزارش‌هایی جامع منتشر کند. هدف اصلی این نهاد، ارائه اطلاعات علمی دقیق و بی‌طرفانه برای سیاست‌گذاران است تا تصمیم‌گیری در حوزه اقلیم و محیط‌زیست بر پایه شواهد علمی صورت گیرد. خروجی‌های این هیئت، به‌ویژه گزارش‌های دوره‌ای آن، در سطح بین‌المللی به‌عنوان معتبرترین مرجع برای تحلیل وضعیت کنونی اقلیم و پیش‌بینی‌های آینده شناخته می‌شوند. مدل‌های گردش عمومی جو و اقیانوس (AOGCM)^{۱۰} اصلی‌ترین ابزارهای محاسباتی هستند که برای شبیه‌سازی و مطالعه سیستم‌های آب‌وهوایی زمین تحت اثر تغییر اقلیم استفاده می‌شوند (پاچاوری و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۴). این مدل‌ها با ترکیب معادلات فیزیکی و شیمیایی، تعاملات بین جو، اقیانوس‌ها، سطح زمین و یخ‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. AOGCM‌ها برای پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی و ارزیابی تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر اقلیم جهانی بسیار حیاتی هستند. بدین منظور این هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم مجموعه‌ای از سناریوهای توسعه و انتشار گازهای

¹ Dietz et al² Höök & Tang³ Levinson & Fettig⁴ Delghandi et al⁵ Imani et al⁶ Li et al⁷ Ayers & Dodman⁸ Monahan & Theobald⁹ The Intergovernmental Panel on Climate Change¹⁰ Atmosphere-Ocean General Circulation Model¹¹ Pachauri et al

گلخانه‌ای را منتشر نمود، نخستین مجموعه سناریوها در اوایل دهه ۱۹۹۰ منتشر شد. معروف‌ترین گزارش‌های IPCC که پایه بسیاری از مطالعات اقلیمی هستند، گزارش پنجم (CMIP5) و گزارش ششم (CMIP6) هستند. در CMIP5، مسیرهای واداشت تابشی یا RCP^۱ ها معرفی شدند که نشان‌دهنده میزان گرمایش جهانی ناشی از غلظت گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ هستند. در CMIP6، سناریوهای مسیرهای توسعه اجتماعی-اقتصادی مشترک^۲ (SSPs) ارائه شده‌اند که علاوه بر انتشار گازها، روندهای اقتصادی و اجتماعی را نیز در نظر می‌گیرند و طیفی گسترده‌تر از آینده‌های ممکن اقلیمی را پوشش می‌دهند. این سناریوها در پنج مسیر مختلف شامل SSP1 (توسعه پایدار)، SSP2 (میانگین تاریخی)، SSP3 (چالش‌های منطقه‌ای)، SSP4 (نابرابری) و SSP5 (توسعه مبتنی بر انرژی فسیلی) تعریف شده‌اند که هر کدام چشم‌انداز متفاوتی از روندهای جمعیتی، اقتصادی، فناوری و سیاست‌های اقلیمی را به تصویر می‌کشند؛ به‌عنوان مثال، SSP1 بر توسعه پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تمرکز دارد، SSP2 روندهای فعلی را ادامه می‌دهد، SSP3 به چالش‌های منطقه‌ای و رشد کند اقتصادی می‌پردازد، SSP4 بر افزایش نابرابری‌های اقتصادی و اجتماعی تأکید دارد و SSP5 به رشد سریع اقتصادی همراه با استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی مربوط می‌شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه پژوهش حاضر به انجام رسیده است که به‌صورت مختصر در دو بخش مطالعات داخل کشور و مطالعات خارج از کشور ارائه می‌گردد.

۱. مطالعات داخل کشور

حقیقی و همکاران (۱۴۰۴)، تغییرات دمای بیشینه و بارش در سه ایستگاه سینوپتیک (آباد، شیراز و لار) را طی دوره پایه ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. برای پیش‌بینی دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ از سه مدل اقلیمی ACCESS-ESM1-5، MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای انتشار مختلف (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) استفاده گردید. نتایج نشان داد که دمای بیشینه در هر سه ایستگاه و در همه سناریوها روند افزایشی دارد، به‌طوری که در ایستگاه آباد افزایش دما بین ۱/۵۷ تا ۱/۶۳ درجه سانتی‌گراد، در شیراز بین ۱/۳۷ تا ۱/۵ درجه و در لار بین ۱/۲۳ تا ۱/۳۷ درجه مشاهده شد. همچنین بارش فصلی الگوهای متفاوتی از تغییر را نشان داد؛ به‌طور مثال در آباد بارش زمستان افزایش و در بهار و تابستان کاهش یافت، در حالی که در شیراز و لار بسته به مدل و سناریو، بارش فصلی کاهش یا افزایش یافت.

در پژوهش نیرومندفرد و همکاران (۱۴۰۱) تغییرات دما و بارش در منطقه بیرجند طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت و برای پیش‌بینی دوره آینده ۲۰۲۲-۲۰۵۰ از سه مدل اقلیمی MIROC-ES2L، MRI-ESM2-0 و IPSL-CM6A-LR استفاده شد. پس از ارزیابی معیارهای آماری، مدل MIROC-ES2L به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید و تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تحلیل شد. نتایج نشان داد که دمای حداقل و حداکثر در همه سناریوها روند افزایشی قابل‌توجهی دارند، به‌طوری که دما نسبت به دوره پایه به‌طور معناداری افزایش خواهد یافت. بارش نیز روند سینوسی داشته و در برخی ماه‌ها افزایش و در برخی کاهش را نشان می‌دهد، اما میانگین بارش ماهانه در هر سه سناریو روند افزایشی دارد.

۲. مطالعات خارج از کشور

دهبان و همکاران^۳ (۲۰۲۵) با استفاده از ۱۰ مدل CMIP6، تغییرات آینده دما و بارش را در ایران و کشورهای همسایه بررسی کرد، نتایج نشان داد دمای منطقه در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) بین ۱ تا ۲.۲ درجه و در آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) تا ۴ درجه سانتی‌گراد به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت بر اساس پیش‌بینی‌ها، تغییرات بارش در این بازه‌ها متغیر خواهد

^۱ Representative Concentration Pathway

^۲ Shared Socioeconomic Pathways

^۳ Dehban et al

بود. در آینده نزدیک، این تغییرات از کاهش ۱۰ درصدی تا افزایش ۳۰ درصدی متغیر است، در حالی که در آینده دور، از کاهش ۳۰ درصدی تا افزایش بیش از ۳۰ درصدی پیش‌بینی شده است. احتمال کاهش بارش در ترکیه و افزایش آن در پاکستان نسبت به دیگر مناطق بیشتر است.

در پژوهشی که توسط زیدعلی نژاد و همکاران^۱ (۲۰۲۴) انجام شد به بررسی اثرات تغییر اقلیم در منطقه خرم‌آباد پرداخته شد. نتایج نشان داد که دمای منطقه در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP2-4.5 به طور میانگین حدود ۱.۲۱ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که این مقدار در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوی شدیدتر SSP5-8.5 به ۲.۹۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین میزان بارش در این منطقه نیز افزایش خواهد یافت، به‌طوری که میانگین تغییرات بارش بین ۲.۹۱ تا ۴.۸۶ میلی‌متر در ماه طی دوره‌های آینده متغیر خواهد بود. این نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی گرما و افزایش بارش در منطقه مورد مطالعه است که به‌ویژه تحت سناریوی با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای (SSP5-8.5) شدت بیشتری خواهد داشت.

تهوری و همکاران^۲ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای که با استفاده از مدل اقلیمی CanESM5 انجام شد، تغییرات دمایی در زیرحوضه‌های سد زاینده‌رود طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی گردید. نتایج نشان داد که میانگین دمای منطقه به ترتیب حدود ۱/۴۵، ۴ و ۹/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت در پژوهشی دیگر تغییرات دما و بارش در شهر تبریز طی دوره آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفت، برای این منظور از مدل‌های اقلیمی BCC-CSM2-MR، CanESM5 و CESM2 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. نتایج حاکی از افزایش قابل‌توجه دما در تمام سناریوها بوده، به‌طوری که میانگین دما از مقدار پایه ۱۲/۶۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به ۱۵/۴۲، ۱۶/۱۶ و ۱۷/۵۳ درجه سانتی‌گراد در سناریوهای فوق افزایش یافت. از سوی دیگر بارش سالانه نیز با کاهش نسبی همراه بود، به‌گونه‌ای که در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب کاهش‌هایی معادل ۰/۸۹، ۱/۶۹ و ۲/۲۱ میلی‌متر پیش‌بینی شد.

باتوجه به پیچیدگی سامانه‌های اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)^۳ به‌عنوان ابزارهای اصلی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم جهانی توسعه یافته‌اند. تاکنون تعداد زیادی از این مدل‌ها طراحی شده‌اند که هر یک دارای ویژگی‌ها، دقت‌ها و کاربردهای خاص خود هستند؛ با این حال، هیچ مدلی به طور کامل برای تمامی مناطق جغرافیایی و شرایط اقلیمی مناسب نیست (رحمان و پکات^۴، ۲۰۲۴؛ راجو و کومار^۵، ۲۰۲۰). تفاوت در پارامترهای ورودی، رزولوشن مکانی و فرضیات فیزیکی باعث می‌شود برخی مدل‌ها در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی مناطق خاص عملکرد بهتری داشته باشند و برخی دیگر محدودیت‌هایی داشته باشند. به همین دلیل، انتخاب مدل‌های مناسب برای هر منطقه و هدف پژوهشی، به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و کاهش خطاها، اهمیت زیادی پیدا کرده است. در واقع، برآوردهای مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) برای بارش و دما، دارای تنوع و پراکندگی قابل‌توجهی هستند. هر مدل نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد؛ برخی در مناطق گرمسیری و برخی دیگر در نواحی قطبی عملکرد بهتری دارند. از این رو، انتخاب مدلی که بهترین سازگاری با منطقه مورد مطالعه داشته باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است (رجب‌پندری و همکاران^۶، ۲۰۱۶). به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی، از شاخص‌های مختلف ارزیابی استفاده می‌شود. استفاده از چندین شاخص مختلف این امکان را فراهم می‌کند که کارایی مدل‌ها از جنبه‌های گوناگون سنجیده شود و نقاط قوت و ضعف آن‌ها بهتر مشخص گردد. به‌کارگیری مجموعه‌ای از شاخص‌ها کمک می‌کند تا ارزیابی جامع‌تری از دقت و قابلیت اعتماد مدل‌ها به دست آید، اما این تنوع شاخص‌ها و نتایج متفاوت ارزیابی تحت هر شاخص می‌تواند فرایند رتبه‌بندی و انتخاب مدل برتر را

¹ Zeydlinejad et al

² Tahroudi et al

³ General Circulation Model

⁴ Rahman & Pekkatt

⁵ Raju & Kumar

⁶ Rajbhandari et al

پیچیده و دشوار کند (آیوگی و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ کلاتس و همکاران^۲، ۲۰۲۱). در این شرایط، استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM)^۳ ضرورت می یابد، زیرا این روش ها قادرند معیارهای متعدد را به صورت هم زمان مورد ارزیابی قرار دهند و با در نظر گرفتن وزن و اهمیت هر شاخص، مدل هایی را که بهترین عملکرد کلی را دارند به طور دقیق تر شناسایی کنند (هاجکویز و کولینز^۴، ۲۰۰۷؛ هانگو و همکاران^۵، ۲۰۲۲). این روش ها با در نظر گرفتن مجموعه ای از شاخص های ارزیابی، امکان رتبه بندی مدل ها را بر اساس عملکرد کلی آن ها فراهم می سازند. یکی از پرکاربردترین این روش ها، روش TOPSIS (روش نزدیک ترین فاصله به راه حل ایده آل) است که بر پایه مفهوم فاصله هندسی از بهترین و بدترین گزینه تعریف می شود و گزینه ای را به عنوان برتر انتخاب می کند که کمترین فاصله را از راه حل ایده آل و بیشترین فاصله را از راه حل ضدایده آل داشته باشد (هونگو و همکاران^۶، ۲۰۲۲). در بسیاری از پژوهش ها مانند کریمی و قاسمی از TOPSIS به جهت شناسایی مدل اقلیمی برتر استفاده شد و نتایج نشان داد، بارش ماهانه تا ۳۹ درصد و دما تا ۲ درجه سانتیگراد در زیرحوضه آند آذربایجان غربی افزایش خواهد یافت (کریمی و قاسمی، ۱۳۹۶). علاوه بر TOPSIS، روش های VIKOR، AHP^۷ و PROMETHEE برای نیز در مطالعات اقلیمی به کار گرفته شده اند (باناک و همکاران^۸، ۲۰۲۴؛ گپتا و همکاران^۹، ۲۰۲۵). روش OPLO-POCOD^{۱۰} که در سال ۲۰۲۴ توسط شیخ و صنفی معرفی شد (شیخ و صنفی^{۱۱}، ۲۰۲۴). این روش یکی از جدیدترین تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره مبتنی بر مفهوم فرصت ازدست رفته در فضای مختصات قطبی به شمار می آید. این روش با استفاده از فاصله سنجی گزینه ها نسبت به بهترین وضعیت در فضای دوبعدی، شامل مقدار معیار و فرصت ازدست رفته، قادر است جایگاه گزینه ها را با دقت و شفافیت بالا ارزیابی نماید. نوآوری اصلی این تکنیک در ترکیب اطلاعات فرصت ازدست رفته با داده های اولیه در قالب زوج های مرتبی و محاسبه فاصله در فضای قطبی نهفته است که امکان وزن دهی معیارها و ارزیابی گزینه ها را به شیوه ای جامع تر فراهم می کند. همچنین، ارائه درجه فرصت ازدست رفته و درصد فرصت به دست آمده به عنوان شاخص های کمی، امکان مقایسه دقیق تر و تحلیل بهینه تر گزینه ها را مهیا می سازد.

منطقه شاهرود به عنوان یکی از نواحی خشک و نیمه خشک ایران، به دلیل شرایط اقلیمی خاص خود، به شدت در معرض پیامدهای منفی تغییر اقلیم قرار دارد. افزایش دما و تغییرات ناپایدار در الگوهای بارش می تواند تأثیرات گسترده ای بر منابع آب، کشاورزی و معیشت جمعیت محلی داشته باشد. با وجود اهمیت بالای این موضوع، مطالعات دقیق و جامع منطقه ای که با بهره گیری از جدیدترین داده ها و مدل های اقلیمی CMIP6 انجام شده باشد، محدود است. علاوه بر این، تنوع مدل های اقلیمی و تفاوت عملکرد آنها در مقیاس منطقه ای، نیازمند استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره برای ارزیابی جامع و انتخاب مدل های مناسب است. استفاده از این رویکرد امکان می دهد تا با در نظر گرفتن شاخص های مختلف ارزیابی، عملکرد مدل ها به صورت چندمعیاره تحلیل و بهترین مدل برای پیش بینی های اقلیمی منطقه شناسایی شود. هدف پژوهش حاضر، تحلیل و پیش بینی تغییرات دما و بارش در منطقه شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، در بازه تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و آینده ی نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶)، با استفاده از روش نوآورانه OPLO-POCOD است؛ روشی که تاکنون در مطالعات اقلیمی به کار گرفته نشده است. این روش با ارزیابی دقیق عملکرد مدل ها تحت شاخص های مختلف، میزان فرصت ازدست رفته هر مدل را

¹ Ayugi et al

² Klutse et al

³ Multi-Criteria Decision Making

⁴ Hajkiewicz & Collins

⁵ Houngue et al

⁶ Houngue et al

⁷ Analytic Hierarchy Process

⁸ Bhanage et al

⁹ Gupta et al

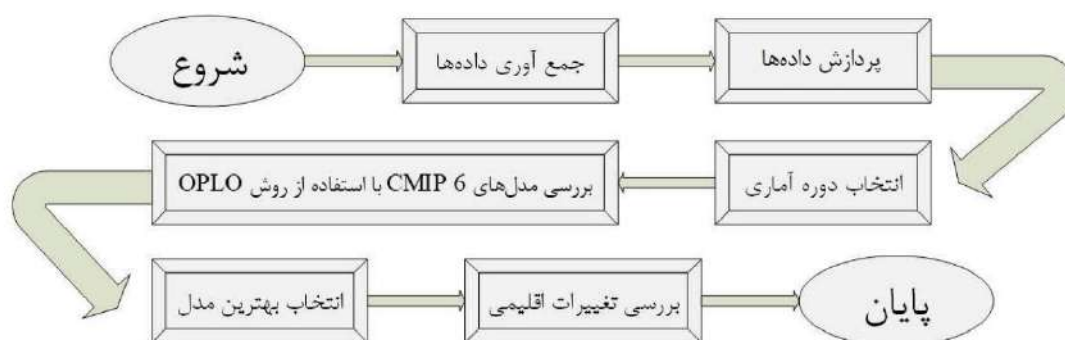
¹⁰ Opportunity Losses-Based Polar Coordinate Distance

¹¹ Sheikh & Senfi

به صورت کمی ارائه می‌دهد. چنین قابلیت‌های امکان مقایسه شفاف‌تر و دقیق‌تر مدل‌ها را فراهم می‌سازد و به انتخاب بهینه‌ترین مدل برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی منطقه کمک می‌کند.

روش پژوهش

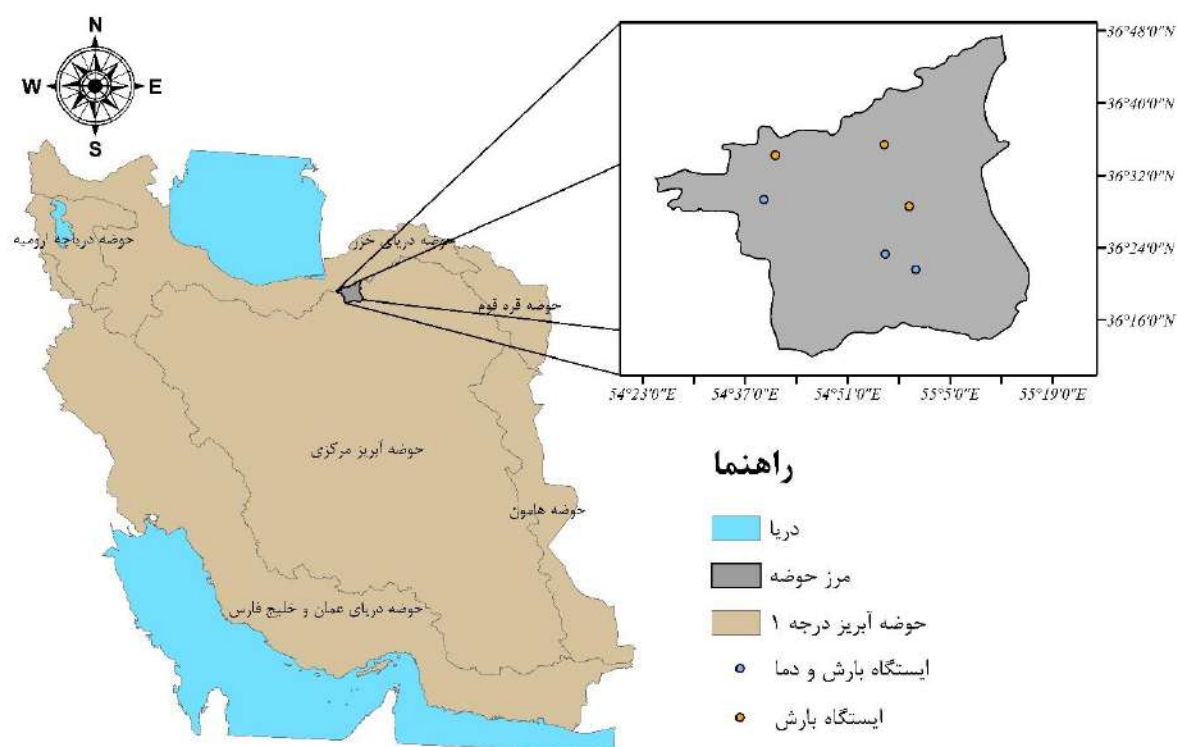
شکل (۱) برای شفاف‌سازی روند پژوهش و نمایش گام‌های اصلی انجام تحقیق، فلوچارت زیر ارائه شده است. این فلوچارت به صورت تصویری مراحل مختلف مطالعه را از جمع‌آوری داده‌ها تا تحلیل نتایج نشان می‌دهد و شامل مراحل انتخاب مدل‌ها، ارزیابی با شاخص‌های آماری، به کارگیری روش OPLO-POCOD و تحلیل تغییرات بارش و دما است.



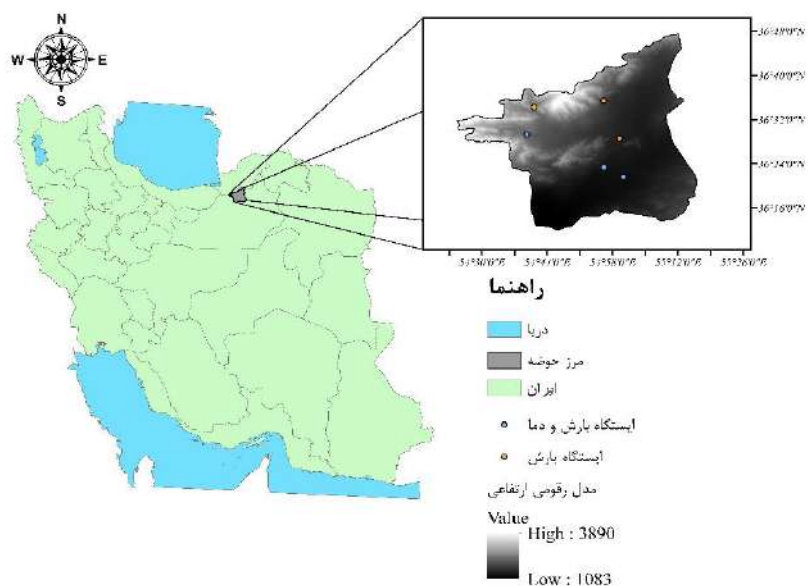
شکل ۱. فلوچارت انجام پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

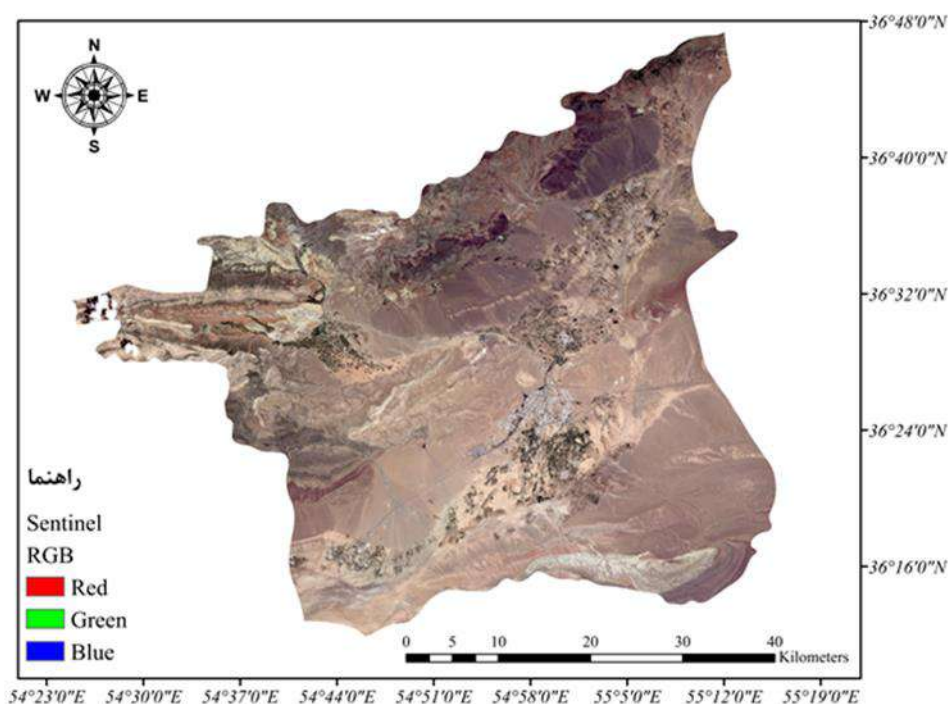
منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی شهرستان شاهرود، استان سمنان واقع شده است. ناحیه‌ای که از مرز شهر دامغان آغاز می‌شود و تا مرز استان گلستان امتداد دارد. این منطقه در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز شرقی قرار گرفته و گذرگاه طبیعی میان نواحی خشک مرکزی ایران و مناطق مرطوب‌تر شمالی کشور به شمار می‌رود. از نظر موقعیت جغرافیایی، این بخش از شهرستان شاهرود از شمال با استان گلستان، از شرق با خراسان شمالی، از جنوب با نواحی مرکزی شهرستان شاهرود، و از غرب با شهرستان دامغان هم‌مرز است. بر خلاف بخش‌های مرکزی و جنوبی شاهرود که دارای اقلیم خشک و نیمه‌بیابانی هستند، نواحی شمالی این شهرستان به‌ویژه در محدوده‌های کوهستانی و جنگلی مجاور استان گلستان از آب‌وهوایی نسبتاً معتدل‌تر و مرطوب‌تر برخوردارند. این تفاوت اقلیمی، باعث افزایش تنوع زیستی و توانمندی کشاورزی در منطقه شده و امکان کشت محصولات باغی متنوع‌تری را فراهم ساخته است. همچنین، پوشش گیاهی طبیعی، مراتع کوهپایه‌ای، و جریان‌های سطحی فصلی در این ناحیه به مراتب غنی‌تر از نواحی خشک‌تر جنوب شهرستان است. شاهرود به واسطه تنوع اقلیمی و جغرافیایی خود، یکی از مهم‌ترین مناطق استان سمنان در زمینه کشاورزی و تولید محصولات باغی به شمار می‌آید و نقش قابل توجهی در تأمین بخشی از نیازهای غذایی استان و کشور ایفا می‌کند. موقعیت دقیق منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳ الف و ب)، مدل رقومی ارتفاع و تصویر ماهواره‌ای سنتینل منطقه مورد مطالعه بیانگر ناهمواری‌های چشمگیر و تنوع کاربری اراضی در شمال شهرستان شاهرود هستند. اختلاف ارتفاع از حدود ۱۰۸۳ تا ۳۸۹۰ متر نشان‌دهنده توپوگرافی متنوع از نواحی کوهستانی مرتفع در شمال تا دشت‌های پست در جنوب است. این شرایط سبب شکل‌گیری اقلیم‌های متفاوت، پوشش گیاهی متنوع و منابع آب سطحی غنی‌تر در بخش‌های شمالی شده است. همچنین، داده‌های ماهواره‌ای به‌خوبی پراکنش سکونتگاه‌ها، اراضی کشاورزی و مناطق تحت کشت را در کنار عرصه‌های مرتعی و کوهستانی نشان می‌دهند که نقش مهمی در فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی منطقه ایفا می‌کنند.



شکل ۲. نقشه ایران و منطقه مورد مطالعه



شکل ۳ الف. تصویر ماهواره‌ای و مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳ ب. تصویر ماهواره‌ای و مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه

۲. داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از داده‌های ماهانه ۶ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. یکی از این ایستگاه‌ها (ایستگاه سینوپتیک شاهرود) تحت نظارت سازمان هواشناسی کشور بوده و پنج ایستگاه دیگر توسط وزارت نیرو اداره می‌شوند. همچنین، برای بررسی متغیر دما از داده‌های ۳ ایستگاه استفاده شده است که یکی از آن‌ها ایستگاه سینوپتیک شاهرود و دو ایستگاه دیگر متعلق به وزارت نیرو هستند. ایستگاه‌های موردنظر به دلیل برخورداری از دوره آماری کامل و مستمر بیست‌ساله در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ انتخاب شده‌اند. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

کد ایستگاه	UTMx	UTMy	نوع ایستگاه	مؤلفه
۴۷-۰۳۳	۲۸۹۴۸۷/۹	۴۰۳۹۳۲۵/۲	کلیماتولوژی	بارش، دما
۴۷-۰۴۶	۳۲۰۵۶۶/۹	۴۰۲۵۰۲۶/۷	کلیماتولوژی	بارش، دما
۴۰-۷۳۹	۳۱۴۳۲۵/۲	۴۰۲۸۱۹۸/۲	سینوپتیک	بارش، دما
۴۷-۰۴۴	۳۱۹۲۴۰/۲	۴۰۳۷۹۱۰/۸	کلیماتولوژی	بارش
۴۷-۲۰۶	۳۱۴۱۳۳/۹	۴۰۵۰۵۲۷/۲	کلیماتولوژی	بارش
۴۷-۹۳۶	۲۹۱۸۴۸/۲	۴۰۲۸۱۹۸/۲	کلیماتولوژی	بارش

به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم در محدوده مورد مطالعه از ۳ مدل مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC استفاده گردید. این مدل توسط سایر محققین مانند درزی (۱۴۰۴) مورد استفاده قرار گرفت. خروجی این مدل‌ها برای دوره زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ (دوره پایه)، ۲۰۱۵-۲۰۳۴ (آینده نزدیک) و ۲۰۳۵-۲۰۵۶ (آینده دور) تحت دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شدند. جدول (۲) خلاصه‌ای از فرضیات مرتبط با بخش‌های اقتصاد و سبک زندگی، همچنین سیاست‌ها و نهادهای سناریوهای اشتراکی جامعه را ارائه می‌دهد. در این جدول، گروه‌بندی کشور بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد، متوسط

درآمد و پردرآمد صورت گرفته است. در بخش اقتصاد و سبک زندگی، عوامل مختلفی همچون رشد اقتصادی، نابرابری، تجارت بین‌المللی، جهانی‌سازی و مصرف و رژیم غذایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش سیاست‌ها و نهادها، موضوعاتی نظیر همکاری بین‌المللی، سیاست‌های زیست‌محیطی، جهت‌گیری سیاستی و اثربخشی نهادها مورد توجه قرار گرفته است. این جدول به بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های بین سناریوهای مختلف در این زمینه‌ها می‌پردازد و دیدگاه‌های مختلفی را در مورد چگونگی تأثیرگذاری این عوامل بر جوامع ارائه می‌دهد. جدول (۳) خلاصه‌ای از فرضیات مرتبط با بخش‌های فناوری و همچنین محیط‌زیست و منابع طبیعی در سناریوهای اشتراکی جامعه را ارائه می‌دهد. در این جدول، گروه‌بندی کشورها بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد، متوسط درآمد و پردرآمد صورت گرفته است. در بخش فناوری، عوامل مختلفی همچون توسعه، انتقال، تغییرات فناوری انرژی، شدت کربن و شدت انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش محیط‌زیست و منابع طبیعی، محدودیت‌های سوخت فسیلی، محیط‌زیست، استفاده از زمین و کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۲. اطلاعات مدل‌های سناریو ششم مورد استفاده در پژوهش

نام مدل	مؤسسه	رزولوشن	پردازش	سناریوهای شبیه‌سازی شده
CMCC-EMS2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Italy)	۲۸۸×۱۹۲	rlilp1fl	SSP2-4.5 SSP5-8.5
CNRM-CM6-1-HR	Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques, and Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (France)	۷۲۰×۳۶۰	rlilp1fl	SSP2-4.5 SSP5-8.5
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	۱۹۲×۹۶	rlilp1fl	SSP2-4.5 SSP5-8.5

جدول ۳. خلاصه‌ای از فرضیات مربوط به بخش‌های اقتصاد و سبک زندگی و سیاست‌ها و نهادهای سناریوهای اشتراکی جامعه (SSPs) گروه‌بندی کشورهای اشاره شده در جدول بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد (LIC)، متوسط درآمد (MIC) و پردرآمد (HIC) صورت گرفته است.

SSP element	SSP2	SSP5
Economy & lifestyle		
Growth (per capita)	Medium, uneven	High
Inequality	Uneven moderate reductions across and within countries	Strongly reduced, especially across countries
International trade	Moderate	High, with regional specialization in production
Globalization	Semi-open globalized economy	Strongly globalized, increasingly connected
Consumption & Diet	Material-intensive consumption, medium meat consumption	Materialism, status consumption, tourism, mobility, meat-rich diets
Policies & institutions		
International Cooperation	Relatively weak	Effective in pursuit of development goals, more limited for envt. goals
Environmental Policy	Concern for local pollutants but only moderate success in implementation	Focus on local environment with obvious benefits to well-being, little concern with global problems
Policy orientation	Weak focus on sustainability	Toward development, free markets, human capital
Institutions	Uneven, modest effectiveness	Increasingly effective, oriented toward fostering competitive markets

جدول ۴. خلاصه‌ای از فرضیات مربوط به بخش‌های فناوری و محیط‌زیست و منابع طبیعی در سناریوهای اشتراکی جامعه (SSPs). گروه‌بندی کشورهای ذکر شده در جدول بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد (LIC)، متوسط درآمد (MIC) و پردرآمد (HIC) انجام شده است.

SSP element	SSP2	SSP5
Technology Development Transfer Energy tech change Carbon intensity Energy intensity	Medium, uneven Slow Some investment in renewables but continued reliance on fossil fuels Medium Uneven, higher in LICs	Rapid Rapid Directed toward fossil fuels; alternative sources not actively pursued High High
Environment & natural resources Fossil constraints Environment Land Use Agriculture	No reluctance to use unconventional resources Continued degradation Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation Medium pace of tech change in ag sector; entry barriers to ag markets reduced slowly	None Highly engineered approaches, successful management of local issues Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation Highly managed, resource-intensive; rapid increase in productivity

۳. شاخص‌های ارزیابی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی داده‌ها در دوره تاریخی، از سه شاخص آماری MAE ، R^2 و KGE استفاده شد. انتخاب این شاخص‌ها باهدف سنجش جنبه‌های مختلف ارزیابی از جمله میزان همبستگی، دقت مطلق و کارایی کلی مدل صورت گرفت تا تحلیلی جامع از رفتار مدل ارائه شود. روابط ریاضی این شاخص‌ها به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و مقدار بهینه هر یک، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در پژوهش

واحد	بهینه، بیشینه، کمینه	رابطه ریاضی	شاخص ارزیابی
-	0, 1, 1	$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_o - \bar{P}_o)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_o - \bar{P}_o)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right]^2$	ضریب تعیین
بارش (میلیمتر) دما (سانتی‌گراد)	0, ∞, 0	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - P_o }{n}$	میانگین خطای مطلق
-	-∞, 1, 1	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}$	کارایی کلینگ-گوپتا
		$r: \text{Pearson correlation coefficient}$ $\beta = \mu_s / \mu_o$ $\gamma = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}$	

برای ریزمقیاس‌نمایی و تبدیل خروجی بزرگ‌مقیاس مدل‌های AOGCM به مقادیر ماهانه، از روش تغییر عامل دلتا (Delta Change Factor method) استفاده گردید. در این روش، تغییرات میانگین مدل در دوره آینده نسبت به دوره گذشته محاسبه شده و سپس این تغییرات به داده‌های مشاهداتی دوره گذشته اعمال می‌شوند؛ به گونه‌ای که برای متغیرهای غیر نسبتی مانند دما، اختلاف میانگین‌ها به داده‌های مشاهداتی افزوده و برای متغیرهای نسبتی مانند بارش، نسبت تغییر ضرب می‌شود. معادلات روش تغییر عامل دلتا برای بارش و دما به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آمده است.

$$P_{\text{future}} = P_{\text{observed}} \times \frac{\bar{P}_{\text{model, future}}}{\bar{P}_{\text{past, model}}} \quad (1)$$

$$T_{\text{future}} = T_{\text{observed}} + (\bar{T}_{\text{model, future}} - \bar{T}_{\text{model, past}}) \quad (2)$$

باتوجه به ماهیت پیچیده و چندبعدی ارزیابی مدل‌های اقلیمی، استفاده از چندین شاخص ارزیابی با ماهیت متنوع برای تحلیل دقیق عملکرد مدل‌ها ضروری است. اما یکپارچه‌سازی نتایج این شاخص‌ها و انتخاب بهترین مدل نیازمند به‌کارگیری روش‌های چندمعیاره پیشرفته است که بتوانند به طور هم‌زمان و متعادل تمامی شاخص‌ها را در نظر گرفته و با تحلیل درست و دقیق، فرایند رتبه‌بندی را انجام دهد. به همین منظور، تکنیک نوآورانه فرصت ازدست‌رفته بر مبنای فاصله در مختصات قطبی (OPLO-POCOD) به عنوان روشی کارآمد و مؤثر برای تلفیق شاخص‌های متعدد و انتخاب بهینه‌ترین مدل CMIP6 در این پژوهش به کار گرفته شد.

روش اپلو-پوکد (OPLO-POCOD) یک رویکرد نوین در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که با ترکیب مفهوم فرصت ازدست‌رفته و محاسبه فاصله در مختصات قطبی ارائه شده است. این تکنیک با ایجاد درکی دقیق‌تر از میزان فرصت‌های ازدست‌رفته هر گزینه در مقایسه با بهترین حالت، امکان ارزیابی منصفانه‌تر و کارآمدتر گزینه‌ها را فراهم می‌کند. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به توانایی آن در تلفیق داده‌های مثبت و منفی، در نظر گرفتن وزن معیارها، و نمایش جایگاه نسبی گزینه‌ها بر اساس میزان فرصت به‌دست‌آمده اشاره کرد. بدین ترتیب، OPLO-POCOD ابزاری قدرتمند برای تحلیل تصمیمات پیچیده در حوزه‌های مختلف مدیریت و اقتصاد محسوب می‌شود.

۴. تکنیک اپلو-پوکد (OPLO-POCOD)

تکنیک فرصت ازدست‌رفته بر مبنای فاصله در مختصات قطبی یک مفهوم اساسی در اقتصاد و مدیریت است که می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تعیین ارزش مرتبط با اطلاعات استفاده شود. این تکنیک اولین بار توسط شیخ و سنفی در سال ۲۰۲۴ معرفی گردید (شیخ و سنفی، ۲۰۲۴). این تکنیک بر مبنای ایده اساسی فرصت ازدست‌رفته استوار است که با سنجش فرصت ازدست‌رفته هر گزینه می‌توان جایگاه گزینه‌ها را نسبت به بهترین وضعیت بر اساس فاصله در فضای مختصات قطبی نشان داد.

الگوریتم اجرایی این تکنیک به شرح ذیل است:

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم اولیه.

ماتریس تصمیم اولیه X متشکل از m گزینه و n معیار، بر اساس اطلاعات دریافتی از تصمیم‌گیرندگان ایجاد می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mj} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1 \text{ to } m; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (1)$$

گام ۲. تشکیل ماتریس فرصت ازدست‌رفته (OPL).

در این مرحله، فرصت ازدست‌رفته گزینه‌ها برای همه معیارها به دست می‌آید. اختلاف هر مقدار در یک ستون با بیشترین مقدار همان ستون (در صورتی که ماهیت معیار سود یا مثبت باشد) و اختلاف هر مقدار در یک ستون با کمترین مقدار همان ستون (در صورتی که ماهیت معیار زیان یا منفی باشد).

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & & c_j & & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mj} & \cdots & X_{mn} \end{matrix} & , & i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \end{matrix} \quad (2)$$

$X_{i1}^* \quad X_{ij}^* \quad X_{in}^*$ بهترین مقدار

بهترین مقدار در معیارهای مثبت حداکثر و برای معیارهای منفی حداقل است.

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & & c_j & & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_{11-x_1}^* & \cdots & X_{1j-x_j}^* & \cdots & X_{1n-x_n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1-x_1}^* & \cdots & X_{ij-x_j}^* & \cdots & X_{in-x_n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1-x_1}^* & \cdots & X_{mj-x_j}^* & \cdots & X_{mn-x_n}^* \end{matrix} & , & i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \end{matrix} \quad (3)$$

$$opl = |x_{ij} - x_{best}| \quad \text{for } \forall x_{ij} \quad i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \quad (4)$$

بر اساس معادله (۲) تا (۴) ماتریس OPL با استفاده از فرصت‌های ازدست‌رفته به دست آمده، تشکیل می‌شود.

$$OPL = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & & c_j & & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} opl_{11} & \cdots & opl_{1j} & \cdots & opl_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ opl_{i1} & \cdots & opl_{ij} & \cdots & opl_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ opl_{m1} & \cdots & opl_{mj} & \cdots & opl_{mn} \end{matrix} & , & i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \end{matrix} \quad (5)$$

گام ۳. تشکیل ماتریس زوج مرتبی

ماتریس زوج مرتبی بر اساس عناصر ماتریس تصمیم اولیه و ماتریس فرصت ازدست‌رفته تشکیل می‌شود.

$$X_{pair_{ij}} = (x_{ij}, opl_{ij}), \quad i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n.$$

$$X_{pair} = \begin{bmatrix} (x_{11}, opl_{11}) & \dots & (x_{1j}, opl_{1j}) & \dots & (x_{1n}, opl_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{i1}, opl_{i1}) & \dots & (x_{ij}, opl_{ij}) & \dots & (x_{in}, opl_{in}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{m1}, opl_{m1}) & \dots & (x_{mj}, opl_{mj}) & \dots & (x_{mn}, opl_{mn}) \end{bmatrix}_{m \times n} \quad i=1 \text{ to } m ; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (6)$$

گام ۴. تشکیل ماتریس فاصله در فضای قطبی.

در این گام فاصله هر نقطه از بهترین مقدار برای آن معیار محاسبه شود. در اینجا، یک نقطه (x_{ij}, opl_{ij}) است و نقطه دیگر بهترین مقدار معیار مربوطه به صورت $(x_{best}, opl_{x_{best}})$ است. لازم بذکر است که فرصت ازدست رفته برای بهترین مقدار، همواره صفر است. در فضای مختصات فاصله بین دو نقطه بر اساس معادله زیر محاسبه می شود.

$$d_{ij} = \sqrt{A_{ij}^2 + B_{ij}^2 - 2A_{ij}B_{ij} \cos(\theta_2 - \theta_1)},$$

$$A = (x_{ij}, opl_{ij}) \text{ and } B = (x_{best}, opl_{x_{best}}) \text{ and } (A, \theta_1) \text{ and } (B, \theta_2). \quad (7)$$

$$A.B = \|A\| \|B\| \cos \theta \quad (8)$$

کسینوس زاویه دو بردار طبق معادله (۹) بدست می آید.

$$\cos(\theta_2 - \theta_1) = \frac{A.B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (9)$$

در نهایت باتوجه به مقادیر به دست آمده، ماتریس فاصله D تشکیل می شود.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i1} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mj} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1 \text{ to } m ; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (10)$$

گام ۵. تشکیل ماتریس فاصله وزنی.

از آنجاکه ارزش معیارها ممکن است یکسان نباشند، لذا وزن هر معیار بایستی مدنظر قرار گیرد. ماتریس فاصله وزنی D_w بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\bar{d}_{ij} = w_j * d_{ij} \quad (11)$$

$$D_w = \begin{bmatrix} \bar{d}_{11} & \dots & \bar{d}_{1j} & \dots & \bar{d}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{d}_{i1} & \dots & \bar{d}_{ij} & \dots & \bar{d}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{d}_{m1} & \dots & \bar{d}_{mj} & \dots & \bar{d}_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1 \text{ to } m; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (12)$$

گام ۶: محاسبه فاصله کل.

در این گام فاصله کل برای هر گزینه بر اساس همه معیارها با جمع مقادیر هر سطر در ماتریس فاصله وزنی طبق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \bar{d}_{ij}, \quad i=1 \text{ to } m. \quad (13)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^m S_i \quad (14)$$

گام ۷. محاسبه درجه فرصت ازدست‌رفته و درصد فرصت به‌دست‌آمده.

درجه فرصت ازدست‌رفته (DOL) و درصد فرصت به‌دست‌آمده (POA) هر گزینه بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$(DOL_i) = \frac{S_i}{S_T}, \quad (15)$$

در اینجا

$$\sum_{i=1}^m DOL_i = 1.$$

$$(POA_i) = 1 - DOL_i. \quad (16)$$

بدیهی است که DOL بین صفر و یک است. فرصت ازدست‌رفته صفر به این معناست که گزینه موردنظر در تمامی معیارها بهترین بوده است و هر چه این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، به این معناست که فرصت ازدست‌رفته کمتری برای گزینه وجود دارد و رتبه بالاتری را در ارزیابی نسبت به سایرین دارا است و در مورد POL بر عکس است. هر چه به عدد ۱۰۰ نزدیک باشد به معنای کسب موفقیت بالاتر و فرصت کسب شده بهتر است

یافته‌های پژوهش

در دوره تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴، میانگین سالانه دمای منطقه برابر با ۱۴/۰۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. در این بازه، ۱۲ سال دما بالاتر از میانگین کل و ۸ سال دما پایین‌تر از میانگین کل قرار گرفته است، با بیشترین میانگین سالانه دما در سال ۲۰۱۰ برابر با ۱۴/۸۹ درجه و کمترین آن در سال ۲۰۱۲ برابر با ۱۳/۴۹ درجه. میانگین سالانه بارش در همین دوره برابر با ۱۹۸/۹ میلی‌متر بوده است که ۱۱ سال بارش کمتر از میانگین کل و ۹ سال بارش بالاتر از میانگین کل ثبت شده است. کمترین مقدار بارش مربوط به سال ۱۹۹۹ با ۱۱۲/۲ میلی‌متر و بیشترین آن مربوط به سال ۲۰۱۱ با ۳۲۰/۷ میلی‌متر بوده است.

۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و دما با استفاده از روش OPLO-POCOD

در جدول (۶) و (۷) عملکرد سه مدل منتخب از مجموعه مدل‌های اقلیمی CMIP6 شامل CMCC-EMS2، CNRM- و CM6-1-HR و MPI-ESM1-2-LR در شبیه‌سازی بارش و دما منطقه مورد مطالعه ارائه شد. برای این منظور، از سه شاخص

آماري متداول شامل ضريب تعيين (R^2)، ميانگين قدرمطلق خطا (MAE) و ضريب کارايي نش-ساتکليف (KGE) استفاده شد. جدول زير مقادير اين شاخص ها را براي هر مدل ارائه مي دهد.

جدول ۶. عملکرد مدل های اقليمي در شبیه سازی بارش تحت شاخص آماری

مدل اقليمي (GCM)	KGE	MAE	R^2
CMCC-EMS2	۰/۳۸۱	۱۲/۲۵۴	۰/۱۸۸
CNRM-CM6-1-HR	۰/۱۲۵	۱۶/۳۷۹	۰/۱۲۶
MPI-ESM1-2-LR	۰/۱۲۸	۱۲/۸۲۴	۰/۱۲۹

جدول ۷. عملکرد مدل های اقليمي در شبیه سازی دما تحت شاخص آماری

مدل اقليمي (GCM)	KGE	MAE	R^2
CMCC-EMS2	۰/۷۳۳	۳/۱۶۱	۰/۹۲۸
CNRM-CM6-1-HR	-۰/۰۰۱	۵/۵۰۵	۰/۹۱۳
MPI-ESM1-2-LR	۰/۶۰۱	۴/۹۴۲	۰/۹۴۱

مدل CMCC-EMS2 در هر سه شاخص آماری در شبیه سازی بارش عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این مدل دارای بالاترین مقدار R^2 با مقدار ۰/۱۸۸ است که نشان دهنده عملکرد بهتر آن در مقایسه به دو مدل دیگر در تبیین تغییرات داده های مشاهده شده است. همچنین، کمترین مقدار MAE با مقدار ۱۲/۲۵۴ میلیمتر و بیشترین مقدار KGE ۰/۳۸۱ نیز به این مدل تعلق دارد. بر این اساس، CMCC-EMS2 به عنوان بهترین مدل در شبیه سازی بارش منطقه انتخاب شد. مدل MPI-ESM1-2-LR از نظر دو شاخص R^2 و MAE، مقادیری بسیار نزدیک به مدل برتر یعنی CMCC-EMS2 دارد به ترتیب ۰/۱۲۹ در مقابل ۰/۱۸۸ برای R^2 و ۱۲/۸۲۴ میلیمتر در مقابل ۱۲/۲۵۴ میلیمتر برای MAE. این شباهت نشان می دهد که این مدل نیز توان نسبتاً خوبی در بازتولید روند کلی و میانگین بارش دارد. با این حال، عملکرد ضعیف تر آن در شاخص KGE که ترکیبی از همبستگی، بایاس و نوسانات است، موجب می شود که دقت کلی آن نسبت به CMCC-EMS2 پایین تر ارزیابی شود. در مقابل، مدل CNRM-CM6-1-HR ضعیف ترین عملکرد را در میان سه مدل مورد بررسی داشته است. این مدل دارای کمترین مقدار R^2 ، بیشترین مقدار MAE و پایین ترین مقدار KGE است. به طور کلی، نتایج این مدل نشان می دهد که توانایی کمتری در بازنمایی ویژگی های آماری بارش منطقه دارد. در بخش دما نیز مدل CMCC-EMS2 با مقدار MAE برابر با ۳/۱۶۱ سانتی گراد و KGE برابر با ۰/۷۳۳ بهترین عملکرد را در میان مدل های مورد بررسی داشته است. این مقادیر نشان می دهند که این مدل هم کمترین خطای مطلق را داشته و هم بالاترین تعادل بین همبستگی، بایاس و واریانس را برقرار کرده است. مدل MPI-ESM1-2-LR با ضريب تعيين R^2 برابر با ۰/۹۴۱ بالاترین مقدار این شاخص را داشته، اما از نظر MAE و KGE نسبت به مدل CMCC-EMS2 عملکرد ضعیف تری دارد. مدل CNRM-CM6-1-HR با MAE برابر با ۵/۵۰۵ سانتی گراد و مقدار KGE برابر با منفی ۰/۰۰۱ ضعیف ترین عملکرد را در بازسازی دما نشان داده است. در مجموع، مدل های CMCC-EMS2 و MPI-ESM1-2-LR به ترتیب بهترین و قابل قبول ترین عملکرد را داشته اند، در حالی که مدل CNRM-CM6-1-HR از دقت و کیفیت شبیه سازی نسبتاً پایینی برخوردار است. حال به منظور شناسایی بهترین مدل اقليمي از روش نوآورانه OPLO-POCOD استفاده گردید. روش یک تکنیک تصمیم گیری چندمعیاره است که بر پایه حداقل سازی زیان فرصت (Opportunity Loss) و فاصله کمتر در مختصات قطبی عمل می کند. که ابتدا ماتریس تصمیم گیری را نرمال سازی کرده، سپس ماتریس زیان فرصت را تشکیل می دهد و سپس با محاسبه فاصله قطبی بین گزینه ها و بهترین حالت، به ارزیابی وزنی گزینه ها می پردازد، در نهایت، گزینه ها بر اساس کمترین زیان فرصت و بیشترین درصد دستیابی به فرصت رتبه بندی می شوند. جدول (۸)، فرصت از دست رفته هر مدل را به تفکیک شاخص ها نشان می دهد، به طوری که می توان عملکرد هر مدل در هر شاخص را به صورت جداگانه مشاهده کرد. در مقابل، جدول ۹، فرصت از دست رفته را از دیدگاه شاخص ها ارائه می کند و میزان فرصت از دست رفته هر مدل را برای هر

شاخص مشخص می‌سازد. بر اساس شاخص فرصت ازدست‌رفته در روش OPLO-POCOD، مدل CMCC-EMS2 بهترین عملکرد را دارد زیرا کمترین مقدار فرصت ازدست‌رفته را برای بارش برابر ۰/۲۹۵۴۷ و برای دما برابر ۰/۲۳۳۷۶ ثبت کرده است. این مقدار کمتر نشان‌دهنده دقت بالاتر و خطای کمتر این مدل نسبت به سایر مدل‌هاست. مدل MPI-ESM1-2-LR با فرصت ازدست‌رفته ۰/۳۱۴۶۳ برای بارش و ۰/۳۴۸۸۲ برای دما در رتبه دوم قرار گرفته است که نشان می‌دهد دقت آن نسبت به مدل CMCC-EMS2 پایین‌تر است. مدل CNRM-CM6-1-HR با بیشترین فرصت ازدست‌رفته برای بارش برابر ۰/۳۸۹۹۰ و برای دما برابر ۰/۴۲۷۴۲ در جایگاه سوم است و عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دو مدل دیگر دارد؛ بنابراین، از نظر شاخص فرصت ازدست‌رفته، بهترین مدل برای شبیه‌سازی بارش و دما CMCC-EMS2 است، سپس MPI-ESM1-2-LR و در نهایت CNRM-CM6-1-HR قرار می‌گیرد.

جدول ۸. نتایج ارزیابی و رتبه‌بندی با استفاده از روش OPLO-POCOD

رتبه	فرصت ازدست‌رفته	جمع	R ²	MAE	KGE	مدل اقلیمی (GCM)	
۱	۰/۲۹۵۴۷	۱	۰/۰۵۹۸	۰/۸۹۴۷	۰/۰۴۵۵	CMCC-EMS2	بارش
۲	۰/۳۸۹۹۰	۱	۰/۰۴۸۷	۰/۹۰۲۵	۰/۰۴۸۸	CNRM-CM6-1-HR	
۳	۰/۳۱۴۶۳	۱	۰/۰۶۰۲	۰/۸۷۹۵	۰/۰۶۰۳	MPI-ESM1-2-LR	
۱	۰/۲۳۳۷۶	۱	۰/۰۲۱۱	۰/۹۰۰۵	۰/۰۷۸۴	CMCC-EMS2	دما
۳	۰/۴۲۷۴۲	۱	۰/۰۱۳۵	۰/۸۳۳۳	۰/۱۵۴۲	CNRM-CM6-1-HR	
۲	۰/۳۴۸۸۲	۱	۰/۰۱۱۱	۰/۹۱۳۷	۰/۰۷۵۲	MPI-ESM1-2-LR	

جدول ۹. فرصت ازدست‌رفته بر اساس شاخص‌های ارزیابی

R ²	MAE	KGE	مدل اقلیمی (GCM)	
۰/۳۱۸	۰/۲۹۶	۰/۲۶۲	CMCC-EMS2	بارش
۰/۳۴۲	۰/۳۹۴	۰/۳۷۰	CNRM-CM6-1-HR	
۰/۳۴	۰/۳۱۰	۰/۳۶۸	MPI-ESM1-2-LR	
۰/۳۲۹	۰/۲۳۰	۰/۱۶	CMCC-EMS2	دما
۰/۴۰۱	۰/۴۰۶	۰/۶	CNRM-CM6-1-HR	
۰/۲۷۰	۰/۳۶۴	۰/۲۴	MPI-ESM1-2-LR	

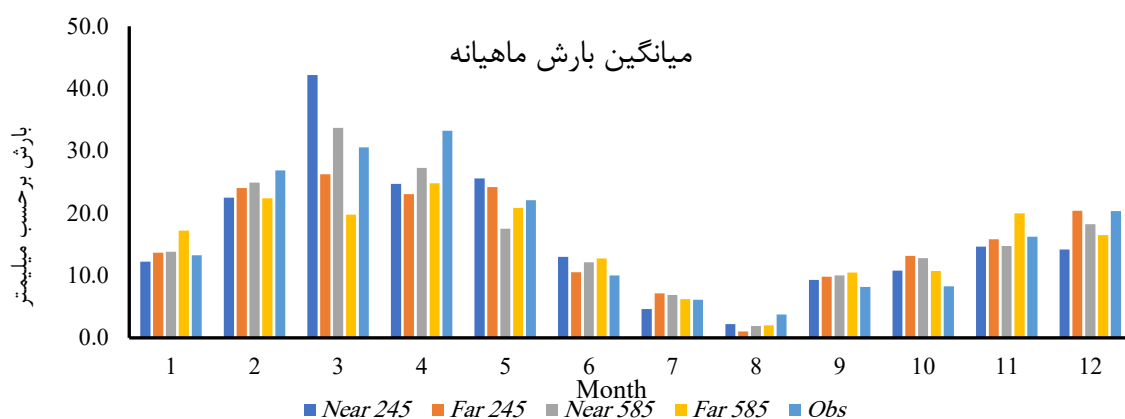
بنابراین، باتوجه به نتایج حاصل از روش OPLO-POCOD و عملکرد برتر مدل اقلیمی CMCC-EMS2 از نظر شاخص فرصت ازدست‌رفته، از این مدل برای پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. این پیش‌بینی‌ها برای دو بازه زمانی آینده شامل دوره آینده نزدیک (۲۰۱۵ تا ۲۰۳۴) و دوره آینده دور (۲۰۳۵ تا ۲۰۵۶) و تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شد.

۲. بارش

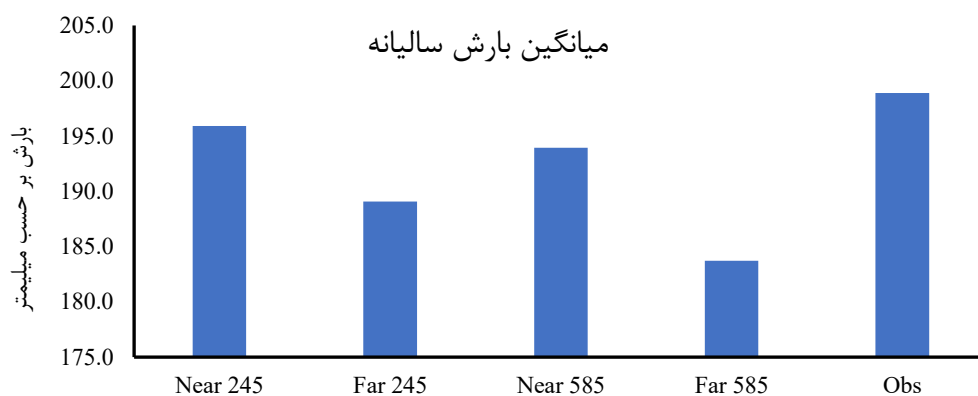
بر اساس داده‌های حاصل از مدل‌های اقلیمی CMIP6 و نمودارهای ارائه‌شده (شکل‌های (۴ تا ۷) و جدول (۱۰)، تغییرات بارش منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و آینده دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶) تحت دو سناریوی انتشاراتی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها و در هر دو بازه زمانی، میانگین بارش سالانه نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) کاهش یافته است. این کاهش، هرچند لازم به ذکر است که الگوی بارش و پراکنش بارش در فصول مختلف سال دچار تغییر گردیده است خود بیانگر اثرات فراگیر تغییر اقلیم بر الگوی بارش منطقه است. روند کلی نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه در تمامی سناریوهای آینده نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) کاهش یافته است. مقدار بارش سالانه در دوره پایه برابر با ۱۹۸/۹ میلی‌متر بوده است. در دوره آینده نزدیک، این مقدار به حدود ۱۹۴ تا ۱۹۵ میلی‌متر و در دوره آینده دور به ۱۸۴ تا ۱۸۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد. شدیدترین افت بارش مربوط به سناریوی SSP5-8.5 در

افق دور است که از نظر اقلیمی نشان دهنده افزایش ریسک خشکسالی در بلندمدت است. این کاهش کلی، گرچه مهم است، اما آنچه اهمیت بیشتری دارد، نحوه توزیع نابرابر آن در ماه ها و فصول مختلف سال است. در بررسی تغییرات فصلی بارش می توان دریافت که مجموع میزان بارش کاهشی است، اما این کاهش در طول سال به صورت یکنواخت توزیع نشده و رفتار بارش در هر فصل ویژگی های خاص خود را دارد. فصل زمستان که هم اکنون پربارش ترین دوره سال است و نقشی حیاتی در تأمین منابع آبی سطحی و تغذیه آبخوان ها ایفا می کند، در سناریوهای آینده رفتار پیچیده ای نشان می دهد. در آینده نزدیک، دو سناریو مورد بررسی حتی افزایش اندکی در بارش زمستانه را پیش بینی می کنند که می تواند حاصل نوسانات طبیعی اقلیم باشد. اما در دوره آینده دور، هر دو سناریو کاهش قابل توجهی را نشان می دهند و به ویژه در سناریوی پر انتشار SSP5-8.5، کاهش ۱۶ درصدی در بارش زمستانی هشداردهنده است. این کاهش در مهم ترین فصل سال می تواند تهدیدی جدی برای امنیت آبی و برنامه ریزی منابع باشد. در فصل بهار که معمولاً دومین دوره بارش خیز منطقه محسوب می شود و روند تغییرات بسیار یکپارچه تر و مشخص تر است، تمامی سناریوهای آینده کاهش بارش را در این فصل نشان می دهند. میزان این کاهش بین ۳ تا ۱۳ درصد متغیر است که بسته به سناریو و بازه زمانی تغییر می کند. در بررسی فصل پاییز که به عنوان دوره گذار به فصل های مرطوب شناخته می شود، نتایج نشان می دهند که در اغلب سناریوهای آینده، به ویژه در بازه بلندمدت، بارش این فصل اندکی افزایش می یابد. تنها در سناریوی آینده نزدیک با انتشار پایین، کاهش بارش دیده می شود. این رفتار می تواند بیانگر نوعی جابه جایی در رژیم بارندگی باشد. در فصل تابستان، همان طور که انتظار می رود، بارش ها در سطح بسیار پایین باقی می ماند. این فصل همواره خشک ترین دوره سال بوده و نتایج مدل ها نیز نشان می دهد که در آینده تغییری چشمگیر در این وضعیت رخ نخواهد داد. در برخی سناریوها حتی افزایش های بسیار جزئی مشاهده شده، اما این تغییرات آن قدر کوچک هستند که نمی توانند تغییری اساسی در وضعیت اقلیمی تابستان ایجاد کنند؛ بنابراین تابستان خشک خواهد ماند. در نهایت با تحلیل شکل (۴) مشخص می شود، تحلیل داده ها فراتر از یک نتیجه گیری ساده مبنی بر خشک تر شدن برخی از فصول سال است. ما شاهد دگرگونی در رژیم و زمان بندی بارش هستیم؛ زمستان ها و بهارهای خشک تر همراه با بارش کمتر و افزایش جزئی بار در فصول پاییز و تابستان. این تغییر در تقویم هیدرولوژیکی منطقه، چالشی عمیق برای تمامی بخش های وابسته به آب، از کشاورزی و صنعت گرفته تا اکوسیستم های طبیعی که طی هزاران سال با ریتم گذشته سازگار شده اند، ایجاد می کند؛ بنابراین، برنامه ریزی برای استراتژی های سازگاران، بازنگری در الگوهای کشت و مدیریت انعطاف پذیر منابع آب، دیگر یک انتخاب نیست، بلکه یک ضرورت فوری برای تضمین آینده پایدار منطقه است. یافته های این پژوهش با نتایج برخی از مطالعات صورت پذیرفته اخیر در ایران هم راستا است، برای مثال نادری^۱ (۲۰۲۵) در پژوهشی که با استفاده از مجموعه ۲۹ مدل CMIP6 در کل کشور صورت گرفت، نتایج نشان داد که بارش سالانه ایران در سناریو SSP2-4.5 حدود ۱۲-۲۴ درصد و در SSP5-8.5 حدود ۸-۲۴ درصد کاهش می یابد. وحدتifer و همکاران^۲ (۲۰۲۵) در پژوهشی به منظور بررسی تغییرات بارش در دو ناحیه غربی و شرقی استان مازندران با استفاده از پنج مدل CMIP6 تحت سناریوهای SSP2-2.6 و SSP5-8.5 نشان دادند که در آینده بلندمدت (دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰) میانگین بارش کاهش می یابد. به طور نمونه، در غرب مازندران تا حدود ۵۵/۷ میلی متر کاهش بارش و در شرق حدود ۳۱/۳ میلی متر کاهش بارش نسبت به دوره پایه پیش بینی شده است.

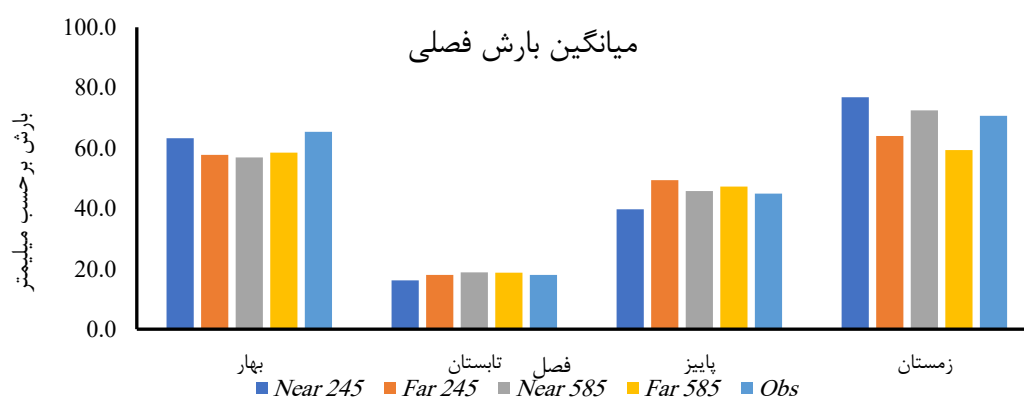
^۱ Naderi^۲ Vahdatifar et al



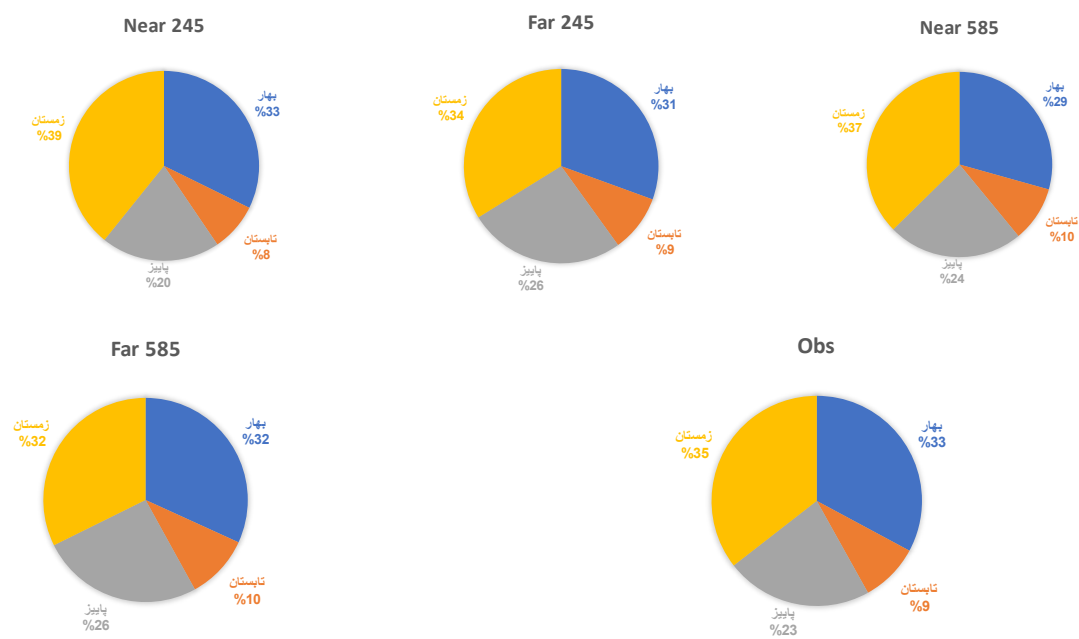
شکل ۴. میانگین بارش ماهیانه منطقه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۵. میانگین بارش سالیانه منطقه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۶. میانگین بارش فصلی منطقه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۷. میانگین سهم بارش هر فصل تحت سناریوهای مختلف در دوره های آبی در مقایسه با دوره پایه

جدول ۱۰. خلاصه‌ای از تغییر اقلیم بارش دوره آتی همراه با پیامدهای راهبردی در مقایسه با دوره پایه

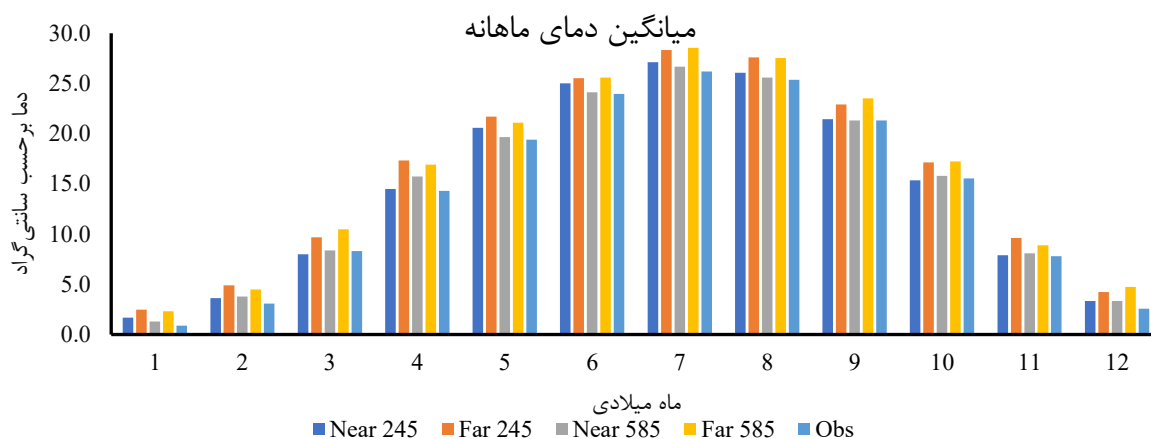
شاخص	دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴)	دوره آینده (بهترین/بدترین حالت)	تغییرات کلیدی	پیامدهای راهبردی
مجموع بارش سالانه	۱۹۸/۹ میلی‌متر	۱۸۴/۴ میلی‌متر (Far 5-8.5)	▼ کاهش ۱۴.۵ میلی‌متر (حدود ۷/۳٪)	کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی، تشدید نیاز به بازنگری مدیریت منابع آبی
بارش زمستان	۷۰/۷ میلی‌متر	۵۹/۴ میلی‌متر (Far 5-8.5)	▼ کاهش ۱۶٪ در بحرانی‌ترین سناریو	تهدید مستقیم برای تغذیه آبخوان‌ها، کاهش رواناب زمستانه
بارش بهار	۶۵/۳ میلی‌متر	۵۶/۹ میلی‌متر (Near 5-8.5)	▼ کاهش ۱۲/۹٪ در بحرانی‌ترین سناریو	تأثیر منفی بر کشاورزی بهار و رشد پوشش گیاهی طبیعی
بارش پاییز	۴۴/۹ میلی‌متر	۴۹/۳ میلی‌متر (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۱۰٪ در بحرانی‌ترین سناریو	جبران جزئی بارش ازدست‌رفته زمستان، بهبود شروع دوره مرطوب
بارش تابستان	۱۸/۱ میلی‌متر	۱۸/۸ میلی‌متر (Near 5-8.5)	▲ افزایش جزئی (۳/۹ درصد)، تغییر ناچیز	تابستان خشک باقی می‌ماند، با تغییرات اقلیمی ناچیز در این فصل
ماه با بیشترین کاهش بارش	اسفند (۳۰/۶ میلی‌متر)	۱۹/۸ میلی‌متر (Far 5-8.5)	▼ افت ۳۵٪ در پایان زمستان	تشدید خشکی در اسفند می‌تواند تأثیر منفی بر ذوب برف و رواناب بهاری داشته باشد
ماه با بیشترین افزایش بارش	اسفند (۳۰/۶ میلی‌متر)	۴۲/۲ میلی‌متر (Near 2-4.5)	▲ افزایش ۳۷/۹٪ در پایان زمستان	افزایش میزان بارش در ماه پایانی فصول زمستان و جبران کاهش باران زمستانی
توزیع فصلی بارش در آینده	۳۵٪ زمستان، ۳۳٪ بهار، ۲۳٪ پاییز، ۹٪ تابستان	۳۲٪ زمستان، ۳۲٪ بهار، ۲۶٪ پاییز، ۱۰٪ تابستان	▼ کاهش سهم زمستان و بهار، ▲ افزایش سهم پاییز	بازتوزیع رژیم بارش نیازمند تطابق در الگوهای کشاورزی و آبیاری است
تغییر بارش در سناریوی خوش‌بینانه (Near 2-4.5)	۱۹۵.۹ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۱/۵٪	علی‌رغم انتشار کمتر، روند خشکی ادامه دارد؛ اما شدید نیست	احتمال فرصت برای مدیریت پایدارتر در سناریوهای کم‌انتشار
تغییر بارش در سناریوی خوش‌بینانه (Far 2-4.5)	۱۸۹.۱ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۵٪	علی‌رغم انتشار کمتر، روند خشکی ادامه دارد؛ اما شدید نیست	احتمال فرصت برای مدیریت پایدارتر در سناریوهای کم‌انتشار
تغییر بارش در سناریوی بدبینانه (Near 5-8.5)	۱۹۳.۹ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۲/۴۹٪	اثر گرمایش جهانی شدیدتر در کاهش بارندگی در درازمدت نمایان می‌شود	نیاز به سازگاری بیشتر در سناریوهای پر انتشار و شدید
تغییر بارش در سناریوی بدبینانه (Far 5-8.5)	۱۸۴.۴ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۷/۳٪	اثر گرمایش جهانی شدیدتر در کاهش بارندگی در درازمدت نمایان می‌شود	نیاز به سازگاری بیشتر در سناریوهای پر انتشار و شدید

۳. دما

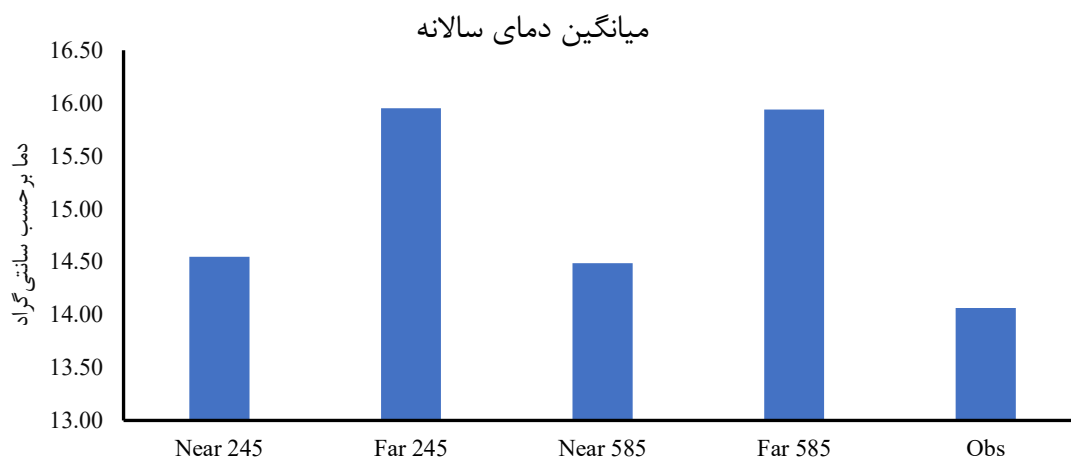
بر اساس داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6 شکل‌های (۸ تا ۱۰) و جدول (۱۱)، تغییرات دما در دوره آینده نزدیک برای دو سناریوی انتشاراتی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه (شهرستان شاهرود)، میانگین دمای ماهانه در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) افزایش یافته است. این افزایش در تمامی

دوره‌ها مشاهده می‌شود، اما الگوی فصلی آن متفاوت است. در سناریوی SSP2-4.5، بیشترین افزایش دما در ماه‌های سرد سال (دی، بهمن، اسفند) مشاهده شده و در برخی موارد حتی از سناریوی SSP5-8.5 نیز بیشتر بوده است. در سناریوی SSP5-8.5، افزایش دما در ماه‌های گرم (تیر، مرداد) بیشتر از سایر ماه‌ها بوده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در دوره آینده نزدیک، دو سناریو تفاوت قابل توجهی در برآورد افزایش دما ندارند و در برخی ماه‌ها حتی SSP2-4.5 دمای بالاتری نسبت به SSP5-8.5 نشان داده است. این پدیده می‌تواند به دلیل پاسخ خطی‌تر مدل‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، تأخیر در بروز اثرات کامل سناریوی انتشار، یا شرایط خاص منطقه‌ای باشد. در دوره آینده دور، هر دو سناریو همچنان روند افزایشی دما را نشان می‌دهند. با این حال میانگین افزایش دما در SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه، در بیشتر ماه‌ها بیشتر از SSP2-4.5 است، هرچند تفاوت‌ها همچنان محدود است. الگوی فصلی تغییر کرده؛ در SSP2-4.5 همچنان افزایش دمای زمستانه غالب است، در حالی که در SSP5-8.5 تابستان‌ها بیشترین گرمایش را نشان می‌دهند. این تفاوت نشانگر این است که الگوهای دما در فصول تحت سناریوهای اقلیمی متفاوت تغییر کرده است. به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات دما در سطح فصلی، میانگین دمای چهار فصل سال برای دوره مشاهداتی و دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و آینده دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶) تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شد (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد که در تمامی فصول، دمای هوا نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است، اما میزان این افزایش در بین سناریوها و فصول متفاوت است. در فصل تابستان، هر دو سناریو افزایش دمای قابل توجهی را نشان می‌دهند. سناریوی SSP5-8.5 به‌ویژه در دوره آینده دور افزایش دمای بیشتری نسبت به سایر حالات دارد که قابل انتظار است. این در حالی است که در زمستان، برخلاف انتظار، در هر دو دوره آینده، سناریوی SSP2-4.5 دمای بالاتری نسبت به SSP5-8.5 نشان داده است. در دو فصل بهار و پاییز نیز تغییرات نسبت به دوره مبنا مشاهده می‌شود، اما تفاوت بین سناریوها چندان چشم‌گیر نیست. در مجموع، تحلیل فصلی نیز همان الگوهایی را نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه مشاهده شد: یعنی افزایش دما در همه سناریوها نسبت به گذشته، با تفاوت‌های جزئی بین سناریوها در بازه آینده نزدیک، و پاسخ غیرمنتظره در برخی فصول مانند زمستان. با بررسی شکل ۶ همچنین می‌توان دریافت که در آینده نزدیک در هر دو سناریو میزان افزایش دما در حدود ۱/۴ درجه سانتی‌گراد است ولی این افزایش دما برای آینده دور برای سناریو SSP2-4.5 به میزان ۱/۹ درجه و SSP5-8.5 به میزان ۱/۸ درجه سانتی‌گراد است که نشانگر تفاوت جزئی تحت سناریو SSP2-4.5 به میزان ۰.۱ نسبت به سناریو بدبینانه است که در مجموعه نشان‌دهنده افزایش دمای حدوداً یکسان در مانگین دمای سالانه در دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه است. یافته‌های این پژوهش با نتایج برخی از مطالعات صورت پذیرفته اخیر در ایران هم‌راستا است. برای نمونه در مطالعه‌ای که توسط گودرزی و همکاران در سال ۲۰۲۴ بر حوضه دز صورت گرفت، نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه تحت SSP2-4.5 حدود ۲/۷ C° و تحت SSP5-8.5 حدود ۲/۳۶ C° افزایش داشته است؛ یعنی در دوره آینده نزدیک، SSP2-4.5 گرم‌تر از SSP5-8.5 بوده است (گودرزی و همکاران^۱، ۲۰۲۴). همچنین در مطالعات دیگر مانند اسفنده و همکاران^۲ (۲۰۲۴) که اثر تغییر اقلیم را بر سواحل جنوبی ایران بررسی کردند، نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه در تمامی مناطق در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت. جالب اینکه بین SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تفاوت اندکی مشاهده شد. برای مثال در ایستگاه بندر لنگه، افزایش دما در ۲۰۲۱-۲۰۴۵ به ترتیب در سناریو SSP2-4.5 به میزان ۱/۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش گزارش شد و تحت سناریو SSP5-8.5 این افزایش به مقدار ۱/۴۱ درجه سانتی‌گراد است. در دوره بعدی نیز تفاوت بسیار ناچیز به‌عنوان مثال ۱/۴۱ در برابر ۱/۴۲ گزارش کردید. به عبارت دیگر سناریو SSP2-5.4 تقریباً همان میزان افزایش دمایی را نشان می‌دهد که سناریو SSP5-8.5 دارد.

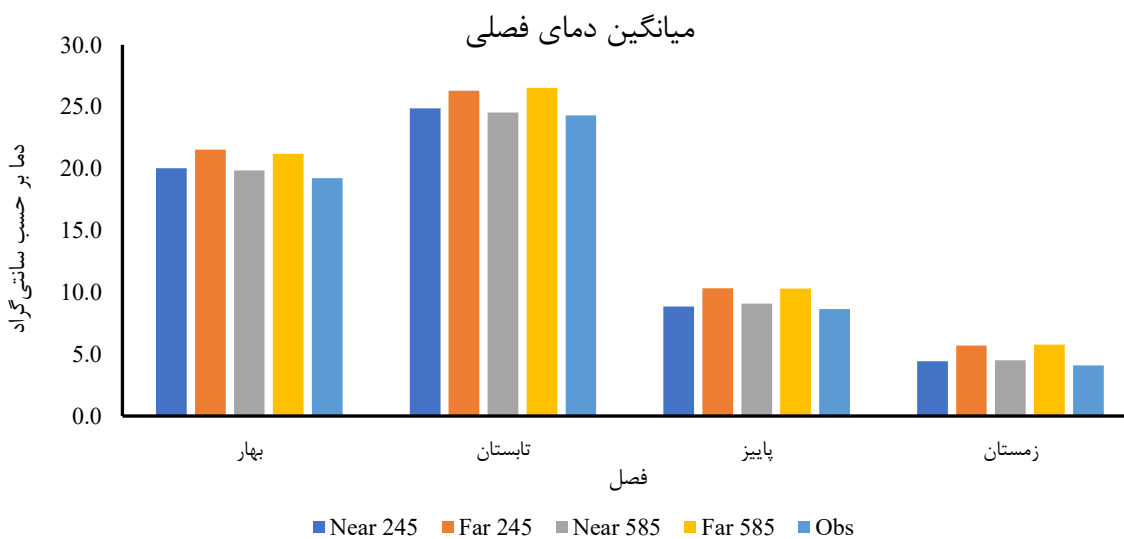
¹ Goodarzi et al² (Esfandeh et al



شکل ۸. میانگین دمای ماهانه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آبی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۹. میانگین دمای سالانه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آبی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۱۰. میانگین دمای فصلی شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آبی در مقایسه با دوره پایه

جدول ۱۱. خلاصه ای از تغییر اقلیم دما دوره آتی همراه با پیامدهای راهبردی در مقایسه با دوره پایه

شاخص	دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴)	دوره آینده (بهترین/بدترین حالت)	تغییرات کلیدی	پیامدهای راهبردی
میانگین دمای سالانه	درجه ۱۴/۰۶	درجه ۱۵/۹۵ (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۱/۹ درجه (حدود ۱۳/۵٪)	افزایش میانگین دمای سالانه منجر به افزایش تبخیر و تفرق، نیاز بیشتر به آبیاری
میانگین دمای زمستان	درجه ۴/۱	درجه ۵/۷ (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۱/۶ درجه	تشدید گرمایش زمستانی با اثر بر نوع و مقدار بارش (برف به باران)
میانگین دمای بهار	درجه ۱۹/۲	درجه ۲۱/۵ (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۲/۳ درجه	افزایش دمای بهار می تواند بر رشد زودرس گیاهان و تبخیر اثر بگذارد
میانگین دمای تابستان	درجه ۲۴/۳	درجه ۲۶/۵ (Far 5-8.5)	▲ افزایش ۲/۲ درجه	افزایش دمای تابستان تشدید تنش گرمایی برای محصولات کشاورزی و منابع آبی
میانگین دمای پاییز	درجه ۸/۶	درجه ۱۰/۳ (Far 2-4.5 / 5-8.5)	▲ افزایش ۱/۷ درجه	افزایش دمای پاییز می تواند آغاز دوره تبخیر بالا را جلو بیندازد
ماه با بیشترین افزایش دما	درجه ۱۴/۳	درجه ۱۷/۳	▲ بیشترین افزایش دما ۳/۰ درجه در فروردین (آینده دور، SSP2-4.5)	افزایش زودهنگام دما در بهار می تواند بر تقویم زراعی و نیاز آبی اثرگذار باشد
ماه با کمترین افزایش دما	درجه ۲۱/۳	درجه ۲۱/۳	بدون افزایش دما در شهریور (آینده نزدیک، SSP5-8.5)	پایداری نسبی دمای تابستان می تواند فرصت هایی برای سازگاری فراهم کند
بدترین سناریو (Far 5-8.5)	درجه ۱۴/۰۷	درجه ۱۵/۹۳ (Far 5-8.5)	▲ افزایش کلی ۱/۸۷ درجه	سناریوی شدید اقلیمی (Far 5-8.5) با گرم ترین وضعیت در کل فصول همراه است
بهترین سناریو (Near 2-4.5)	درجه ۱۴/۰۷	درجه ۱۴/۵۵ (Near 2-4.5)	▲ افزایش ۰/۴۸ درجه	حتی در سناریوی کم انتشار (Near 2-4.5) روند گرم شدن ادامه دارد

۳. اثرات تغییر اقلیم و فرصت های نوآورانه سازگاری

تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی

تغییرات اقلیمی در منطقه شاهرود با افزایش دما و کاهش و بازتوزیع بارش در فصول مختلف همراه است. این تغییرات به ویژه کاهش بارش زمستانه و بهار و افزایش دمای هوا، تنش آبی بر محصولات کشاورزی وارد کرده و عملکرد محصولات حساس به خشکی را کاهش می دهد. بازتوزیع بارش فصلی و تغییر تقویم هیدرولوژیکی نیازمند بازنگری در الگوهای کشت، انتخاب گونه های مقاوم به کم آبی و بهبود سیستم های آبیاری است تا کشاورزی منطقه بتواند با شرایط آینده سازگار شود.

تأثیر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی

کاهش بارش زمستانه و بهار در منطقه شاهرود، همراه با افزایش دما و تبخیر، فشار زیادی بر منابع آب زیرزمینی وارد می کند. کاهش تأمین آب سطحی و رواناب زمستانه موجب کاهش نفوذ به آبخوان ها می شود و در نتیجه سطح ایستابی آب های زیرزمینی کاهش می یابد. با کاهش بارش و آب در دسترس، فشار برداشت و اتکا به آب زیرزمینی نیز افزایش می یابد که می تواند تنش آبی برای کشاورزی و صنایع وابسته ایجاد کند و تأثیر منفی بر اکوسیستم ها داشته باشد. بازتوزیع فصلی بارش، با افزایش جزئی بارش در پاییز و کاهش در زمستان و بهار، نشان دهنده تغییر در الگوی تغذیه آبخوان ها است و نیازمند مدیریت انعطاف پذیر و برنامه ریزی بلندمدت برای استفاده پایدار از منابع زیرزمینی است. استفاده از فناوری های بهینه سازی برداشت آب، افزایش ذخیره سازی مصنوعی و اصلاح تقویم آبیاری می تواند به کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر منابع زیرزمینی کمک کند.

مدیریت پایدار آب با اتکا بر بازچرخانی و تصفیه

به‌منظور مقابله با محدودیت منابع آب و افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی و سایر مصرف‌کنندگان، لازم است الگوهای مصرف بازطراحی شده و هدررفت آب به حداقل برسد. بهره‌گیری از بازچرخانی و تصفیه آب در بخش‌های مختلف مصرف، ضمن افزایش توازن میان عرضه و تقاضا، امکان ذخیره‌سازی مؤثر و توزیع بهینه منابع آب را فراهم می‌کند. این رویکرد، علاوه بر کاهش فشار بر آبخوان‌ها و منابع سطحی، امکان تطبیق کشاورزی و سایر فعالیت‌ها با شرایط آبی متغیر را ایجاد کرده و راهبردی کلیدی برای مدیریت پایدار و انعطاف‌پذیر منابع آب منطقه محسوب می‌شود.

فناوری‌های نوین به‌عنوان فرصت تطابق با تغییر اقلیم

فناوری‌های نوین، راهکاری کلیدی برای ارتقای انعطاف‌پذیری بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب در مواجهه با تغییر اقلیم فراهم می‌کنند. بهره‌گیری از آبیاری هوشمند، حسگرهای محیطی، پایش آنلاین منابع آب و ذخیره‌سازی مصنوعی، امکان تطبیق دقیق مصرف آب با نیاز واقعی محصولات و کاهش هدررفت منابع را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، ابزارهای پیش‌بینی اقلیمی و سیستم‌های دیجیتال مدیریت آب، برنامه‌ریزی بلندمدت و تصمیم‌گیری هوشمند را تسهیل می‌کنند و فشار بر منابع زیرزمینی و سطحی را کاهش می‌دهند. ادغام نوآوری‌های فناوری در مدیریت منابع آب، فرصتی استراتژیک برای تحقق کشاورزی پایدار و مقاوم در برابر اثرات تغییر اقلیم ایجاد می‌کند.

بحث

نتایج ارزیابی مدل‌های اقلیمی نشان داد که عملکرد مدل‌های CMIP6 در بازنمایی متغیرهای دما و بارش منطقه شاهرود یکسان نیست و انتخاب مدل مناسب نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های اقلیمی دارد. در این پژوهش، مدل CMCC-EMS2 بر اساس ترکیب شاخص‌های آماری R^2 ، MAE و KGE و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مدل‌های MPI-ESM1-2-LR و CNRM-CM6-1-HR نشان داد. مقادیر فرست‌ازدست‌رفته ۰/۲۹۵ برای بارش و ۰/۲۲۴ برای دما، همراه با عملکرد آماری بهتر، نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای بررسی تغییرات اقلیمی آینده در منطقه شاهرود باشد. استفاده هم‌زمان از چند شاخص عملکردی و یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، امکان ارزیابی جامع‌تر مدل‌ها را فراهم کرده و از اتکا به یک معیار آماری منفرد جلوگیری می‌کند. بر اساس نتایج مدل منتخب، تغییرات آینده اقلیم منطقه با کاهش نسبی بارش و افزایش دما همراه خواهد بود. میانگین سالانه بارش از مقدار پایه ۱۹۸/۹ میلی‌متر به حدود ۱۹۵/۹ میلی‌متر در سناریوی SSP2-4.5 در آینده نزدیک و ۱۸۴/۴ میلی‌متر در سناریوی SSP5-8.5 در آینده دور کاهش می‌یابد. این کاهش که حدود ۱/۵ تا ۷/۳ درصد برآورد شده است، صرفاً به تغییر مقدار کل بارش محدود نمی‌شود، بلکه با تغییر در توزیع زمانی و فصلی بارندگی نیز همراه است. کاهش بارش زمستانه که در برخی سناریوها به حدود ۱۶ درصد می‌رسد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا بارش زمستانی در تأمین منابع آب منطقه و تغذیه منابع سطحی و زیرزمینی نقش مهمی دارد. در مقابل، احتمال افزایش جزئی بارش پاییزی در برخی سناریوها می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در رژیم فصلی بارندگی و جابه‌جایی زمانی بخشی از بارش باشد. چنین تغییری می‌تواند پیامدهای قابل‌توجهی برای زمان‌بندی فعالیت‌های کشاورزی، مدیریت رواناب و برنامه‌ریزی منابع آب داشته باشد.

در مقابل کاهش بارش، افزایش دما در تمام فصول مشاهده شد و میانگین سالانه دما از مقدار پایه ۱۴/۰۶ درجه سانتی‌گراد به حدود ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. شدت بیشتر افزایش دما در بهار و تابستان و ثبت افزایش ماهانه تا ۳ درجه سانتی‌گراد در فروردین، بیانگر احتمال افزایش نیاز آبی و تبخیر و تعرق در دوره‌های گرم سال است. از این منظر، ترکیب کاهش بارش و افزایش دما می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آب منطقه وارد کند و آسیب‌پذیری بخش کشاورزی را افزایش دهد؛ بنابراین، آثار تغییر اقلیم در منطقه شاهرود باید نه تنها بر اساس تغییر مقدار بارش و دما، بلکه بر مبنای اثر متقابل این دو متغیر بر تقاضای آب، تقویم زراعی و وضعیت منابع آب بررسی شود.

یکی از یافته‌های قابل توجه، نزدیک بودن افزایش دمای شبیه‌سازی شده تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در افق‌های زمانی مورد بررسی است. برای نمونه، در آینده دور میانگین دمای سالانه در سناریوی SSP2-4.5 برابر ۱۵/۹۵ درجه و در سناریوی SSP5-8.5 برابر ۱۵/۹۳ درجه گزارش شده است. این همگرایی را می‌توان با توجه به افق زمانی مورد بررسی، رفتار مدل و ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی منطقه تفسیر کرد؛ با این حال، نباید نزدیکی نتایج دو سناریو به معنای نبود تفاوت میان مسیرهای انتشار یا بی‌اهمیت بودن سناریوی پر انتشار تلقی شود. در واقع، بخشی از تفاوت میان سناریوها ممکن است در افق‌های زمانی طولانی‌تر و تحت اثر انباشت تغییرات اقلیمی آشکارتر شود.

با وجود عملکرد مناسب مدل CMCC-EMS2، استفاده از تنها یک مدل اقلیمی می‌تواند بخشی از عدم قطعیت موجود در برآوردهای آینده را پنهان کند. از این رو، استفاده از مدل‌های همادی (Ensemble) در مطالعات آتی می‌تواند با ترکیب اطلاعات چند مدل، دامنه عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را بهتر مشخص کند. همچنین، بررسی سناریوهای متنوع‌تر انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقایسه نظام‌مند مدل‌های CMIP6 با نسل قبلی CMIP5 می‌تواند درک دقیق‌تری از تغییرات احتمالی اقلیم منطقه و میزان بهبود عملکرد مدل‌های جدید فراهم سازد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های اقلیمی CMIP6 عملکرد متفاوتی در شبیه‌سازی دما و بارش منطقه شاهرود دارند و بر اساس ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های R^2 ، MAE و KGE و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD، مدل CMCC-EMS2 به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. این مدل با کمترین فرست از دست‌رفته، به ترتیب ۰/۲۹۵ برای بارش و ۰/۲۲۴ برای دما، قابلیت بالاتری برای بازنمایی شرایط اقلیمی منطقه نشان داد.

پیش‌بینی‌های مدل منتخب بیانگر آن است که اقلیم آینده شاهرود با کاهش بارش، افزایش دما و تغییر در توزیع فصلی بارندگی همراه خواهد بود. کاهش بارش سالانه تا حدود ۷/۳ درصد و کاهش بارش زمستانه تا حدود ۱۶ درصد، در کنار افزایش میانگین دمای سالانه از ۱۴/۰۶ به حدود ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد، می‌تواند فشار بر منابع آب و بخش کشاورزی منطقه را افزایش دهد. بنابراین، توجه به نتایج پیش‌بینی‌های اقلیمی در برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت کشاورزی و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر ضرورت مدیریت پیش‌نگر منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی در منطقه شاهرود تأکید دارد. با این حال، به منظور کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت اطمینان نتایج، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از رویکردهای همادی، تعداد بیشتری از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای متنوع انتشار استفاده شود و نتایج مدل‌های جدید با CMIP5 نیز مقایسه گردد. این اقدامات می‌تواند مبنای علمی مناسب‌تری برای ارزیابی ریسک‌های اقلیمی و طراحی سیاست‌های سازگاری بلندمدت در منطقه فراهم کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: سینا خوشنویسان، صمد امامقلی؛ تهیه گزارش پژوهش: سینا خوشنویسان؛ تحلیل داده‌ها: سینا خوشنویسان، صمد امامقلی؛ زاده

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

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- الماسی، آرینا، فاطمی، سیداحسان، و اقبالزاده، افشین. (۱۴۰۳). پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم. نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۱)، ۶۴-۴۰. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10245.1097>
- ایمانی، تکت، دلقندی، مهدی، امامقلی‌زاده، صمد، و گنجی‌نوروزی، زهرا. (۱۴۰۱). تأثیر تغییر اقلیم بر حجم و دبی پیک سیلاب (مطالعه موردی: زیرحوضه قران تالار). مجله اکوهیدرولوژی، ۹(۱)، ۲۷۲-۲۵۹. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.333410.1576>
- پولادگر، سعید، عزیزی مبصر، جوانشیر، رمضان‌ی مقدم، جواد، و اصغری، علی. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ برای گیاه ذرت تحت مدیریت آب و کود (مطالعه موردی: شهرستان شوش). نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۲(۱)، ۸۴-۶۷. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2022.7483.1014>
- حقیقی، پارسا، سلیمان‌پور، سیدمسعود، و مرادی، ابوالفتح. (۱۴۰۴). اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر حدی بارش و دما با استفاده از سناریوهای SSP (مطالعه موردی: استان فارس). مجله مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۲)، ۲۱۸-۱۹۹. <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14691.1425>
- خوشنویسان، سینا، قره‌چلو، سعید، مرتضوی، رضا، و خاکزاد، فاطمه. (۱۴۰۳). استخراج پهنه‌های آبی از داده‌های سنجش از دور با مقایسه مدل‌های یادگیری عمیق. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱(۳)، ۳۳۶-۳۲۱. <https://doi.org/10.22059/ije.2024.378101.1829>
- درزی، س. (۱۴۰۴). ارزیابی و آینده‌نگری مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش ایران. دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- کریمی احمدآباد، مصطفی، و قاسمی، الهه. (۱۳۹۶). بررسی پدیده تغییر اقلیم با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۱(۶۱)، ۳۶۱-۳۴۱. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_7030_en.html
- نیرومندفرد، فریبا، خاشعی سیوکی، عباس، هاشمی، سیدرضا، و قربانی، خلیل. (۱۴۰۱). بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). مجله تحقیقات آب و خاک/ایران، ۵۳(۹)، ۲۰۲۶-۲۰۰۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284>

References

- 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. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10245.1097> [In Persian]
- Ayers, J., & Dodman, D. (2010). Climate change adaptation and development I: the state of the debate. *Progress in Development studies*, 10(2), 161-168. <https://doi.org/10.1177/146499340901000205>
- Ayugi, B., Ngoma, H., Babaousmail, H., Karim, R., Iyakaremye, V., Sian, K. T. L. K., & Ongoma, V. (2021). Evaluation and projection of mean surface temperature using CMIP6 models over East Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 181, 104226. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104226>
- Bhanage, V., Lee, H. S., Cabrera, J. S., Kubota, T., Pradana, R. P., Fajary, F. R., & Nimiya, H. (2024). Identification of optimal CMIP6 GCMs for future typical meteorological year in major cities of Indonesia using multi-criteria decision analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1341807. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1341807>
- Darzi, S. (2025). *Evaluation and foresight of CMIP6 models in simulating Iran's temperature and precipitation* Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. [In Persian]
- Dehban, H., Zareian, M. J., & Gohari, A. (2025). Evaluating regional climate change during 2021–2080 for Iran and neighboring countries (a comparative analysis of projections and reanalysis data). *Theoretical and Applied Climatology*, 156(2), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05381-7>
- Delghandi, M., Joorabloo, S., & Emamgholizadeh, S. (2017). Climate change impacts on spatial-temporal variations of reference evapotranspiration in Iran. *Water Harvesting Research*, 2(1), 1-23. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2017.592> [In Persian]
- Dietz, T., Shwom, R. L., & Whitley, C. T. (2020). Climate change and society. *Annual Review of Sociology*, 46(1), 135-158. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919-054614>
- Esfandeh, S., Danehkar, A., Salmanmahiny, A., Alipour, H., Kazemzadeh, M., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Climate change projection using statistical downscaling model over southern coastal Iran. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29416>
- Ghazi, B., & Jeihouni, E. (2022). Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7), 21. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09848-z>
- Goodarzi, M. R., Abedi, M. J., & Niazkar, M. (2024). Effects of climate change on streamflow in the Dez Basin of Iran using the IHACRES model based on the CMIP6 model. *Journal of Water and Climate Change*, 15(6), 2595-2611. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.571>
- Gupta, R., Prakash, P., & Chembolu, V. (2025). Multi criteria evaluation of downscaled CMIP6 models in predicting precipitation extremes. *Atmospheric Research*, 315, 107921. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.107921>
- Haghighi, P., Soleimanpour, S. M., & Moradi, A. (2024). The effects of climate change on precipitation and temperature using SSP scenarios (case study: Fars province). *Water and Soil Management and Modelling*. <https://doi.org/0.22098/mmws.2024.14691.1425> [In Persian]
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water resources management*, 21, 1553-1556. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>
- Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy policy*, 52, 797-809. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>
- Houngué, N. R., Almoradie, A. D. S., & Evers, M. (2022). A multi criteria decision analysis approach for regional climate model selection and future climate assessment in the Mono River Basin, Benin and Togo. *Atmosphere*, 13(9), 1471. <https://doi.org/10.3390/atmos13091471>

- Imani, T., Dalghandi, M., Emamgholizadeh, S., & Ganji-noroozi, Z. (2022). Effects of climate change on floods volume and peak discharge (Case Study: Qaran Talar sub-catchment). *Journal of Ecohydrology*, 9(1), 259-272. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.333410.1576> [In Persian]
- Imani, T., Delghandi, M., Emamgholizadeh, S., & Ganji-Noroozi, Z. (2023). Evaluating uncertainty in climate change impacts on peak discharge and flood volume in the Qaran Talar watershed, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 14(4), 1300-1313. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.333410.1576>
- Karimi, M., & Ghasemi, E. (2017). Assessing Climate Change by Multi-Criteria Decision-Making Approach. *Journal of Geography and Planning*, 21(61), 341-361. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_7030_en.html [In Persian]
- Khoshnevisan, S., Gharechelou, S., Mortazavi, R., & Khakzad, F. (2024). Water Bodies Extraction from Remote Sensing Data by Comparison of Deep Learning Models. *Iranian journal of Ecohydrology*, 11(3), 321-336. <https://doi.org/10.22059/ije.2024.378101.1829> [In Persian]
- Klutse, N. A. B., Quagraine, K. A., Nkrumah, F., Quagraine, K. T., Berkoh-Oforiwaa, R., Dzrobi, J. F., & Sylla, M. B. (2021). The climatic analysis of summer monsoon extreme precipitation events over West Africa in CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 5(1), 25-41. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00203-y>
- Levinson, D. H., & Fetting, C. J. (2013). Climate change: Overview of data sources, observed and predicted temperature changes, and impacts on public and environmental health. *Global Climate Change and Public Health*, 31-49. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8417-2_3
- Li, S.-Y., Miao, L.-J., Jiang, Z.-H., Wang, G.-J., Gnyawali, K. R., Zhang, J., Zhang, H., Fang, K., He, Y., & Li, C. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.003>
- Maryam, H. Impact of CMIP5 climate change model in Jamishan dam reservoir simulation under cropping pattern change scenario. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2021.6603.1000>
- Pooladgar, S., Azizi Mobaser, J., Ramazani Moghadam, J., & Asghari, A. (2022). Evaluating the Efficiency of AquaCrop Model for Corn Plant Underwater and Fertilizer Management (Case study: Shush city). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 67-84. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2022.7483.1014> [In Persian]
- Monahan, W. B., & Theobald, D. M. (2018). Assessing the potential impacts of climate change on species distributions in the United States. *PLOS ONE*, 13(2), e0191468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191468>
- Naderi, M. (2025). Projections of major climate change indicators over Iran from 2021 to 2080. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36186-w>
- Niroumandfard, F., Khashei, A., Hashemi, R., & Ghorbani, K. (2022). Investigation of Climate Change Projection on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2009-2026. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284> [In Persian]
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc. <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>
- Rahman, A., & Pekkat, S. (2024). Identifying and ranking of CMIP6-global climate models for projected changes in temperature over Indian subcontinent. *Scientific Reports*, 14(1), 3076. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52275-1>

- Rajbhandari, R., Shrestha, A. B., Nepal, S., & Wahid, S. (2016). Projection of future climate over the Koshi River basin based on CMIP5 GCMs. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6(2), 190-204. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62017>
- Raju, K. S., & Kumar, D. N. (2020). Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 577-599. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>
- Sheikh, R., & Senfi, S. (2024). A Novel Opportunity Losses-Based Polar Coordinate Distance (OPLO-POCOD) Approach to Multiple Criteria Decision-Making. *Journal of Mathematics*, 2024(1), 8845886. <https://doi.org/10.1155/2024/8845886>
- Tahroudi, M. N., Mirabbasi, R., & Nasrolahi, A. (2024). Investigating the possibilities of temperature concentration distribution in Zayanderood based on climate change. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 106, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2024.101454>
- Vahdatifar, M., Mousavi, S.-F., Farzin, S., & Hadiani, M. O. (2025). Comprehensive Study of Climate Change Impacts on Temperature and Precipitation in East and West of Mazandaran Province in North of Iran. *Water*, 17(8), 1181. <https://doi.org/10.3390/w17081181>
- Zeydalinejad, N., Pour-Beyranvand, A., Nassery, H. R., & Ghazi, B. (2024). Evaluating climate change impacts on snow cover and karst spring discharge in a data-scarce region: a case study of Iran. *Acta Geophysica*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01400-9>



Performance evaluation of Center Pivot irrigation systems with emphasis on efficiency indicators under the climatic conditions of the Moghan plain

Majid Raoof^{1✉} , Arash Amirzadeh² , Mohammad Reza Kohan³ , Mahsa Heydari Ali Kamar⁴ , Ali Rasoulzadeh⁵ , Javanshir Azizi Mobaser⁶ , and Javad Ramezani Moghadam⁷

1. Corresponding author, Department of Water Engineering and and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: m_raoof@uma.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: A.Amirzadeh@uma.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: mohammadrezakohan1376@gmail.com
4. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: heydarimahsa77@gmail.com
5. Department of Water Engineering and and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: rasoulzadeh@uma.ac.ir
6. Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: ja.mobaser22@gmail.com
7. Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: j_ramezani@uma.ac.ir

Article Info.	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 04 August 2025 Received in revised form 05 December 2025 Accepted 12 March 2026 Available online 23 september 2026 Keywords: center pivot, AELQ, PELQ, water application efficiency, evaporation and wind drift losses.	Objective: This study evaluated three center-pivot irrigation systems in Moghan to assess water application performance, identify factors reducing efficiency, and improve irrigation management. Method: In 2024, system performance was evaluated using the catch-can method, with radial and peripheral water collection, along with field measurements of sprinkler discharge and pressure. Results: System C achieved the highest application efficiency (84.64%) and the lowest evaporation and wind-drift losses (15.35%), while system A showed the lowest efficiency (68.44%) and highest losses (31.55%); PELQ and AELQ were highest in system C at 60.01%, with no deep percolation losses reported. Conclusions: System C achieved the highest application efficiency (84.64%) and the lowest evaporation and wind-drift losses (15.35%), while system A showed the lowest efficiency (68.44%) and highest losses (31.55%); PELQ and AELQ were highest in system C at 60.01%, with no deep percolation losses reported.
Cite this article: Raoof, M., Amirzadeh, A., Kohan, M.R., Heydari Ali Kamar, M., Rasoulzadeh, A., Ramezani Moghadam, J., & Azizi Mobaser, J., (2026). Performance evaluation of Center Pivot irrigation systems with emphasis on efficiency indicators under the climatic conditions of the Moghan plain. <i>Advanced Technologies in Water Efficiency</i>, 6(3), 56-73. https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12545.1181	
	© The Author(s) https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12545.1181 Publisher: Razi University.

Introduction

Evaluating the technical performance of center pivot irrigation systems under real-world field conditions is critical for optimizing water use in agriculture, particularly in semi-arid regions where resources are scarce, and climatic stresses such as wind and high temperatures prevail. The Moghan Plain in northwestern Iran is a representative example of such an environment, characterized by a semi-arid climate, windy conditions, and large-scale mechanized agriculture. These conditions make it an ideal setting for conducting a comprehensive performance evaluation of modern irrigation systems. This study aimed to assess the technical performance of three center pivot systems (designated A, B, and C) installed in Region 7 of the Moghan Agro-Industry and Animal Husbandry Company.

Method

The evaluation focused on a set of key irrigation performance indicators: Christiansen's Uniformity Coefficient (CU), Distribution Uniformity (DU), Evaporation and Wind Drift Losses (Ew), Potential Efficiency of Lower Quartile (PELQ), Actual Efficiency of Lower Quartile (AELQ), and Overall Water Application Efficiency (AE). The field methodology employed the catch-can method, implemented in both radial and circumferential layouts to accurately capture water distribution patterns across each system. Plastic catch-cans were placed on metal rods firmly embedded in the soil. After the full passage of each system, the volume of water collected in each can was carefully measured using a graduated cylinder. Additionally, sprinkler discharge rates and operating pressures were measured using timed container methods and hand-held manometers. The results indicated that System C achieved the best performance, with an AE of 84.64% and the lowest Ew (15.35%), suggesting minimal environmental losses. In contrast, System A showed the weakest performance, with AE of 68.44% and Ew of 31.55%. The findings highlight that optimizing pressure, reducing sprinkler height, and adopting regular maintenance schedules are essential to improving the efficiency and reliability of center pivot irrigation systems. The collected data were analyzed to calculate key performance metrics, including Christiansen's Uniformity Coefficient (CU), Distribution Uniformity (DU), Potential and Actual Application Efficiencies (PELQ, AELQ), and overall Application Efficiency (AE). Special attention was given to estimating evaporation and wind drift losses (Ew), which were identified as major contributors to performance degradation under the Moghan Plain's climatic conditions. The methodology of this research involved using the catch-can method for measuring water distribution uniformity and efficiency of center pivot systems. The catch-cans were strategically placed along radial and circumferential lines, with each can positioned at a specified distance from the center pivot. After the full cycle of water distribution, the water collected in each can was measured using a graduated cylinder to determine the volume of water applied. Additionally, the flow rate and pressure of sprinklers were measured to assess their efficiency. The pressure measurements were conducted with a manometer, and the sprinkler flow rates were evaluated using a timed container method. The analysis of the data focused on key metrics

including water application efficiency, uniformity coefficients, and the identification of water losses due to evaporation and wind drift.

Results

three evaluated systems. System C demonstrated the highest efficiency, with a water application efficiency of 84.64%, minimal evaporation and wind drift losses, and no evidence of deep percolation (AELQ = 60.01%). Conversely, System A had the lowest performance, with an application efficiency of 68.44% and significant water losses (31.55%). The inferior performance of this system was primarily attributed to pressure drops along laterals, nozzle wear, inadequate speed regulation, and insufficient maintenance. These operational shortcomings contributed to the overall inefficiency, emphasizing the critical need for proper system calibration, routine inspections, and improved irrigation scheduling.

Conclusions

This study confirms that, when properly managed, center pivot irrigation systems in the Moghan Plain can achieve high operational efficiency. Among the evaluated systems, System C outperformed the others, combining superior water application efficiency with the lowest recorded losses. However, the performance of Systems A and B requires improvement, particularly regarding pressure regulation, sprinkler calibration, and maintenance practices. The findings highlight the importance of implementing regular inspections, timely nozzle replacements, and appropriate adjustment of operational settings to minimize inefficiencies. Such measures are expected to enhance water use efficiency and promote sustainable irrigation management in the region.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Moghan Agro-Industry and Animal Husbandry Company for providing access to the center pivot systems in Section 7 and for their cooperation in data collection for this study.

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری عقربه‌ای با تأکید بر شاخص‌های کارایی سیستم در شرایط اقلیمی دشت مغان

مجید رئوف^۱، آرش امیرزاده^۲، محمدرضا کهن^۳، مهسا حیدری علی کمر^۴، علی رسول‌زاده^۵، جوانشیر عزیزی مبصر^۶، و جواد رضائی مقدم^۷

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: m_raoof@uma.ac.ir
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: A.Amirzadeh@uma.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: mohammadrezakohan1376@gmail.com
۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: heydarimahsa77@gmail.com
۵. گروه مهندسی آب و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: rasoulzadeh@uma.ac.ir
۶. گروه مهندسی آب و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ja.mobaser22@gmail.com
۷. گروه مهندسی آب و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: j_ramezani@uma.ac.ir

در باره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: سنتریوت، AELQ، PELQ، راندمان کاربرد، تلفات تبخیر و باد بردگی.	هدف: هدف این پژوهش، ارزیابی عملکرد سه سامانه آبیاری عقربه‌ای (A، B و C) با طول ۵۱۴، ۲۱۲/۷ و ۲۵۹/۶۰ متر مستقر در شرکت کشت و صنعت مغان از نظر ضریب یکنواختی، یکنواختی توزیع آب، تلفات تبخیر و بادبردگی، راندمان پتانسیل آب PELQ، راندمان واقعی کاربرد آب AELQ و راندمان کاربرد آب بوده است. هدف اصلی این تحقیق، شناسایی عوامل مؤثر در کاهش عملکرد سامانه‌ها و افزایش بهره‌وری آبیاری است. روش پژوهش: برای انجام این ارزیابی که در سال ۱۴۰۳ انجام شد از روش قوطی‌چینی در دو الگوی شعاعی و محیطی استفاده گردید. قوطی‌های پلاستیکی ساده روی میله‌های فلزی نصب‌شده در خاک قرار گرفتند و پس از عبور کامل دستگاه‌ها، حجم آب جمع‌آوری‌شده توسط استوانه مدرج اندازه‌گیری شد. همچنین دبی و فشار آبپاش‌ها به طور میدانی اندازه‌گیری گردید. از داده‌های هواشناسی شامل سرعت باد، دما و رطوبت نیز برای تحلیل تلفات تبخیر و بادبردگی استفاده شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد که سامانه C بهترین عملکرد را با راندمان کاربرد آب ۸۴/۶۴ درصد و کمترین تلفات تبخیر و بادبردگی ۱۵/۳۵ درصد داشت. در مقابل، سامانه A با راندمان ۶۸/۴۴ درصد و تلفات ۳۱/۵۵ درصد ضعیف‌ترین عملکرد را داشت. همچنین، مقدار راندمان پتانسیل و واقعی کاربرد آب (AELQ و PELQ) در سه سامانه مورد بررسی کاملاً یکسان بوده و در سامانه C بیش‌ترین مقدار (۶۰/۰۱ درصد) به دست آمد که بیانگر نبود تلفات نفوذ عمقی است. نتیجه‌گیری: سامانه C بهترین عملکرد را داشت؛ مهم‌ترین عوامل کاهش عملکرد شامل افت فشار، فرسودگی نازل‌ها، تنظیم نامناسب سرعت و ضعف نگهداری بود و تنظیم فشار، کاهش ارتفاع آبپاش‌ها و نگهداری منظم برای بهبود عملکرد پیشنهاد شد.

استاد: رئوف، مجید؛ امیرزاده، آرش؛ کهن، محمدرضا؛ حیدری علی کمر، مهسا؛ رسول‌زاده، علی؛ عزیزی مبصر، جوانشیر؛ و رضائی مقدم، جواد. (۱۴۰۵). عملکرد سیستم‌های آبیاری عقربه‌ای با تأکید بر شاخص‌های کارایی سیستم در شرایط اقلیمی دشت مغان. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۳)، ۵۶-۷۳.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>



مقدمه

در سال‌های اخیر، پدیده کمبود منابع آبی به واسطه افزایش تقاضا در بخش‌های مختلف و کاهش روند توسعه منابع آب جدید، به چالشی جدی تبدیل شده است. در این میان، کشاورزی آبی که بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در اکثر کشورهای نیمه‌خشک محسوب می‌شود، تحت فشار فزاینده‌ای قرار گرفته است. از این رو، توجه به راهکارهای فنی برای مدیریت مصرف و کاهش تلفات آب، بسیار ضروری است. راه‌حل‌های فنی برای مقابله با کمبود آب بسیار متنوع هستند و دولت‌ها در سراسر جهان تعهداتی را برای کاهش مصرف آب در کشاورزی از طریق بهبود بهره‌وری آب پذیرفته‌اند (برنان^۱، ۲۰۰۸). راندمان آب که به نسبت حجم آبی که به طور مؤثر به ناحیه ریشه گیاه می‌رسد نسبت به کل آب مصرف‌شده اطلاق می‌شود، نقش مهمی در افزایش بهره‌وری کشاورزی دارد. راندمان مصرف آب را می‌توان با به‌کارگیری سامانه‌های آبیاری تحت فشار، مانند آبیاری بارانی، افزایش داد (زایلگیر، ارمولایو و پچلکین^۲، ۲۰۲۳). سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای اغلب توسط کشاورزان به دلیل استحکام و امکان اتوماسیون آن‌ها ترجیح داده می‌شوند (دجمی^۳ و همکاران، ۲۰۰۳؛ هانسون و اورلوف^۴، ۱۹۹۶). این سامانه‌ها به نیروی کار کم‌تری وابسته‌اند و توانایی آبیاری مزارع بزرگ را دارند (آگیمین و همکاران^۵، ۲۰۲۳). علاوه بر این، عملیات ساده‌ای دارند و می‌توانند به نتایج یکنواخت و کارآمد آبیاری دست یابند که منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش سودآوری مزارع می‌شود (تارخوئل و همکاران^۶، ۱۹۹۹). راندمان سامانه‌های آبیاری تحت فشار، به‌ویژه سامانه‌های بارانی، نقش حیاتی در بهره‌وری منابع آبی ایفا می‌کند. این سامانه‌ها با هدف کاهش هدررفت آب و بهبود راندمان آبیاری توسعه یافته‌اند. با این حال، در صورت طراحی یا اجرای نامناسب، می‌توانند منجر به کاهش کارایی و اتلاف منابع آب شوند. درک دقیق عملکرد این سامانه‌ها و ارزیابی شاخص‌های مؤثر بر راندمان، از جمله توزیع یکنواخت آب و تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی، اهمیت بسزایی دارد (دارکو و همکاران^۷، ۲۰۱۷).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل شرایط اقلیمی خاصی نظیر سرعت بالای باد و کمبود فشار بخار اشباع، چالش‌های قابل توجهی برای سامانه‌های آبیاری وجود دارد. این شرایط می‌توانند تأثیرات منفی بر راندمان آبیاری و توزیع یکنواخت آب داشته باشند و در نهایت بر تولید محصولات زراعی اثرگذار باشند؛ بنابراین، شناخت عوامل اقلیمی و هیدرولیکی مؤثر بر عملکرد سامانه و ارائه راهکارهای عملی برای بهینه‌سازی آن، از اهمیت بالایی برخوردار است (رئوف و همکاران^۸، ۲۰۱۸). هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای با تمرکز بر افزایش یکنواختی توزیع، کاهش تلفات آب و ارتقاء بهره‌وری کلی سامانه در شرایط اقلیمی دشت مغان است. دستیابی به این اهداف می‌تواند به کاهش مصرف آب و بهبود کارایی سامانه‌های آبیاری منجر شود. همچنین، یافته‌های این تحقیق می‌توانند به عنوان مبنایی کاربردی برای اصلاح و بهینه‌سازی طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های مشابه در سایر مناطق نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرند، و در نهایت موجب افزایش پایدار و اقتصادی تولیدات کشاورزی شوند.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

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

¹ Brennan

² Zeyliger, Ermolaeva & Pchelkin

³ Dechmi et al

⁴ Hanson and Orloff

⁵ Agyeman et al

⁶ Tarjuelo et al

⁷ Darko et al

⁸ Raoof et al

فاریابی و همکاران^۱ (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای عملکرد تعدادی از سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت در دشت دهگلان کردستان را بررسی و ارزیابی کردند. برای این منظور، ۱۰ سامانه آبیاری بارانی کلاسیک ثابت به طور کاملاً تصادفی انتخاب و ارزیابی شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل ضریب یکنواختی کریستیان سن (CU)، یکنواختی توزیع (DU)، راندمان پتانسیل کاربرد در ربع پایین (PELQ)، و راندمان واقعی در ربع پایین اراضی (AELQ) بود. مقادیر متوسط این پارامترها برای ۱۰ مزرعه ارزیابی شده به ترتیب برابر با ۶۶، ۵۰/۶، ۴۴/۸، و ۴۳/۸ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که کلیه سامانه‌ها دارای راندمان کاربرد پایین هستند و یکنواختی توزیع آب در آن‌ها نیز کم‌تر از مقادیر توصیه‌شده توسط مریام و کلر^۲ (۱۹۷۸) است.

نصرالهی و همکاران^۳ (۲۰۱۷) عملکرد هیدرولیکی سامانه آبیاری عقربه‌ای در شرایط اقلیمی مختلف دو سامانه عقربه‌ای در شهریار و اشتهارد را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به دست آمده برای سامانه عقربه‌ای در شهریار و اشتهارد مقدار ضریب یکنواختی به ترتیب ۷۰/۲۰ و ۸۸ درصد و مقدار یکنواختی توزیع برای سامانه‌های مورد بررسی به ترتیب ۴۷/۸۷ و ۸۱/۳۰ درصد به دست آمد. راندمان کاربرد آب برای این سامانه‌ها به ترتیب ۸۵ و ۸۱ درصد به دست آمد که مقدار نسبتاً بالایی بود و به لحاظ راندمان این سامانه‌ها وضعیت مناسبی داشتند. مقادیر محاسبه شده راندمان پتانسیل کاربرد (PELQ) برای سامانه‌ها به ترتیب ۸۵/۳۰ و ۶۶/۵۰ درصد و قابل قبول بود. حمدی احمدآباد و همکاران^۴ (۲۰۱۷) در تحقیقی در پارس‌آباد به بررسی وضعیت و عملکرد سامانه‌های عقربه‌ای اجرا شده در منطقه مورد مطالعه پرداختند. در این تحقیق ۵ سامانه آبیاری عقربه‌ای در مزارع یونجه، ذرت و چغندر کشت و صنعت و دامپروری مغان شهرستان پارس‌آباد به عنوان نمونه انتخاب شد. هر سامانه در ۳ آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی شامل، میانگین ضریب یکنواختی، یکنواختی توزیع، بازده پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین، بازده واقعی کاربرد آب در ربع پایین، تلفات بادبردگی و تبخیر در مزارع مورد مطالعه به ترتیب ۵۰/۴۷، ۶۰/۴۰، ۱۰/۵۰، ۱۰/۵۰ و ۳۲/۵۰ درصد به دست آمد. تجزیه و تحلیل عوامل ارزیابی نشان داد که سامانه‌های عقربه‌ای مورد مطالعه از کارایی مناسبی برخوردار نبودند. دلیل کارایی نامناسب، بیش‌تر مربوط به مسائل مدیریتی و اشکالات فنی سامانه‌ها بود که مورد توجه قرار نگرفته بود. مقادیر پایین AELQ و PELQ به علت ناسازگاری شرایط کارکرد و طراحی نامناسب سامانه بود که باید مورد توجه و بازبینی قرار گیرد.

رئوف و همکاران^۵ (۲۰۱۸) در تحقیقی در شهرستان پارس‌آباد به بررسی عملکرد و کارایی سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای در شرایط پارامترهای اقلیمی هم‌چون سرعت باد، درجه حرارت، رطوبت نسبی، قطر نازل و کمبود فشار بخار اشباع بر تلفات تبخیر و باد بردگی پرداخته‌اند و گزارش نمودند که، راندمان سامانه در سرعت باد ۰ تا ۳ و ۳ تا ۶ و ۶ متر بر ثانیه به بالا به ترتیب برابر ۸۲، ۶۶ و ۴۳ درصد بوده و عوامل مؤثر در تلفات تبخیر و باد بردگی، شامل سرعت باد، درجه حرارت، رطوبت نسبی، قطر نازل و کمبود فشار بخار اشباع می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده عامل باد بیش‌ترین تأثیر و کمبود فشار بخار اشباع کم‌ترین تأثیر را بر تلفات تبخیر و باد بردگی داشت. همچنین معادله تلفات تبخیر و باد بردگی با شرایط جوی منطقه بهترین برازش را با مقدار اندازه‌گیری شده نشان داد و اختلاف میانگین مقادیر مدل شده و مشاهداتی در سطح اعتماد یک درصد معنادار نگردید. همچنین میزان تلفات تبخیر و بادبردگی اندازه‌گیری شده بین ۶ تا ۳۴ درصد و مدلسازی شده بین ۱۱ تا ۳۵ درصد متغیر بود.

زارع ابیانه و همکاران^۶ (۲۰۲۱) طی پژوهشی به ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری تحت فشار پرداختند. در این پژوهش پنج سامانه آبیاری بارانی، پنج سامانه قطره‌ای و دو سامانه نواری قطره‌ای به منظور ارزیابی فنی و هیدرولیکی در اراضی کشاورزی شهرستان همدان انتخاب شدند. ارزیابی‌ها بر اساس روش مریام و کلر انجام شد. شاخص‌های مورد اندازه‌گیری برای سامانه‌های بارانی شامل ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU)، یکنواختی توزیع (DU)، راندمان پتانسیل کاربرد آب (PELQ) و راندمان واقعی کاربرد آب در ربع پایین (AELQ) بود. شاخص‌های مورد اندازه‌گیری برای سامانه‌های قطره‌ای نیز شامل ضریب یکنواختی (EU)،

¹ Faryabi et al

² Merriam and Keller

³ Nasrolahi et al

⁴ Hamdi Ahmadabad et al

⁵ Raoof et al

⁶ Hamid Zare Abyaneh et al

ضریب کاهش راندمان (ERF)، راندمان پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین و راندمان واقعی کاربرد آب در ربع پایین بود. مقدار شاخص‌های CU، DU، PELQ و AELQ برای سامانه‌های بارانی به ترتیب در دامنه ۸۰/۱-۶۵/۶، ۵۳/۱-۵۵/۷، ۳۱/۱-۵۲/۵ و ۲۸/۳- درصد حاصل شد. در سامانه‌های قطره‌ای نیز مقادیر EU، ERF، PELQ و AELQ در دامنه ۶۵/۷-۴۳/۴، ۱/۳-۰/۸، ۵۹/۱-۳۹/۱ و ۷۳/۰-۳۴/۰ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد در تمامی سامانه‌ها، راندمان‌های مورد بررسی کم‌تر از حد انتظار بود که از جمله دلایل این امر می‌توان به طراحی نامناسب، متفاوت بودن سامانه اجرا شده با سامانه طراحی شده، تأثیرگذاری عوامل اقلیمی نظیر سرعت باد، مشکلات بهره‌برداری نظیر عدم اهمیت کشاورزان به تنظیم فشار، استفاده از لوازم نامناسب و عدم بازبینی‌های دوره‌ای به دلیل سطح پایین آگاهی، عدم آموزش و نارسایی‌های اقتصادی اشاره نمود.

نادری و فیروزآبادی^۱ (۲۰۲۳) طی پژوهشی بر روی سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای در مزارع استان سمنان، عملکرد این سامانه‌ها را بررسی نمودند. میانگین راندمان پتانسیل کاربرد، راندمان واقعی، یکنواختی توزیع، ضریب یکنواختی و تلفات تبخیر و بادبردگی به ترتیب ۶۹/۱۰، ۶۷/۲۰، ۷۶/۷۰، ۸۲/۱۰ و ۷۶ درصد گزارش شد استفاده از سامانه‌های عقربه‌ای به دلیل مکانیزه بودن، نسبت به سایر سامانه‌ها آسان‌تر است، اما بروز مشکلاتی نظیر افت فشار، انسداد یا فرسودگی نازل‌ها و عدم تنظیم صحیح سرعت حرکت دستگاه، در برخی موارد باعث کاهش عملکرد شده بود. بهره‌وری آب آبیاری برای یونجه و گندم به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۷ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شد. انجام آبیاری شبانه و آموزش کشاورزان از جمله عوامل مؤثر در افزایش راندمان و بهره‌وری آب بودند. بن شرفی و همکاران^۲ (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای جامع به مدل‌سازی توزیع آب در سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای پرداختند. از مدل‌های ریاضی و داده‌های تجربی برای تحلیل یکنواختی توزیع آب استفاده شد. عوامل مختلفی نظیر سرعت باد، فشار آب، نوع نازل‌ها و ارتفاع نصب آبپاش‌ها بررسی شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل ارائه‌شده قابلیت بالایی در پیش‌بینی دقیق‌تر توزیع آب دارد و می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی و عملکرد سامانه‌های عقربه‌ای کمک کند. یافته‌های این پژوهش نقش مهمی در کاهش تلفات آب و افزایش بهره‌وری آبیاری ایفا می‌کنند.

روش پژوهشی

۱. منطقه مورد مطالعه

این آزمایش در منطقه دشت مغان در شهرستان پارس‌آباد در استان اردبیل انجام شد که دارای موقعیت جغرافیایی بین ۳۹ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی با ارتفاع ۴۵ متر از سطح دریا واقع است. این پژوهش میدانی در اراضی کشاورزی شرکت کشت و صنعت و دامپروری مغان واقع در دشت مغان، استان اردبیل، اجرا شد. دشت مغان با حدود ۷۰ هزار هکتار اراضی قابل کشت، به واسطه ویژگی‌هایی نظیر اقلیم نیمه‌خشک، منابع آب قابل اتکا و خاک‌های نسبتاً حاصلخیز، یکی از مناطق مهم تولید محصولات زراعی در کشور به‌شمار می‌رود. شرکت کشت و صنعت مغان از ۹ بخش کشاورزی تشکیل شده که محل آزمایش در بخش ۷ این مجموعه قرار دارد. این پژوهش بر روی سه سامانه عقربه‌ای به ترتیب عقربه‌ای A، عقربه‌ای B و عقربه‌ای C انجام شد در جدول (۱) پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه و در جدول (۲) مشخصات مربوط به سه سامانه عقربه‌ای ارائه شده است. منطقه مغان دارای اقلیم نیمه خشک است. در این رژیم، بارندگی در اکثر ماه‌ها، به‌ویژه تابستان، بسیار کم است. تبخیر در این منطقه در تابستان به حداکثر می‌رسد و ذخیره رطوبتی خاک در مدت کوتاهی تخلیه می‌شود. این شرایط باعث می‌شود که گیاهان در طول فصل رشد با کمبود آب مواجه شوند. جدول (۳) مشخصات عمومی مزارع مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بافت خاک در هر سه مزرعه سیلتی رسی بود (جدول ۴). ارزیابی عملکرد سامانه آبیاری مطابق با استاندارد ASAE انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا انجام شده است. برای بررسی وضعیت بهره‌وری آب و مدیریت بهره‌برداری از سامانه‌ها، با مراجعه حضوری و بازدید از مزارع، اطلاعات لازم جمع‌آوری شد. این اطلاعات شامل نحوه آبیاری، تاریخ کاشت و برداشت بود که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

¹ Naderi and Firouzabadi

² Ben Charfi et al

همچنین محدوده مجاز و توصیه شده ضریب یکنواختی، یکنواختی توزیع و راندمان پتانسیل کاربرد در جدول (۵) ارائه شده است (مریام و کلر، ۱۹۷۸).

جدول ۱. میانگین پارامترهای هواشناسی در سال ۱۴۰۳ برای منطقه مورد مطالعه

ماه	میانگین حداقل دما (درجه سلسیوس)	میانگین حداکثر دما (درجه سلسیوس)	رطوبت نسبی (درصد)	سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)	ساعات آفتابی روزانه (ساعت)	بارش (میلی متر)
فروردین	۹/۸	۲۴/۱	۷۲/۸	۳/۶	۷/۱	۱۱/۳
اردیبهشت	۱۴/۵	۲۸/۹	۶۹/۵	۲/۸	۸/۱	۲۷/۵
خرداد	۱۸/۸	۳۴/۳	۵۹/۳	۳/۶	۱۰/۴	۰
تیر	۲۲/۲	۳۴/۳	۵۸/۱	۳/۳	۷/۶	۰
مرداد	۲۰/۲	۳۵/۷	۶۱/۲	۲/۶	۸/۷	۰
شهریور	۱۷/۶	۲۸/۱	۲۲/۶	۳/۱	۶/۶	۱۰/۷
مهر	۱۰/۳	۱۸/۹	۷۹/۸	۲/۲	۳/۶	۳۴
آبان	۴/۶	۱۵/۶	۸۱/۵	۲/۹	۴/۵	۶/۲
آذر	۱/۲	۱۲/۲	۸۳/۸	۲/۳	۴/۶	۱۱/۶
دی	-۰/۷	۹/۶	۸۲	۲/۸	۳/۸	۲۶/۴
بهمن	-۰/۹	۱۱/۲	۳۷/۸	۳/۲	۴/۴	۱۴/۲
اسفند	۲/۷	۱۳/۱	۸۰/۵	۳/۳	۴/۴	۵۱/۸

جدول ۲. خصوصیات سامانه عقربه‌ای مورد ارزیابی در منطقه مورد مطالعه

سامانه	سال اجرای سیستم (میلادی)	طول بال (متر)	تعداد اسپن	تعداد آبپاش	قطر لترال (میلی متر)	حداکثر سرعت (متر بر دقیقه)	نوع آبپاش	نحوه قرارگیری آبپاش‌ها
A	۱۹۹۵	۵۱۴	۱۱	۱۷۱	۱۶۰-۱۲۵-۱۱۰	۴	نلسون R3000	مدل عصایی
B	۱۹۹۵	۲۱۲/۷	۴	۷۱	۱۶۰-۱۲۵-۱۱۰	۴	نلسون R3000	مدل عصایی
C	۱۹۹۵	۲۵۹/۶	۴	۸۶	۱۶۰-۱۲۵-۱۱۰	۴	نلسون R3000	مدل عصایی

جدول ۳. اطلاعات مربوط به بهره‌برداری از سامانه‌های آبیاری بارانی عقربه‌ای مورد مطالعه

نام مزرعه	نوع محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	تاریخ کشت	تاریخ برداشت
A	ذرت علوفه‌ای	۸۲/۹۶	دهه اول تیرماه	اواخر شهریور
B	ذرت علوفه‌ای	۱۴/۲۵	دهه اول تیرماه	اواخر شهریور
C	ذرت علوفه‌ای	۲۱/۲۲	دهه اول تیرماه	اواخر شهریور

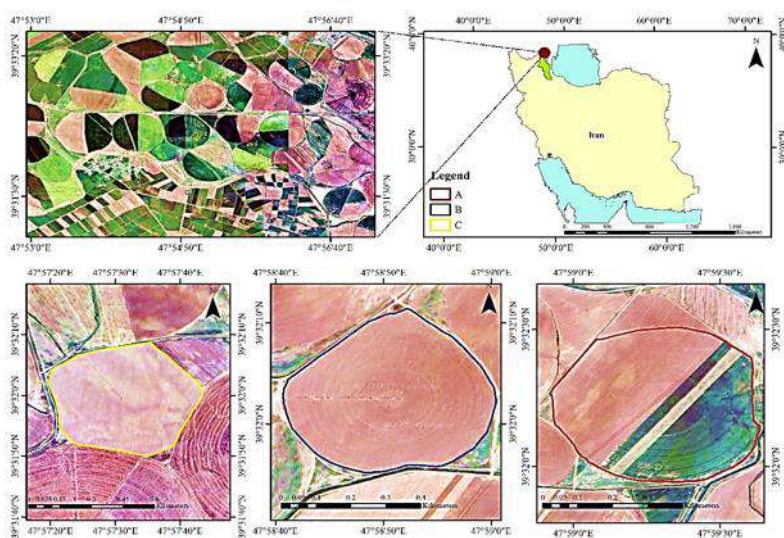
جدول ۴. خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه

نام مزرعه	بافت خاک	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)
A	سیلتی رس	۳۲/۹	۲۱
B	سیلتی رس	۳۱/۵	۲۲
C	سیلتی رس	۳۲	۲۰

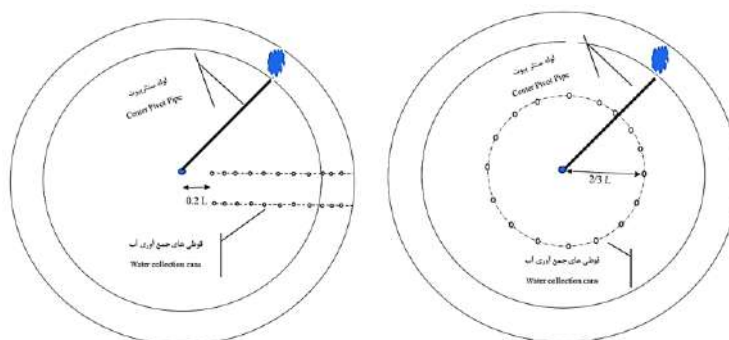
جدول ۵. محدوده مجاز شاخص‌های ارزیابی سامانه‌های آبیاری بارانی (درصد) (مریام و کمر، ۱۹۷۸)

ضریب یکنواختی	یکنواختی توزیع	راندمان پتانسیل کاربرد
۸۱-۸۷	۶۷-۸۰	۶۵-۸۵

موقعیت منطقه مورد مطالعه و نحوه چینش قوطی‌ها به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شد. در این روش، برای ارزیابی شعاعی سامانه‌های عقربه‌ای، دو ردیف قوطی به صورت شعاعی و با فاصله ۱۰ متر از یکدیگر چیده شد. همچنین برای ارزیابی یکنواختی محیطی سامانه‌ها، قوطی‌ها به صورت محیطی و با فاصله ۳۳ متر از یکدیگر با فاصله دو سوم طول بازوی عقربه‌ای ($\frac{2}{3}L$) از مرکز سامانه عقربه‌ای قرار داده شد. این قوطی‌ها برای اندازه‌گیری دقیق میزان آب توزیع شده توسط سامانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحقیق آبپاش مورد استفاده در سترها مدل Nelson است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. نمای کلی از نحوه چینش قوطی‌ها به صورت شعاعی و محیطی بین آبپاش‌ها

۲. روش کار

میل‌های فلزی باریکی در فواصل ۱۰ متر روی دو خط شعاعی و فواصل ۳۳ متر روی یک خط محیطی قرار داده شده. هر میله مانند یک ستون کوچک عمل نمود، به طوری که از تکان خوردن ظروف جلوگیری شود و دهانه آن‌ها کمی بالاتر از خاک قرار گیرند. در این پژوهش از قوطی‌های پلاستیکی ساده بدون درجه‌بندی استفاده شد. تمامی قوطی‌ها دارای دهانه‌ای با ابعاد یکسان و قطر ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر بودند، بنابراین سطح مقطع دهانه‌ها ثابت در نظر گرفته شد و با اندازه‌گیری حجم آب جمع‌آوری شده، امکان محاسبه عمق آب فراهم گردید. برای حفظ تراز بودن قوطی‌ها و جلوگیری از ورود خاک و خرده‌ریزها، آن‌ها روی پایه‌هایی با ارتفاع مشخص نصب شدند.

پس از تنظیم عقربه‌ای روی سرعت ثابت، پمپ روشن شد. پس از رد شدن آخرین اسپن از روی آخرین قوطی اندازه‌گیری‌ها انجام شد.

پس از عبور کامل دستگاه، حدود سه دقیقه جهت اطمینان از پایان ریزش قطرات باقی‌مانده صبر شد. سپس آب موجود در هر قوطی با دقت درون یک استوانه مدرج یک‌لیتری ریخته شد و حجم آن ثبت گردید.

برای اندازه‌گیری دبی، مقدار آب خروجی هر آبپاش طی زمان ۳۰ ثانیه با استفاده از ظرف و کروномتر ثبت و سپس دبی لحظه‌ای محاسبه شد. بلافاصله فشار همان نقطه با فشارسنج اندازه‌گیری شد تا افت احتمالی فشار نیز مورد بررسی قرار گیرد. اندازه‌گیری در سه نقطه ابتدای لوله، وسط، انتها انجام شد اندازه‌گیری فشار متوسط در سه سامانه به ترتیب در سامانه A برابر با ۲ بار، در سامانه B برابر با ۰/۷ بار و در سامانه C برابر با ۱/۵ بار بود.

تمام مراحل فوق در روزهای بعد به صورت مشابه برای دو سامانه دیگر (B و C) انجام شد تا امکان مقایسه دقیق بین عملکرد آن‌ها فراهم گردد. لازم به ذکر است که بخشی از اختلاف مشاهده شده میان نتایج سه سامانه (A، B و C) می‌تواند ناشی از تفاوت شرایط هواشناسی، به ویژه تغییرات سرعت باد، در روزهای مختلف اجرای آزمایش باشد. این عامل بیرونی علاوه بر مشخصات هیدرولیکی سامانه‌ها، می‌تواند بر یکنواختی و راندمان توزیع آب تأثیرگذار باشد.

۳. شاخص‌های ارزیابی سامانه

تلفات تبخیر و باد بردگی (E_w)

این پارامتر نشان می‌دهد که چه درصدی از آب پاشیده شده توسط آبپاش‌ها از محدوده اراضی موردنظر خارج می‌شود. در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی، تلاش می‌شود که این تلفات به حداقل ممکن کاهش یابد. برای دستیابی به این هدف، استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی مانند تنظیم مناسب نازل‌ها، کاهش ارتفاع پاشش و تنظیم فشار سامانه از جمله اقداماتی است که می‌تواند مؤثر باشد (رابطه ۱): (مرکلی و آلن ۲۰۰۴).

$$E_w = \frac{d_w}{d_i} \times 100 = \left(1 - \frac{d_a}{d_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

که در آن E_w مقدار تلفات تبخیر و باد بردگی، d_w متوسط عمق آبی که در هنگام کار آبپاش توسط باد یا به صورت تبخیر از محدوده مزرعه خارج می‌گردد (mm)، d_i متوسط عمق آب خارج شده از آبپاش (mm) و d_a متوسط عمق آب پخش شده در سطح زمین (mm) می‌باشند. در شرایط مزرعه، مقدار d_i با استفاده از روش قوطی‌چینی به دست آمد، بدین صورت که قوطی‌های پلاستیکی روی پایه‌های فلزی قرار داده شدند و پس از عبور کامل دستگاه، حجم آب جمع‌آوری شده در هر قوطی توسط استوانه مدرج اندازه‌گیری و به عمق آب (میلی‌متر) تبدیل شد. مقدار d_a نیز از اختلاف بین کل دبی خروجی آبپاش‌ها (محاسبه شده با اندازه‌گیری دبی لحظه‌ای و فشار کاری) و مقدار آبی که به سطح زمین رسید، به دست آمد. در طراحی سامانه‌های آبیاری بارانی، تلاش می‌شود مقدار این تلفات به حداقل برسد.

¹ Evaporation and Wind Drift Losses

² Merkley and Allen

ضریب یکنواختی کریستیان سن (CU^۱)

یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی یکنواختی توزیع آب در مزرعه، ضریب یکنواختی کریستیان سن است. این ضریب میزان یکنواختی آب توزیع شده توسط آبپاش‌ها را نشان می‌دهد و به این وسیله می‌توان بخشی از کارایی سامانه آبیاری را ارزیابی کرد. لازم به ذکر است مقدار CU و DU در هر سه سامانه عقربه‌ای، هم به صورت شعاعی و هم محیطی محاسبه شده است. در نهایت، برای دستیابی به یک مقدار کلی، مقادیر به دست آمده در این دو جهت در یکدیگر ضرب شده‌اند. (رابطه ۲) (علیزاده ۲، ۲۰۱۱).

$$CU = \left(1 - \frac{\sum |d_i - \bar{d}|}{n\bar{d}}\right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن CU ضریب یکنواختی %، d_i عمق پخش شده در قوطی شماره i ام (mm)، $\bar{d}$ میانگین عمق آب جمع‌آوری شده در n قوطی (mm) و n تعداد قوطی‌ها می‌باشند.

یکنواختی توزیع (DU^۳)

ضریب یکنواختی کریستیان سن گویای مشکلات واقعی توزیع آب در مزرعه نیست، زیرا در محاسبه آن از عمق آب پخش شده در تمام قوطی‌ها استفاده می‌گردد به همین دلیل از پارامتر یکنواختی توزیع آب در مزرعه کمک گرفته می‌شود (رابطه ۳) (کلر و بیلینسر، ۱۹۹۰).

$$DU = \frac{d_q}{\bar{d}} \times 100 \quad (3)$$

که در آن DU یکنواختی توزیع (درصد)، d_q متوسط عمق آب پخش شده در ۲۵ درصد از قوطی‌ها که کم‌ترین آب را دریافت کرده‌اند (mm) و $\bar{d}$ متوسط عمق آب جمع‌آوری شده در n قوطی (mm) است.

راندمان پتانسیل ربع پایین (PELQ^۴)

راندمان پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین برای بررسی مطابقت وضعیت سامانه آبیاری با حالت مدیریت بهینه و شرایطی که عمق آبیاری به طور مطلوب انتخاب شده باشد، استفاده می‌شود. راندمان پتانسیل کاربرد آب در ربع پایین با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود: (مرکلی و آلن، ۲۰۰۴).

$$PELQ = \frac{d_q}{d_r} \times 100 \quad (4)$$

که در آن PELQ راندمان پتانسیل ربع پایین %، d_q متوسط عمق آب پخش شده در یک چهارم شبکه اندازه‌گیری که کم‌ترین آب را دریافت نموده‌اند (mm) و d_r متوسط عمق آب آبیاری (اندازه‌گیری شده از سر نازل‌ها) (mm) است. برای محاسبه شاخص‌های یکنواختی و راندمان، عمق آب جمع‌آوری شده از سر نازل‌ها با استفاده از قوطی‌های جمع‌آوری در امتداد مسیر آب‌پاشی اندازه‌گیری شد. قوطی‌ها با فاصله یکنواخت در طول مسیر سامانه قرار داده شدند و پس از آبیاری، حجم آب جمع‌آوری شده در هر قوطی با سیلندر مدرج قرائت و به واحد عمق (میلی‌متر) تبدیل گردید. سپس میانگین عمق آب، کم‌ترین ربع و سایر پارامترهای مورد نیاز بر اساس روابط محاسبه شدند.

راندمان واقعی ربع پایین (AELQ^۵)

راندمان واقعی کاربرد در ربع پایین درواقع بیانگر راندمان حقیقی کل سیستم بوده و بهتر می‌تواند مشکلات سیستم را بیان نماید. راندمان واقعی کاربرد در ربع پایین از رابطه (۵) قابل محاسبه است: (مرکلی و آلن، ۲۰۰۴).

$$\begin{cases} AELQ = \frac{d_q}{d_r} \times 100 & , \quad d_q < SMD \\ AELQ = \frac{SMD}{d_r} \times 100 & , \quad d_q > SMD \end{cases} \quad (5)$$

¹ Coefficient of Uniformity

² Alizadeh

³ Distribution Uniformity

⁴ Application Efficiency of Low Quarter

⁵ Potential Application Efficiency of Low Quarter

که در آن AELQ، راندمان واقعی کاربرد در ربع پایین % و SMD، کمبود رطوبتی خاک است. مقادیر PELQ و AELQ مقادیر راندمان پتانسیل و واقعی ربع پایین برای آبپاش های مورد آزمایش هستند. در این تحقیق مقدار SMD بر سه سامانه عقربه ای A، B و C به ترتیب برابر ۱/۵۳، ۶/۶ و ۳/۳ است

راندمان کاربرد آب (AE^۱)

راندمان کاربرد نشان دهنده میزان کارایی سامانه آبیاری در داخل مزرعه است. این شاخص بیانگر درصد آبی است که به طور مؤثر توسط گیاه استفاده می شود و تلفات ناشی از تبخیر، بادبردگی، رواناب یا نفوذ عمقی باعث کاهش آن می گردد (رابطه ۶): (مرکلی و آلن، ۲۰۰۴).

$$AE = (d/d_r) \times 100$$

(۶)

d متوسط عمق آب نفوذ یافته و ذخیره شده در منطقه ریشه (mm).

یافته های پژوهشی

آزمایش مزرعه ای، برای سه سامانه A، B و C به ترتیب در تاریخ های ۲۹، ۳۰ و ۳۱ مردادماه انجام شد. در طول آزمایش ها، سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین به ترتیب برابر با ۲/۵۴، ۲/۹ و ۲/۵۴ متر بر ثانیه اندازه گیری گردید. این مقادیر نشان می دهد که شرایط باد در روزهای مختلف آزمایش تقریباً مشابه بوده و اختلاف قابل توجهی بین آن ها وجود نداشت. همچنین میانگین عمق آب پخش شده در آزمایش مزرعه ای، برای هر یک از سه دستگاه سنتریوت (A، B و C)، سه بار اندازه گیری عمق آب پخش شده انجام شد و سپس میانگین نتایج محاسبه گردید. سه دستگاه عقربه ای برای سه سامانه A، B و C به صورت شعاعی به ترتیب برابر ۱/۹۳، ۱/۶۹ و ۱/۴۸ میلی متر و در ارزیابی محیطی به ترتیب برابر ۲/۲۶، ۱/۲۳ و ۱/۲۳ میلی متر به دست آمد. سرعت خطی حرکت شاسی در طول آزمایش برای سامانه های A، B و C تقریباً ۱/۲ الی ۱/۶ متر بر دقیقه بود. سایر شاخص های مورد ارزیابی شاخص های یکنواختی (CU و DU) و راندمان های PELQ و AELQ در جدول (۶) ارائه شده است. مقادیر PELQ در مزارع مورد مطالعه پایین تر از محدوده استاندارد (۶۵ تا ۷۵ درصد) بوده است با این تفاسیر، هدر رفت بالایی دارند که نشان دهنده عدم توزیع یکنواخت آب و احتمال وجود تلفات بالا در سامانه آبیاری است.

جدول ۶. اجزاء و عوامل مقایسه ارزیابی در سامانه های عقربه ای مورد مطالعه

مزرعه	گیاه	ضریب یکنواختی ترکیبی (CU) (درصد)	یکنواختی توزیع ترکیبی (DU) (درصد)	PELQ (درصد)	AELQ (درصد)	راندمان کاربرد (AE) (درصد)	تلفات تبخیر و باد بردگی (درصد)
A	ذرت علوفه ای	۵۴/۵۵	۳۶/۹۱	۴۱/۴۹	۴۱/۴۹	۶۸/۴۴	۳۱/۵۵
B	ذرت علوفه ای	۴۴/۵۲	۲۵/۹۶	۴۰/۲۴	۴۰/۲۴	۷۳/۸۸	۲۶/۱۱
C	ذرت علوفه ای	۵۵/۹۷	۵۰/۱	۶۰/۰۱	۶۰/۰۱	۸۴/۶۴	۱۵/۳۵
میانگین	-	۵۱/۶۸	۳۷/۶۵	۴۷/۲۴	۴۷/۲۴	۷۵/۶۵	۲۴/۳۳

مقدار PELQ نشان دهنده مشکلات طراحی و اجرا است. اما همیشه هم مقدار بالای PELQ منظور و هدف نهایی نمی باشد. از آنجاکه در برخی پروژه ها به دلایل اقتصادی مقدار PELQ کم را قابل قبول می دانند، احتمالاً در منطقه وسیعی که زیر نظر دولت نیز است (کشت و صنعت و دامپروری مغان) هم به دلیل کاهش هزینه ها، مقدار کم PELQ در طراحی و اجرا مد نظر بوده است (آگیمن و همکاران^۲، ۲۰۲۳). این کاهش راندمان ممکن است ناشی از عواملی مانند عدم یکنواختی فشار در نازل ها، اثرات باد، تبخیر بالا، یا طراحی نامناسب سامانه آبیاری باشد. همچنین، فرسودگی تجهیزات آبیاری و تنظیمات نادرست نازل ها می تواند موجب توزیع نامناسب آب و در نتیجه

^۱ Application Efficiency

^۲ Agyeman et al

کاهش راندمان کاربرد در ربع پایین شود؛ بنابراین، بهبود یکنواختی توزیع آب از طریق کنترل فشار، کاهش ارتفاع نازل‌ها، و انتخاب صحیح نازل‌ها متناسب با شرایط مزرعه، می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش PELQ و کاهش تلفات آب داشته باشد (میرام و کلر، ۱۹۷۸؛ رولند^۱، ۱۹۸۲؛ مرکلی و آلن، ۲۰۰۴). از طرفی مقدار پایین PELQ نشان‌دهنده عدم انطباق طراحی سامانه آبیاری با شرایط زراعی و خاکی منطقه است که این موضوع می‌تواند تأثیر منفی بر بهره‌وری آب و یکنواختی توزیع آن داشته باشد. بررسی‌های میدانی تأیید می‌کند که مدیریت نادرست و نگهداری ضعیف از سامانه‌های آبیاری، یکی از عوامل اصلی کاهش راندمان محسوب می‌شود (رثوف، حسینی و نظری، ۲۰۱۸). عواملی مانند فرسودگی تجهیزات، خرابی فنر آبپاش، نشستی در اتصالات و پوسیدگی لوله‌ها موجب افت فشار و کاهش دبی خروجی از نازل‌ها شده‌اند که در نتیجه، میزان آب اعمال‌شده به سطح مزرعه کاهش یافته و یکنواختی توزیع آب مختل شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفات ناشی از تبخیر و بادبردگی در محدوده ۱۵ تا ۳۰ درصد بوده است که مقدار قابل توجهی برای سامانه آبیاری بارانی محسوب می‌شود. در این تحقیق بین AELQ و PELQ اختلافی وجود ندارد از آنجاکه اختلاف این دو پارامتر تا حدودی بیانگر تلفات نفوذ عمقی است؛ لذا در تحقیق حاضر تلفات نفوذ عمقی صفر است. مقادیر پارامتر PELQ و AELQ برابر است و برای سامانه A، B و C به ترتیب برابر ۴۱/۴۹، ۴۰/۲۴ و ۶۰/۰۱ تعیین گردید لویز-ماتا و همکاران^۲ (۲۰۱۰) طی پژوهشی مقدار میانگین AELQ (۵۷/۶۵ درصد) را کمتر از مقدار PELQ (۶۵/۵۷ درصد) به دست آورد که نشان‌دهنده عدم تطابق سامانه آبیاری با نیاز واقعی مزرعه و خاک منطقه است. این موضوع حاکی از آن است که مقدار قابل توجهی از آب، به جای نفوذ مؤثر در منطقه ریشه، در اثر تبخیر، بادبردگی، یا رواناب از دست رفته است. به بیان دیگر، بخشی از خاک ناحیه ریشه که باید آب ذخیره کند، خشک باقی مانده و گیاه به اندازه کافی آب دریافت نکرده است. در بسیاری از مزارع، این عدم یکنواختی در آبیاری به دلیل افت فشار در سامانه و استهلاک تجهیزات آبیاری بوده است. همان‌طور که در بررسی‌ها مشاهده شده، وجود نشستی در اتصالات، پوسیدگی لوله‌ها و عمر بالای سامانه باعث ایجاد کاهش فشار در نازل‌ها و در نتیجه کاهش یکنواختی توزیع آب شده است. بررسی‌ها نشان داد که ضریب یکنواختی توزیع آب (DU) در سه سامانه عقربه‌ای A، B و C به ترتیب برابر با ۳۶/۹۱، ۲۵/۹۶ و ۵۰/۱۰ درصد بوده است. این مقادیر که پایین‌تر از حد استاندارد توصیه‌شده برای سامانه‌های بارانی هستند، می‌توانند منجر به کاهش بهره‌وری کلی سامانه‌های آبیاری گردند باتوجه به جدول (۵) مشاهده می‌شود مقدار یکنواختی توزیع آب کمتر از مقدار توصیه شده است. همچنین ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU) نیز در این سامانه‌ها پایین‌تر از مقادیر استاندارد ارائه‌شده توسط میرام و کلر (۱۹۷۸) و رولند (۱۹۸۲) بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سامانه‌های آبیاری تحت تأثیر فرسودگی، طراحی نامناسب، و عدم مدیریت صحیح قرار دارد و بهینه‌سازی آن‌ها از طریق بازرسی دوره‌ای، تعویض نازل‌ها، و تنظیم فشار کاری سامانه ضروری است.

نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که کم‌ترین مقدار یکنواختی توزیع آب (DU) برابر ۲۵/۹۶ و ضریب یکنواختی کریستیانسن (CU) برابر ۴۴/۵۲ برای سامانه B بوده است. این روش منجر به کاهش درصد نهایی CU و DU گردیده است، چرا که ترکیب دو مقدار مستقل موجب تأثیر مضاعف بر کاهش یکنواختی توزیع آب می‌شود. این مقدار نسبت به استانداردهای تعیین‌شده پایین‌تر بوده و می‌تواند به دلیل تأثیر بالای تلفات تبخیر و بادبردگی، فرسودگی سامانه و وجود نشستی زیاد نسبت به سایر سامانه‌ها باشد. در همه سامانه‌های مورد مطالعه، ضعف مدیریتی یکی از عوامل اصلی کاهش راندمان سامانه‌های آبیاری بوده است. این وضعیت کم‌تر بودن مقدار آب جمع‌آوری شده در برخی نقاط را نسبت به سایر قسمت‌های مزرعه تأیید می‌کند که نشان از خرابی آبپاش‌ها، تنظیم نادرست فشار و نوسانات قطرات آب هنگام پاشش دارد.

قطر نازل‌های برخی از آبپاش‌ها دچار تغییر شده‌اند که باعث پراکندگی غیریکنواخت آب و کاهش راندمان سامانه شده است. از سوی دیگر، مشاهده شد که تجمع بیش‌تر آب در بخش‌های خاصی از مزرعه، بدون نفوذ کافی در عمق خاک، نشان‌دهنده غیریکنواختی پخش آب در سطح زمین است. این مسئله به خطرات ناشی از رواناب سطحی، فرسایش خاک، و کاهش بهره‌وری آب منجر می‌شود. در برخی نقاط، کمبود عمق آب در انتهای لترال‌ها به دلیل افت فشار در طول لوله آبدیده مشاهده شده است که نشان می‌دهد آب به طور

¹ Roland² López-Mata et al

یکنواخت به انتهای خطوط آبیاری نمی‌رسد. این مسئله نه تنها بر رشد گیاهان تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه باعث ایجاد تنش آبی در برخی نقاط و غرقاب شدن برخی دیگر از قسمت‌های مزرعه می‌شود. تلفات تبخیر و بادبردگی سامانه A بالاترین (۳۱/۵۵ درصد) و سامانه C پایین‌ترین (۱۵/۳۵ درصد) را دارد. راندمان کاربرد (AE) سامانه C بهترین (۸۴/۶۴ درصد) و سامانه A پایین‌تر (۶۸/۴۴ درصد) است.

AELQ و PELQ برای هر یک از سامانه‌ها برابر است. در سامانه B برابر کم‌ترین مقدار ۴۰/۲۴ که نشان‌دهنده مدیریت ضعیف‌تر در بخش‌های مختلف مزرعه در این سامانه است. در سامانه C بیش‌ترین مقدار و برابر ۶۰/۰۱ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده یکنواختی بیش‌تر است. اختلاف AELQ و PELQ در یک سامانه بیانگر تقریبی تلفات نفوذ عمقی است که در این تحقیق برای هر سه سامانه صفر است. همچنین همواره $AE > PELQ$ است که در این طرح رعایت شده است. در سامانه آبیاری بارانی مقدار PELQ از DU کم‌تر است در این تحقیق هم در ارزیابی شعاعی و هم در ارزیابی محیطی رعایت شده است.

در مزرعه A، تلفات تبخیر و بادبردگی برابر با ۳۱/۵۵ درصد محاسبه شد که مقدار بالایی محسوب می‌شود. همچنین، ضریب یکنواختی توزیع آب در این سامانه در محدوده متوسط قرار دارد. برای کاهش این تلفات، پیشنهاد می‌شود که ارتفاع پاشش نازل‌ها کاهش یابد، آبیاری در ساعات کم‌باد انجام گیرد، و فشار کاری سامانه به‌درستی تنظیم شود. در مزرعه B، باوجود تلفات تبخیر نسبتاً کم‌تر، ضعف در شاخص‌های راندمان پتانسیل کاربرد آب (PELQ) و یکنواختی توزیع (DU) به‌وضوح قابل‌مشاهده است. اقداماتی نظیر تعمیر یا تعویض آبیاش‌های معیوب، پایش دقیق فشار در طول لترال‌ها، و تنظیم صحیح سرعت حرکت دستگاه، می‌تواند تأثیر چشمگیری در بهبود یکنواختی آبیاری این سامانه داشته باشد.

در مقابل، مزرعه C در تمامی شاخص‌های عملکردی نتایج مطلوبی به دست آورده است. بااین‌حال، کاهش بیش‌تر تلفات تبخیر که در حال حاضر معادل ۲۴/۳۳ درصد است، می‌تواند به ارتقاء بیش‌تر راندمان کاربرد منجر شود. باتوجه‌به عملکرد مثبت مزرعه C، این سامانه می‌تواند به‌عنوان الگوی مدیریتی و طراحی مناسب برای ارتقای بهره‌وری دو سامانه دیگر مورد استفاده قرار گیرد.

مطابق با جدول (۷) که نشان‌دهنده ارزیابی CU و DU است همان‌طور که انتظار می‌رفت در هر سه مزرعه مقادیر CU بالاتر از DU گزارش شده است. در مجموع، سامانه مزرعه C در هر دو شاخص وضعیت بهتری دارد، سامانه مزرعه B ضعیف‌ترین مقادیر، و مقادیر سامانه مزرعه A در سطح متوسط ارزیابی می‌شود. بررسی مقادیر شعاعی و محیطی در جدول (۵) این مطلب را تأیید می‌کند، در سامانه مزرعه B تفاوت شاخص‌های شعاعی و محیطی زیاد و در سامانه مزرعه C کم است.

جدول ۷. اجزاء و عوامل مقایسه ارزیابی CU و DU به تفکیک شعاعی و محیطی در سامانه‌های عقربه‌ای مورد مطالعه

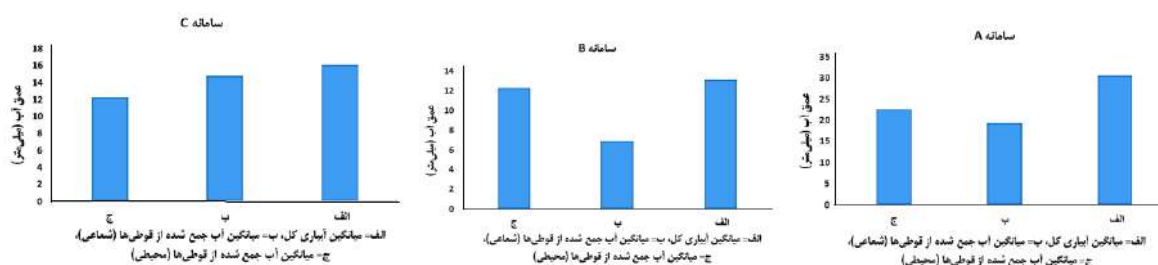
مزرعه	ضریب یکنواختی شعاعی (CU) (درصد)	ضریب یکنواختی محیطی (CU) (درصد)	یکنواختی توزیع (DU) شعاعی (درصد)	یکنواختی توزیع (DU) محیطی (درصد)
A	۷۹/۰۸	۶۸/۹۸	۶۹/۱۹	۵۳/۳۴
B	۶۶/۲۹	۶۷/۱۷	۵۸/۸۴	۴۴/۱۲
C	۷۶/۶۷	۷۲/۹۹	۷۱/۹۳	۶۹/۶۵

باتوجه‌به شکل (۳) اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده در هر سه سامانه وجود دارد و علت اصلی می‌تواند تلفات تبخیر و بادبردگی، افت فشار، خرابی یا فرسودگی آبیاش‌ها، و عدم تنظیم مناسب سرعت حرکت دستگاه باشد.

مقایسه ستون B و ج (میانگین‌های محیطی و شعاعی) بیانگر نحوه توزیع آب در راستای شعاع تا محیط دستگاه عقربه‌ای است. در بعضی سامانه‌های A و B اختلاف بین این دو مقدار زیادتر است که حاکی از عدم یکنواختی قابل‌ملاحظه در توزیع آب میان بخش‌های مختلف مزرعه است. در سامانه C این اختلاف کم‌تر است و به معنای توزیع یکنواخت‌تر آب است. در مجموع، سامانه C به نظر عملکرد بهتری دارد، زیرا فاصله بین ستون طراحی (الف) و ستون‌های محیطی و شعاعی کم‌تر است. این امر به کارایی بالاتر و تنظیمات بهتر (فشار، نازل، زمان‌بندی آبیاری، سرعت حرکت) اشاره می‌کند.

برای بهبود کارایی سامانه‌های A و B باید بازرسی دوره‌ای و تعمیرات از جمله اصلاح یا تعویض نازل‌ها، کنترل فشار در امتداد بازوهای عقربه‌ای، رفع نشتی اتصالات و کاهش ارتفاع آبپاش‌ها برای کاهش بادبردگی در دستور کار قرار گیرد. یافتن علت اصلی هر اختلاف نیازمند داده‌های بیش‌تر درباره سرعت باد، فشار در نقاط مختلف سامانه، ارتفاع نصب آبپاش‌ها، زمان‌بندی آبیاری است. اما بر اساس نمودار، اختلاف میان کل آبیاری طراحی‌شده و آب جمع‌آوری‌شده، تأیید می‌کند که مدیریت و نگهداری بهتر، می‌تواند نقش بسزایی در افزایش راندمان آبیاری داشته باشد.

با استناد به داده‌های به‌دست‌آمده از نمودارها، اقدامات زیر برای بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری پیشنهاد می‌شود: کاهش سرعت حرکت دستگاه که در حال حاضر بین $1/2$ تا $1/6$ متر بر دقیقه تنظیم شده، به‌منظور تأمین بهتر نیاز آبی گیاه، کاهش ارتفاع نصب آبپاش‌ها، در صورت امکان جهت کاهش تلفات ناشی از بادبردگی، انجام بازرسی‌های فنی دوره‌ای برای اطمینان از یکنواختی فشار در طول لترال‌ها و رفع انسداد احتمالی نازل‌ها، مقایسه و انطباق دقیق بین داده‌های میدانی و مقادیر طراحی‌شده برای شناسایی و اصلاح مغایرت‌های فنی موجود.



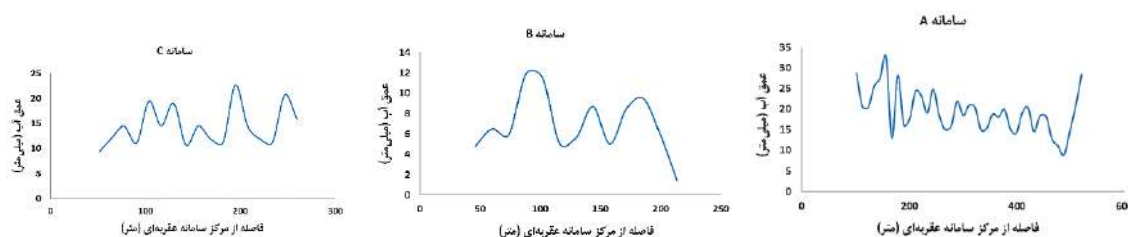
شکل ۳. مقایسه میانگین عمق آب پخش‌شده اندازه‌گیری‌شده با مقدار محاسباتی طراحی در سه سامانه آبیاری مورد مطالعه

شکل (۴) مقادیر عمق آب جمع‌آوری‌شده توسط قوطی‌ها را در آزمایش شعاعی برای سه سامانه A، B و C نشان می‌دهد. اگرچه انتظار می‌رود که این مقادیر در شرایط ایده‌آل تقریباً برابر باشند، نتایج نشان‌دهنده اختلاف قابل‌توجهی بین آن‌هاست. این تفاوت می‌تواند ناشی از عواملی نظیر توپوگرافی ناهموار زمین، افت فشار در طول لترال‌ها، تفاوت در عملکرد نازل‌ها، و تنظیمات غیر بهینه سرعت حرکت دستگاه باشد که موجب کاهش یکنواختی توزیع آب در این سامانه‌ها شده‌اند. سامانه A دامنه نوسان بیش‌تری دارد ($0/50$) تا بالای ۳ سانتی‌متر، سامانه B در یک بازه‌ی کم‌عمق‌تر نوسان می‌کند ($0/20$ تا $1/30$ سانتی‌متر)، و سامانه C بین ۱ تا $2/50$ سانتی‌متر متغیر است. سامانه A با طول ۵۱۴ متر، طبیعتاً بیش‌ترین احتمال افت فشار و پراکندگی قطرات را دارد. سامانه‌های B و C کوتاه‌ترند و نوسانات آن‌ها ناشی از عوامل محلی (ارتفاع نازل، باد، یا خرابی برخی آبپاش‌ها) است.

تغییرات ناگهانی در نمودارها (قله‌ها و دره‌های تند) می‌تواند نشانگر خرابی نازل‌ها، انسداد جزئی برخی آبپاش‌ها، یا اتصال نادرست باشد.

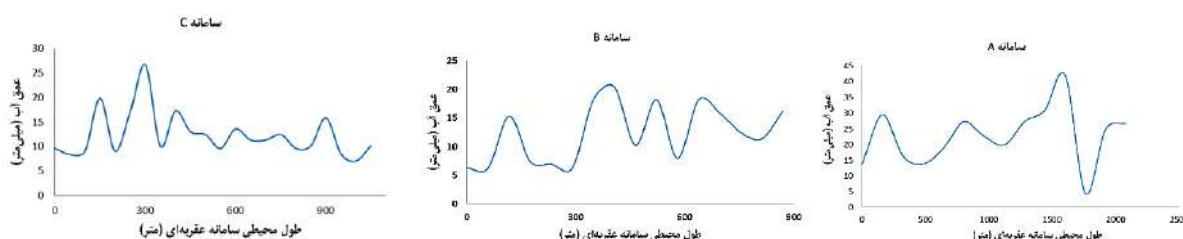
بزرسی دوره‌ای فشار در بخش‌های مختلف عقربه‌ای و تنظیم آن، بازرسی آبپاش‌ها برای اطمینان از عدم خرابی یا گیرکردن فنر آبپاش، کاهش ارتفاع پاشش در صورت بادخیز بودن منطقه برای کاهش تبخیر و بادبردگی، تنظیم سرعت دستگاه متناسب با فشار موجود تا آب به طور یکنواخت‌تری توزیع شود.

در مجموع، نمودارها حاکی از آن هستند که در هر سه سامانه، نوساناتی در عمق آب جمع‌آوری‌شده وجود دارد که با برنامه‌ریزی بهینه فشار و سرعت و رسیدگی به وضعیت نازل‌ها می‌توان تا حد زیادی این نوسانات را کاهش داد و راندمان و یکنواختی توزیع آب را بهبود بخشید.



شکل ۴. توزیع پراکنش آب جمع‌آوری شده در قوطی‌ها به صورت شعاعی در منطقه مورد مطالعه

شکل (۵) مقادیر عمق آب دریافتی توسط قوطی‌ها را برای سه سامانه A، B و C و برای آزمایش محیطی نشان می‌دهد. اگرچه انتظار می‌رود که عمق آب دریافتی در قوطی‌ها تقریباً باهم برابر باشند، اما عواملی از قبیل توپوگرافی زمین و پارامترهای مربوط به سامانه باعث شده است که غیر یکنواختی بالایی در توزیع آب مشاهده گردد. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در هر سه سامانه، وجود قله‌ها و دره‌ها نشان‌دهنده عدم یکنواختی توزیع آب در طول محیط عقربه‌ای است. سامانه A بیش‌ترین دامنه تغییرات (۰/۵۰ تا ۴ سانتی‌متر) را دارد و سامانه‌های B و C دامنه محدودتری دارند. طول محیط در سامانه A بزرگ‌تر است (حدود ۲۰۰۰ متر) و در سامانه‌های B (۹۰۰) و C (۱۰۰۰) متر است. در سامانه‌هایی با شعاع و محیط بزرگ‌تر (مانند سامانه A)، به دلیل افزایش طول لوله‌های لترال و زمان عبور جریان، احتمال بروز افت فشار و تأثیرپذیری از باد بیش‌تر است. اگرچه این موضوع از نظر تئوری شناخته شده است، اما نتایج این پژوهش نشان داد که این افت فشار و تلفات ناشی از بادبردگی، در شرایط اقلیمی دشت مغان با شدت بیش‌تری بر یکنواختی پاشش اثر می‌گذارد. با تحلیل هم‌زمان داده‌های میدان و مقادیر طراحی، نشان داده شد که اثر افت فشار در سامانه‌های با شعاع بیش‌تر، حتی با وجود تنظیم یکسان سرعت و فشار ورودی، منجر به کاهش قابل‌توجهی در شاخص DU می‌شود. این یافته می‌تواند در طراحی مجدد یا اصلاح سامانه‌های آبیاری بزرگ مقیاس مورد استفاده قرار گیرد. تنظیم فشار در نقاط مختلف محیطی با استفاده از فشارشکن یا کنترل‌کننده‌های فشار، بررسی و تعویض نازل‌های آسیب‌دیده یا پوسیده که الگوی پاشش را مختل کرده‌اند، زمان‌بندی آبیاری در ساعتی که وزش باد حداقل است، اجرای بازرسی دوره‌ای در صورت خرابی، نشست، یا گرفتگی، باعث افزایش یکنواختی پخش آب در سامانه‌ها خواهد شد. به‌طور کلی، این نمودارها نشان می‌دهد که هر سه دستگاه A، B و C با مقادیر گوناگون ناهمگنی در پخش آب مواجه‌اند. در سامانه A، به دلیل طول محیط بیش‌تر، شدت نوسانات بالاست. سامانه‌های B و C دامنه کم‌تری دارند؛ اما همچنان وجود پیک‌ها و دره‌ها، اهمیت نظارت و تنظیم دقیق دستگاه را یادآور می‌شود. با به‌کارگیری روش‌های مدیریتی و فنی مناسب، می‌توان این نوسانات را کاهش داد و راندمان آبیاری را بهبود بخشید.



شکل ۵. توزیع پراکنش آب جمع‌آوری شده در قوطی‌ها به صورت محیطی در منطقه مورد مطالعه

بحث

در این تحقیق، شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی سامانه‌های آبیاری در نظر گرفته شد که شامل ضریب یکنواختی کریستیان سن (CU)، یکنواختی توزیع (DU)، راندمان پتانسیل کاربرد در ربع پایین (PELQ) و راندمان واقعی در ربع پایین (AELQ) می‌شود. نتایج نشان داد که سامانه A دارای بالاترین تلفات تبخیر و بادبردگی (۳۱/۵۵ درصد) بود که این مقدار بالا می‌تواند به دلیل مشکلات در طراحی، مانند تنظیم نادرست نازل‌ها، عدم یکنواختی فشار در طول لوله‌های سامانه و ضعف در نگهداری تجهیزات

باشد. به‌طور کلی، سامانه A راندمان کاربرد کم‌تری نیز داشت (۶۸/۴۴ درصد) که به‌طور عمده به دلیل عدم یکنواختی توزیع آب و فرسودگی نازل‌ها و نشستی لوله‌ها بود. در مقایسه، سامانه C کم‌ترین تلفات تبخیر و بادبردگی (۱۵/۳۵ درصد) و بالاترین راندمان کاربرد آب (۸۴/۶۴ درصد) را نشان داد. سامانه C از نظر ساختاری به‌روزتر و کم‌تر فرسوده بوده است، در نتیجه نازل‌ها یکنواختی پاشش بهتری داشته‌اند و انسداد یا خوردگی کم‌تری در سامانه مشاهده شده است. داده‌های میدانی نشان می‌دهد که در سامانه C، افت فشار در طول لترال‌ها نسبت به دو سامانه دیگر کم‌تر بوده که این امر منجر به یکنواختی توزیع بالاتر و عملکرد بهینه آبپاش‌ها شده است. مصاحبه‌های میدانی با اپراتور سامانه و سوابق نگهداری نشان می‌دهد که در سامانه C، اقدامات دوره‌ای نظیر تنظیم سرعت، شست‌وشوی نازل‌ها و کنترل نشستی بادقت بیش‌تری انجام شده است. این موضوع، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش تلفات و افزایش راندمان داشته است.

نتیجه‌گیری

سامانه C به دلیل طراحی بهینه‌تر و نگهداری دقیق‌تر توانسته بود به عملکرد بهتری دست یابد. در سامانه C، مقدار راندمان پتانسیل کاربرد در ربع پایین (PELQ) (۶۰/۰۱ درصد) و راندمان واقعی در ربع پایین (AELQ) (۶۰/۰۱ درصد) نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از سایر سامانه‌ها بود که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر آب و کاهش تلفات غیرضروری بود. با این حال، سامانه B که در آن تلفات تبخیر و بادبردگی نسبتاً کم‌تر بود (۲۶/۱۱ درصد)، در سایر شاخص‌ها مانند یکنواختی توزیع (۲۵/۹۶ درصد) و راندمان پتانسیل کاربرد (۴۰/۲۴ درصد) نتایج ضعیف‌تری را نشان داد. این ضعف‌ها می‌تواند ناشی از مشکلات مدیریتی در تنظیم فشار، خرابی برخی از آبپاش‌ها و فرسودگی تجهیزات باشد که منجر به توزیع غیریکنواخت آب شده است. نتایج نشان می‌دهند که سامانه‌های عقربه‌ای، به‌ویژه در مناطقی با بادهای شدید، به‌طور بالقوه می‌توانند دچار تلفات قابل‌توجهی در تبخیر و بادبردگی شوند که این مسئله باعث کاهش راندمان آبیاری می‌شود. در نتیجه، توجه به تنظیم دقیق فشار آبپاش‌ها، انتخاب نازل‌های مناسب و کاهش ارتفاع پاشش برای جلوگیری از تأثیر باد در مناطقی با سرعت باد بالا از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، برای بهبود عملکرد سامانه‌ها، باید از بازرسی دوره‌ای سامانه‌ها و تعویض قطعات فرسوده (مانند نازل‌ها و لوله‌ها) استفاده شود. نتیجه‌گیری کلی این تحقیق نشان داد که سامانه C به‌عنوان بهترین عملکرد در بین سه سامانه مورد مطالعه شناخته شد. برای بهبود عملکرد سامانه‌های آبیاری در مناطقی با شرایط مشابه، بهینه‌سازی طراحی، نگهداری منظم و مدیریت فشار سامانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. باتوجه به نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در سامانه‌هایی با شعاع بالا (نظیر سامانه A) از نازل‌هایی با زاویه پاشش محدود و ارتفاع نصب پایین‌تر استفاده شود تا اثر بادبردگی به حداقل برسد. همچنین، نتایج نشان داد که افت فشار در طول لترال‌ها به‌طور مستقیم بر کاهش PELQ تأثیرگذار است، بنابراین پیشنهاد می‌شود طراحی فشار در طول سامانه با در نظر گرفتن توپوگرافی و افت اصطکاکی بازنگری شود. علاوه بر آن، در سامانه‌هایی که دچار افت عملکرد در DU هستند، ارزیابی میدانی فشار در انتهای لترال‌ها و پایش هفتگی وضعیت نازل‌ها، می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد عملیاتی مؤثر برای افزایش یکنواختی به‌کار گرفته شود.

آموزش کشاورزان: آموزش کشاورزان و اپراتورها در خصوص تنظیم فشار سامانه‌ها و توجه به زمان‌بندی مناسب آبیاری (به‌ویژه در ساعات کم‌باد) می‌تواند تأثیر زیادی در کاهش تلفات آب و افزایش بهره‌وری کشاورزی داشته باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به‌طور یکسان در مفهوم‌سازی مقاله و نوشتن پیش‌نویس‌های اصلی و بعدی مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

با تشکر از کشت صنعت و دامپروری مغان که اجازه داده‌برداری از سامانه‌های بخش ۷ را دادند.

منابع

- حسینی، یاسر، رئوف، مجید، و نظری گیگلو، فردین. (۱۳۹۹). ارزیابی و مدلسازی تلفات تبخیر و باد بردگی سامانه آبیاری عقربه‌ای در منطقه مغان. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۲۷(۵)، ۱۰۹-۱۲۷.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17532.3302>
- رئوف، مجید، حسینی، یاسر، و نظری گیگلو، فردین. (۱۳۹۷). ارزیابی سامانه کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک و مدل‌سازی تلفات تبخیر و باد بردگی در آبپاش مدل ADF 25^o در منطقه مغان. *مجله حفاظت منابع آب و خاک*، ۴(۷)، ۱۱۷-۱۳۴.
<https://sanad.iau.ir/Journal/wsrcj/Article/828917>
- زارع ابیان، حمید، دانایی، اعظم، اخوان، سمیرا، و جوزی، مهدی. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبیاری نوین در شهرستان همدان. *مجله مدیریت آب و آبیاری*، ۱۰(۳)، ۳۸۱-۳۹۵.
<https://doi.org/10.22059/jwim.2021.300563.784>
- علیزاده، امین. (۱۳۹۰). طراحی سیستم‌های آبیاری تحت فشار. *انتشارات آستان قدس رضوی*، مشهد، ایران.
<https://www.gisoom.com/book/1775759>
- فاریابی، ارسلان، معروف‌پور، عیسی، و قمرنیا، هوشنگ. (۱۳۸۹). بررسی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری بارانی کلاسیک ثابت دشت دهگلان کردستان. *مجله علوم آب و خاک*، ۱۴(۵۴)، ۱-۱۶.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1389.14.54.1.0>
- کریمی، ندا، دهقان، دریا، مولودی، شاهو، سی و سه مرده، عادل، و معروف‌پور، عیسی. (۱۴۰۲). بررسی اثر سرعت چرخش، عامل چرخش و مدت زمان آبیاری بر تلفات تبخیر و بادبردگی آبپاش‌های کشاورزی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب/ایران*، ۱۴(۲)، ۱۱۳-۱۳۰.
<https://doi.org/10.22125/iwe.2023.381413.1700>
- نادری، نادر، و قدمی فیروزآبادی، علی. (۱۴۰۲). بررسی عملکرد سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای و بهره‌وری مصرف آب در برخی از مزارع استان سمنان. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب/ایران*، ۱۳(۴)، ۱۴۹-۱۶۴.
<https://doi.org/10.22125/iwe.2023.173252>
- نصرالهی، زهرا، بابازاده، حسین، و سرائی تبریزی، مهدی. (۱۳۹۶). ارزیابی هیدرولیکی عملکرد سامانه‌های آبیاری عقربه‌ای در شرایط متفاوت اقلیمی. *محیط زیست و مهندسی آب*، ۳(۳)، ۲۳۴-۲۲۵.
https://www.jewe.ir/article_51757.html

References

- Agyeman, B. T., Bo, S., Sahoo, S. R., Yin, X., Liu, J., & Shah, S. L. (2023). Soil moisture map construction using microwave remote sensors and sequential data assimilation. *arXiv preprint arXiv*, 2010.07037. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.07037>
- Alizadeh, A. (2011). Design of pressurized irrigation systems. Fifth edition. *Astan Quds Razavi Publications*, Mashhad, Iran. <https://www.gisoom.com/book/1775759> [In Persian]
- ASAE Standards. (2003). Test procedure for determining the uniformity of water-distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. *ANSI/ASAE Standard S436.1 DEC01*, 931-938. https://www.canr.msu.edu/uploads/235/67987/ASAE_S436.1.pdf?utm
- Ben Charfi, I., Corbari, C., Skokovic, D., Sobrino, J., & Mancini, M. (2021). Modeling of water distribution under center pivot irrigation technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(7), 04021024. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001571)
- Brennan, D. (2008). Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. *Irrigation Science*, 26(2), 109-119. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0077-9>
- Darko, R. O., Shouqi, Y., Junping, L., Haofang, Y., & Xingye, Zh. (2017). Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. *Agricultural and Biological Engineering*, 10 (2), 1-15. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20171002.1817>
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J. M., & Tejero, M. (2003). Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: I. Characterisation and water use assessment. *Agricultural Water Management*, 61(2), 75-92. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00020-9)
- Faryabi, A., Maroufpour, I., & Qamarnia, H. (2010). Investigation and evaluation of classical fixed sprinkler irrigation systems in Dehgolan plain Kurdistan. *Soil and Water Sciences*. 14 (54), 1-16. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1389.14.54.1.0> [In Persian]
- Hanson, B. R., & Orloff, S. B. (1996). Rotator nozzles more uniform than spray nozzles on the center-pivot sprinklers. *California Agriculture*, 50, 32-35. <https://doi.org/10.3733/ca.v050n01p32>
- Hoseini, Y., Raoof, M., & Nazari-Gigloo, F. (2020). Evaluation and Modeling Wind drift and Evaporation Losses of the Center Pivot Irrigation System in Moghan Region. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(5), 109-127. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17532.3302> [In Persian]
- Karimi, N., Dehghan, D., Moloudi, S., & Siosemardeh, A. (2023). Investigating the effect of rotation speed, rotation factor, and irrigation duration on wind drift and evaporation losses of agricultural sprinklers. *Irrigation and Water Engineering*, 14(2), 113-130. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.381413.1700> [In Persian]
- Keller, J., & Bliesner, RD. (1990). Sprinkle and Trickle Irrigation. Van Nostrand Reinhold. *New York Press*, New York, USA. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=599708>
- López-Mata, E., Tarjuelo, J. M., De Juan, J. A., Ballesteros, R., & Domínguez, A. (2010). Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. *Agricultural Water Management*, 98(1), 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.006>
- Markley, P., & Allen, G. (2004). Sprinkle and trickle irrigation lecture notes. *Utah state university*, Logan, Utah, USA. <https://pdfcoffee.com/sprinkle-amp-trickle-irrigation-lecture-notespdf-pdf-free.html>
- Merriam, J.L., & Keller, J. (1978). Farm irrigation system evaluation: a guide for management. *Utah State University*, Logan, Utah, USA. https://digitalcommons.usu.edu/cee_facpub/3779/
- Naderi, N., & Ghadami Firouzabadi, A. (2023). Performance Evaluation of Center Pivot Irrigation Systems and Water Productivity in Some Farms of Semnan Province. *Irrigation and Water Engineering*, 13(4), 149-164. <https://doi.org/10.22125/iwe.2023.173252> [In Persian]

- Nasrolahi, Z., Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2017). Hydraulic Evaluation of Center Pivot Irrigation Systems Performance in Different Climate Conditions. *Environment and Water Engineering*, 3(3), 225-234. https://www.jewe.ir/article_51757.html [In Persian]
- Rana, M. A., Arshad, M., & Masud, J. (2006). Effect of basin, furrow and raingun sprinkler irrigation systems on irrigation efficiencies, nitrate-nitrogen leaching and yield of sunflower. *Pakistan Journal of water resources*, 10(2), 1-7. <https://sswm.info/index.php/node/2780>
- Raoof, M., hoseini, Y., & nazari, G. F. (2018). Evaluation of classic semi-permanent sprinkler SYSTEM and modeling evaporation losses and wind drift in adf 25 nozzle sprinkler model in moghan region. *Water and soil resources conservation*, 2(4), 91-106. <https://sanad.iau.ir/Journal/wsrcj/Article/828917> [In Persian]
- Roland, L. (1982). Mechanized sprinkler irrigation. *FAO irrigation and drainage*, Rome, Italy. <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/37d3e821-2d61-4e72-bc85-0cdd9a9ad82e/download>
- Tarjuelo, J. M., Montero, J., Honrubia, F. T., Ortiz, J. J., & Ortega, J. F. (1999). Analysis of uniformity of sprinkler irrigation in a semi arid area. *Agric. Water Manag*, 40 , 315-331. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(99\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(99)00006-2)
- Zare Abyaneh, H., Danaii, A. , Akhavan, S., & Jovzi, M. (2020). Performance evaluation of new irrigation systems in Hamedan. *Water and Irrigation Management*, 10(3), 381-395. <https://doi.org/10.22059/jwim.2021.300563.784> [In Persian]
- Zeyliger, A. M., Ermolaeva, O. S., & Pchelkin, V. V. (2023). Assessment of irrigation efficiency by coupling remote sensing and ground-based data: case study of sprinkler irrigation of Alfalfa in the Saratovskoye Zavolgie Region of Russia. *Sensors*, 23(5), 2601. <https://doi.org/10.3390/s23052601>



Analysis of the efficiency of irrigation technologies in Kermanshah province based on the technology atlas model

Ameneh Abdi ¹ , Ali Asghar Mirakzadeh ^{2✉} , and Farzad Eskandari ³

1. Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: amane.abdi@gmail.com

2. Corresponding author, Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: Mirakzadeh@razi.ac.ir

3. Department of Agricultural Economy, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran E-mail: f.eskandari@uok.ac.ir

Article Info.

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 August 2025

Received in revised form 10 December 2025

Accepted 12 March 2026

Available online 23 september 2026

Keywords:

management,
technology assessment,
irrigation,
sustainable development.

ABSTRACT

Objective: The study evaluated the effectiveness of existing irrigation technologies in Kermanshah Province, Iran, focusing on the contribution of different technological dimensions. The Technology Atlas Model was used to identify the strengths and weaknesses of each dimension.

Method: The study used an applied survey design involving 90 farmers, agricultural experts, and professional association members selected through judgmental sampling. Data were collected using an adapted Technology Atlas Model questionnaire, whose validity was confirmed by experts and reliability by Cronbach's alpha ($\alpha = 0.78$). The Technology Atlas Method was then used to assess the relative importance, priority, and contribution of each technology component to water-use efficiency.

Results: The respective contribution of each technology dimension, including org-ware, tech-ware, human-ware, and info-ware, is equal: $O\beta O = 0.21$, $T\beta t = 0.20$, $H\beta h = 0.08$, and $I\beta i = 0.05$. Accordingly, the current prioritization of irrigation technology dimensions in Kermanshah Province was ranked as Orgaware > Technoware > Humanware > Infoware ($O > T > H > I$). The overall importance of all technological dimensions was measured using an index known as the Technology Contribution Coefficient (TCC), which was calculated to be 0.54.

Conclusions: This index, representing the aggregated status of the four technological dimensions, indicates that the overall level of attention and investment in the various dimensions of irrigation technologies in Kermanshah Province has currently reached only 54% of its optimal capacity. More than half of the potential capacity remains untapped. The findings of the study can be applied in the management, design, and development of irrigation technologies within the agricultural sector.

Cite this article: Abdi, A., Mirakzadeh, A.A., & Eskandari, F. (2026). Analysis of the efficiency of irrigation technologies in Kermanshah province based on the technology atlas model. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 74-99. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12630.1186>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12630.1186>

Publisher: Razi University.

Introduction

Water is the most critical input in agricultural production. In many regions worldwide, especially arid and semi-arid areas, water scarcity poses a primary challenge to achieving sustainable agricultural development. In addition to this difficulty, insufficient attention to the appropriateness and efficiency of irrigation systems—stemming from the continued use of improper technologies—has become a fundamental barrier on the path to sustainable agricultural development. An accurate understanding of the current status of each system and its associated processes is a critical first step for informed decision-making and policy formulation to optimize technology management. This principle applies equally to decisions and investments concerning equipment, human resources, and knowledge related to irrigation-focused technologies. The integration of these factors within the context of technology implementation requires precise and strategic management. Effective management depends on thorough evaluation, comprehensive knowledge, and a deep understanding of the technology's condition and performance. Technology evaluation models are essential tools for effective technology management, enabling proper oversight of technology components and ensuring the overall success of the system. The current study seeks to examine and evaluate the irrigation technologies currently utilized in the agricultural sector of Kermanshah Province (Located in the west of Iran), with a specific focus on the unique role of each technological dimension.

Method

The Atlas Technology Model, leveraging its robust capabilities, was employed for this study. This research is applied in purpose and utilizes a survey-based approach for data collection. The study population consisted of three groups: farmers, experts, and trade associations (implementing companies and water-based technology design companies). Experts who were knowledgeable and experienced in the field of water and irrigation technologies, as well as two groups of designers and farmers who were recognized as competent by the regional water company (127 people). In the experts section; it included the Department of Agricultural Jihad, Regional Water Affairs of Kermanshah Province, faculty members of the Water Department of Razi University, and the Agricultural Jihad and Natural Resources Research Center. In the farmers section, the irrigated farmers of Kermanshah Province, according to different climates and geographical divisions, were the counties (Kermanshah, Kangavar, Ravansar, Islamabad Gharb, and Sarpol Zahab) with the largest area of irrigated cultivation according to the dominant cropping pattern (wheat, barley, rapeseed, corn, tomato, potato) in the 2023-2024 crop year, which were considered to be the leading farmers in terms of using irrigation technology. Therefore, the sample selection method was judgmental and in total, 90 questionnaires were completed for all three respondent groups without any statistical problems and analysis was conducted based on them ($n = 90$). The main data collection tool was the standard Atlas model questionnaire, which was adapted to the agricultural context. The content validity of the questionnaire was confirmed by experts and its reliability was also confirmed with the help of Cronbach's test ($\alpha = 0.78$). Data analysis was then performed using Excel software, the Critical Method, and the Atlas Technology Method.

Results

The Atlas Technology Model evaluated the contribution of each technological dimension individually. The contribution of each technological dimension—Orgaware ($O\beta O = 0.21$), Technoware ($T\beta t = 0.20$), Humanware ($H\beta h = 0.08$), and Infoware ($I\beta i = 0.05$)—was assessed for irrigation technologies in Kermanshah Province. Based on these contributions, the irrigation technology dimensions in Kermanshah Province are prioritized as follows: Orgaware > Technoware > Humanware > Infoware ($O > T > H > I$). The collective importance of the technological dimensions was assessed using the Technology Contribution Coefficient (TCC), a composite index, which yielded a value of 0.54. To compare the technological dimensions, the THIO diagram is utilized. The THIO diagram not only enables comparison of the four technological dimensions but also illustrates the gap between each dimension and the optimal level of 100% (Figure 1). The collective importance of the technological dimensions was evaluated using the Technology Contribution Coefficient (TCC), a composite index, which yielded a value of 0.54. The Technology Contribution Coefficient (TCC), a composite index reflecting the cumulative status of the four technological dimensions, indicates that the current attention and investment in irrigation technologies in Kermanshah Province have achieved only 54% of their optimal capacity. This indicates that over half of the potential capacity remains unrealized.

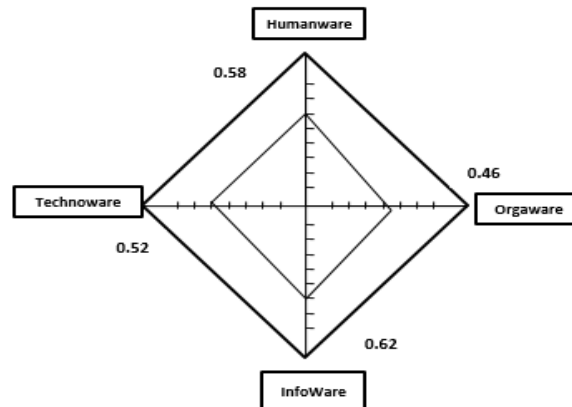


Figure1. THIO chart

Conclusions

The findings from the analysis conducted through the Atlas Technology method indicated a relatively positive evaluation of all factors by the respondents. However, from the respondents' perspective, some factors have greater importance in technology advancement. Technology is not merely a technical phenomenon; it is a four-dimensional system, each component of which has been individually examined and evaluated. Analyzing only a single dimension, even a critical one like hardware (e.g., irrigation systems), results in an incomplete understanding of the technology's status. The evaluation of the Infoware dimension reveals that the information, data, and tacit knowledge associated with the technology remain below

optimal levels. This may arise from challenges such as deficiencies in information infrastructure, limited access to consistent and updated training, or inefficiencies in agricultural information systems. The information gap may stem from inadequate knowledge exchange structures among stakeholders, deficiencies in transferring knowledge to farmers, or limited communication channels. Therefore, enhancing knowledge exchange infrastructure, developing knowledge-based networks, and providing ongoing user training are critical for improving the effectiveness of technological information.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors of the article would like to thank the faculty members, experts, and farmers who collaborated with the researchers at various stages of the work, especially in providing information.

Ethical Considerations

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

Funding

Financial support for this research was provided by Razi University, Faculty of Agriculture in the form of research for the first author's student thesis and research for other authors.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this Article.



تحلیل کارایی فناوری‌های آبیاری در استان کرمانشاه بر اساس مدل اطلس فناوری

آمنه عبدی^۱، علی اصغر میرک زاده^۲✉، و فرزاد اسکندری^۳

۱. گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: amane.abdi@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: Mirakzadeh@Razi.ac.ir

۳. گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: f.eskandari@uok.ac.ir

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: آبیاری، فناوری، توسعه پایدار، مدیریت، ارزیابی.	هدف: پژوهش حاضر بررسی و تحلیل کارایی فناوری‌های آبیاری موجود در کشاورزی استان کرمانشاه (واقع در غرب کشور ایران) با در نظر گرفتن نقش مجزای هریک از ابعاد فناوری بود، باتوجه به قابلیت‌های مدل اطلس فناوری در شناسایی دقیق و تفکیک شده نقاط ضعف و قوت در هر بعد از فناوری، از این مدل استفاده شد. روش پژوهش: حاضر از حیث هدف کاربردی و از نظر شیوه گردآوری داده‌ها از نوع پیمایشی است. جامعه مورد مطالعه شامل سه بخش کشاورزان، کارشناسان و انجمن صنفی (شرکت‌های مجری و شرکت‌های طراح فناوری‌های آب محور) متخصص در این حوزه که به صورت نمونه‌گیری قضای بر اساس جدول مورگان انتخاب شدند ($n=90$). ابزار اصلی گردآوری داده‌ها پرسش‌نامه استاندارد مدل اطلس بود که باتوجه به بستر کشاورزی مناسب‌سازی شده بود. روایی محتوایی پرسش‌نامه به تأیید خبرگان و کارشناسان رسیده و میزان پایایی آن نیز به کمک آزمون کرونباخ مورد تأیید قرار گرفت (۰/۷۸). با استفاده از مدل اطلس فناوری به بررسی میزان اهمیت و ارجحیت هر یک از اجزای فناوری و سهم هر کدام در میزان بهره‌وری آب پرداخته شد. یافته‌ها: سهم هر بعد فناوری که شامل سازمان‌افزار، فن‌افزار، انسان‌افزار، و اطلاعات‌افزار است به ترتیب برابر ۰/۲۱، $O^{\beta O} = 0$، $T^{\beta t} = 0/۲۰$، $H^{\beta h} = 0/۰۸$، $I^{\beta i} = 0/۰۵$ بود که نشان‌دهنده ارجحیتی است که در حال حاضر به هر یک از ابعاد فناوری‌های آبیاری در استان کرمانشاه نسبت به یکدیگر داده می‌شود، و به این صورت $O > T > H > I$ است. میزان اهمیت کل ابعاد فناوری توسط شاخصی به نام ضریب کمک فناوری (TCC) محاسبه شد که برابر ۰/۵۴ است. نتیجه‌گیری: این شاخص که وضعیت تجمیعی چهار بعد فناوری را بازنمایی می‌کند بدین معناست که میزان کلی توجه و سرمایه‌گذاری روی ابعاد مختلف فناوری‌های آبیاری در استان کرمانشاه در وضعیت کنونی تنها ۵۴ درصد ظرفیت مطلوب خود را محقق کرده است. بدین معنا که بیش از نیمی از ظرفیت‌های بالقوه هنوز بالفعل نشده‌اند. یافته‌های تحقیق می‌تواند در مدیریت، ساخت و توسعه فناوری‌های آبیاری در بخش کشاورزی به کار رود.

استناد: عبدی، آمنه؛ میرک زاده، علی اصغر؛ و اسکندری، فرزاد. (۱۴۰۵). تحلیل کارایی فناوری‌های آبیاری در استان کرمانشاه بر اساس مدل اطلس فناوری.

فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۳)، ۹۹-۷۴.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12630.1186>



© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.

مقدمه

آب به‌عنوان یکی از نهاده‌های اساسی در تولیدات بخش کشاورزی، از جایگاه ممتازی در توسعه این بخش برخوردار است. در دهه‌های اخیر با رشد جمعیت، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی و همچنین توسعه صنعت و کشاورزی، برداشت از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مهم‌ترین تأمین‌کننده آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز به طور چشمگیری افزایش یافته و منجر به پیشی گرفتن تقاضا بر عرضه منابع آب و ایجاد بحران در اغلب این مناطق شده است. به‌طوری‌که طی سال‌های اخیر بهره‌برداری غیربهبینه از منابع آبی، خشکسالی و رشد جمعیت موجب گردیده تا نهاده آب به‌عنوان یک عامل محدودکننده تولید کشاورزی در تمام نقاط کشور ایفای نقش کند (محمدی و همکاران، ۲۰۲۴؛ خودایو و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ کرامت‌زاده و همکاران^۲، ۲۰۱۶؛ بلالی و همکاران^۳، ۲۰۱۱). همچنین مقایسه میانگین بارندگی سالانه کشور (۲۲۱ میلی متر) با میانگین بارندگی سالانه در سطح کره زمین (۸۵۰ میلی متر) شاهد این ادعا است (فائو^۴، ۲۰۲۵). از طرفی باتوجه‌به اینکه آب‌های زیرزمینی از منابع طبیعی تجدید شونده محسوب می‌شوند که بهره‌برداری معقولانه و متعادل منجر به استفاده پایدار می‌شود. اما برداشت بی‌رویه در سال‌های اخیر، منجر به کاهش آب‌های زیرزمینی شده و پایداری آن‌ها را به خطر انداخته است. بی‌شک یکی از مهم‌ترین ابزارها در کنترل و مدیریت تقاضای منابع آب و کاهش بحران حاصل از آن، بهره‌گیری از ابزارهای اقتصادی و لحاظ نمودن ارزش اقتصادی آب در فعالیت‌های کشاورزی به‌عنوان بزرگترین مصرف‌کننده آن است. در این مسیر بهره‌گیری از فناوری‌های آبیاری به‌روز و سازگار یکی از مهم‌ترین عوامل کلیدی و اصلی مورد اشاره قرار گرفته است (بلالی و کسبیان لعل، ۱۴۰۰؛ ژانگ و همکاران^۵، ۲۰۱۹). مطالب ارائه شده حاکی از آن است که آب در کشاورزی نقش اساسی را در تأمین مواد غذایی در جهان دارد و جهت تأمین غذایی جمعیت در حال رشد مسلماً به آب بیشتری نیاز است. در واقع می‌توان گفت رابطه بین مصرف آب و تضمین امنیت غذایی در نگاه اول متناقض به نظر می‌رسد، چرا که از یک طرف برای حفظ محیط‌زیست و تضمین امنیت غذایی برای نسل‌های آینده باید آب کمتری مصرف گردد، از طرف دیگر استفاده بیشتر از آب در کشاورزی به معنی تولید بیشتر مواد غذایی است؛ بنابراین، حل این تناقض ظاهری، نیازمند بازنگری کامل در مورد چگونگی استفاده از آب و به‌کارگیری ابزارهای مناسب در بخش کشاورزی و داشتن نگاه سیستمی به عناصر مورد نیاز در کشاورزی است (زاهدپور یگانه و همکاران، ۱۴۰۴؛ لاکخار و همکاران^۶، ۲۰۲۴). در واقع برای استخراج آب در منابع زیرزمینی و استفاده از آن برای تولید محصولات کشاورزی، فناوری به روز و مناسب نیاز است به‌طوری‌که می‌توان گفت این فناوری‌ها هستند که برای تولید مواد غذایی به هم پیوسته‌اند و اهمیت و کارکرد هر یک وابسته به وجود دیگری است.

بنابراین، باتوجه‌به وجود مشکلات کم‌آبی زمین‌های زراعی در بیشتر مناطق کشور در زمان‌های مختلف، لازم است شیوه‌های مناسبی برای استفاده بهینه آب در بخش کشاورزی اتخاذ نمود. باتوجه‌به تغییرات آب‌وهوایی و مصرف بی‌رویه آب، جلوگیری از هدررفت آب نیازمند جستجوی راهکارهای مدیریتی مناسب جهت افزایش کارایی استفاده از آب است. در این راستا به‌کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری و کنترل برخط راه‌حلی مناسب برای بهره‌وری بهتر و تولید بیشتر به‌منظور پوشش جمعیت کشور می‌شود (لاخار و همکاران، ۲۰۲۴؛ عبدی و میرک‌زاده، ۱۴۰۱). یکی از اقدامات ارزنده‌ای که در سال‌های اخیر در راستای بهبود بهره‌وری مصرف آب و سازگاری با اقلیم خشک ایران صورت گرفته توجه خاص به توسعه فناوری‌های آبیاری است. اما از نظر کمی هنوز راه نرفته زیادی در این زمینه در پیشرو است. در واقع در ایران به دلیل عدم توسعه فناوری‌ها و اهمیت اجرای آن، دقت کافی در توسعه فناوری‌ها به عمل نیامده و در اکثر موارد در عمل به جنبه‌های فنی کمتر توجه شده و توسعه فیزیکی در اولویت اصلی بوده است. این امر موجب شده که اهداف موردانتظار محقق نگردد (اعلم‌الهدی، ۱۳۹۴). در واقع، تداوم موج خشکسالی و محدودتر شدن منابع آبی موجب شده است که بخش کشاورزی برای بهره‌برداری بهینه‌تر از آب، به استفاده از سیستم‌های نوین آبیاری روی بیاورد.

¹ Xudayev et al² Keramatzadeh et al³ Balali et al⁴ FAO⁵ Zhang et al⁶ Lakhiar et al

به طوری که با بهینه تر کردن مصرف آب راهکار مناسبی برای کشورهایی نظیر ایران باشد که دچار مشکل کم آبی هستند. بحران تأمین غذا از یک طرف و حفظ و پایداری تولید از طرف دیگر لزوم استفاده از فناوری های نوین را در این زمینه گوشزد می کند (باقری، ۱۳۹۹).

به طوری که می توان گفت فناوری با تغییر وسایل زندگی و راحتی کارها تغییر الگوهای رفتاری و شیوه های ارتباطی در جامعه را به دنبال داشته است و بهره برداری از طبیعت به صورتی بهتر امکان پذیر شده است و نهایتاً به لحاظ زمانی و ابزاری امکانات بیشتری را جهت تفحص و شناخت بیشتر در اختیار انسان قرار داده است؛ بنابراین، فناوری امروزه نه به عنوان یک انتخاب بلکه به عنوان یک ضرورت جلوه گر شده است؛ لذا، باتوجه به اهمیت علم و فناوری و اثرگذاری آن بر جوامع بشری لازم است، علم و فناوری به عنوان یک مسئله حیاتی و نیروی محرکه پیشرفت و توسعه پایدار و رسیدن به رفاه و استقلال واقعی جامعه در اولویت قرار گیرد. در این راستا، طراحی و ترویج روش های نوین علمی و فناورانه در مدیریت کارآمد فناوری های نوین آبیاری و به کارگیری و به روزرسانی های به موقع و متناسب با شرایط موجود می تواند جهت حفاظت از منابع آبی و نیز دستیابی به توسعه پایدار مؤثر واقع شود (شهمیرزادی و همکاران، ۱۳۹۸؛ میرعمادی، ۱۳۹۸؛ هرفوچه و همکاران^۱، ۲۰۲۵). بر همین اساس توجه به فناوری و برنامه ریزی صحیح در راستای به کارگیری آن در تولید محصولات از وظایف مهم مدیریت فناوری است که در سال های اخیر در کشور ما نیز لزوم توجه به این مبحث مورد توجه جدی قرار گرفته است. مدیریت بدون ارزیابی، نمی تواند دانش و شناخت کافی از وضعیت و عملکرد فناوری داشته باشد؛ لذا، یکی از بخش های مهم مدیریت فناوری بررسی و ارزیابی نقاط قوت و ضعف سیستم موجود و تعیین شکاف بین سطح قابلیت های موجود و سطح بهینه است (مونگیا و همکاران^۲، ۲۰۲۱). در اصل این رویه، متمرکز بر نقاط قوتی است که باید به آن ها تکیه کرد و در رفع نقاط ضعف کوشید. به طور کلی در ارزیابی فناوری، با نگاهی هدف دار تغییرات فناوری مدنظر است، و در صدد شناسایی وضعیت موجود در فناوری و کمک به مدیریت و توسعه آن است. در واقع، محدودیت منابع آب ما را بر آن می دارد تا با برنامه ریزی دقیق از منابع آب فصلی و سایر منابع به نحو صحیح استفاده نمود و از تکنیک ها و تجارب علمی نوین در سطح کشت آبی بهره جست. بحران های ناشی از کمبود منابع آب به عنوان تهدیدی جدی در توسعه پایدار، محیط زیست، سلامت و رفاه انسان ها مطرح است (نیکزاد و همکاران، ۱۴۰۴) و این مسئله باتوجه به تغییرات جهانی اقلیم در آینده بحران های دیگری را پیشروی برنامه ریزان و سیاست گذاران قرار می دهد؛ بنابراین یکی از گزینه های نو، مدیریت صحیح فناوری های نوین و شناخت و به روزرسانی و به کارگیری روش های نوین آبیاری به موقع و متناسب با شرایط است که از طریق ارزیابی عملکرد فناوری امکان پذیر است (مونگیا و همکاران، ۲۰۲۱). برای ارزیابی شرایط یا وضعیت موجود در یک بخش معین منطقه، مدل ممیزی بکار می رود. ممیزی فناوری تجزیه و تحلیلی است که برای شناسایی و نقاط قوت و ضعف فناوری های موجود بکار می رود و هدف از آن این است که موقعیت فناوری را در مقایسه با رقبا و بهترین حالت موجود ارزیابی کند (ویوی و همکاران^۳، ۲۰۲۱). به طور کل می توان گفت، علی رغم اهمیت روزافزون ارزیابی فناوری های آبیاری نوین و گستردگی مطالعات انجام شده در این حوزه، غالب تحقیقات پیشین عمدتاً بر پذیرش کلی فناوری یا کارایی تجمعی آن متمرکز بوده اند. این رویکرد کلی نگر، درحالی که اطلاعات ارزشمندی فراهم می کند، از تفکیک و تحلیل نقش مجزای مؤلفه های تشکیل دهنده فناوری غافل مانده و بنابراین تصویر کاملی از نقاط ضعف و قوت زیرساختی ارائه نمی دهد. اما پژوهش حاضر باهدف رفع این کاستی و تعمیق نگاه تحلیلی، دو نوآوری اساسی را در چارچوب خود جای داده است:

۱. تمرکز بر تحلیل ابعادی فناوری: این مطالعه فراتر از ارزیابی کلی، بر تحلیل جزئی و تفکیکی نقش مجزای هریک از ابعاد فناوری (مانند سخت افزار، انسان افزار، سازمان افزار و اطلاعات افزار) در کشاورزی استان کرمانشاه متمرکز است. این تفکیک امکان می دهد تا مشخص شود که در کدام بُعد، نیاز به مداخله و سیاست گذاری وجود دارد.

¹ Harfouche et al

² Munguia et al

³ Wiewie et al

۲. استفاده از مدل اطلس فناوری (TAM) برای نیل به این هدف جزئی‌نگر، از یک چارچوب نظام‌مند و ساختاریافته بین‌المللی یعنی مدل اطلس فناوری بهره گرفته شده است. این مدل، امکان تحلیل دقیق، جامع و مقایسه‌پذیر وضعیت فناوری‌های موجود را فراهم می‌آورد. این مدل تاکنون در ارزیابی تکنولوژی‌ها در بخش کشاورزی و به‌خصوص تکنولوژی‌های آبیاری استفاده نشده و پژوهش حاضر با مناسب‌سازی شاخص‌ها و مؤلفه‌های مدل در بخش کشاورزی زمینه کاربردی این مدل را برای فناوری‌های آب‌محور و سایر فناوری‌های بخش کشاورزی فراهم کرده است.

این تمایز روش‌شناختی، پژوهش حاضر را از تحلیل‌های عمومی پیشین متمایز ساخته و منجر به ارائه پیشنهاد‌های سیاستی متمایز و هدفمندی خواهد شد که دقیقاً بر ابعاد نیازمند توسعه در فناوری‌های آبیاری منطقه تمرکز دارند؛ بنابراین مطالعه حاضر به‌منظور کمک به مدیریت مناسب فناوری در سطح سامانه‌های آبیاری کشاورزی استان کرمانشاه صورت گرفته و به کمک روش اطلس فناوری سعی شده با ارزیابی تمامی ابعاد فناوری، گزارشی مناسب از وضع فناوری و اجزای آن به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران ارائه شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

باوجود ادبیات نظری تقریباً گسترده در زمینه مسائل مربوط به فناوری‌ها به‌طور کلی و فناوری‌های نوین مؤثر در زمینه کشاورزی، تحقیقات میدانی محدودی در زمینه بهینه‌سازی این فناوری‌ها، چگونگی مدیریت صحیح کاربرد فناوری نوین جهت جلوگیری از هدررفت آب و بهبود کشاورزی انجام شده است. همچنین نوع نگاه به سامانه‌های آبیاری و عوامل مؤثر بر آن‌ها کلی بوده، و داده‌های تجربی در مورد طبیعت این مفهوم و ارزیابی ابعاد این فناوری‌های آب‌محور به طور جداگانه یافت نشده است. سوالی که اینجا پیش می‌آید این است که باوجود تحقیقات انجام شده در زمینه احداث و توسعه و بهسازی شبکه‌های آبیاری و فناوری‌های نوین آب، چرا مسئله بهره‌وری آب همچنان به قوت خود باقی است؟ فناوری‌های موجود توزیع آب در مزارع بر اساس ابعاد مختلف فناوری چگونه ارزیابی می‌شوند؟ پاسخ به این سؤال در جهت روشن‌شدن وضعیت فعلی فناوری و تناسب آن با شرایط کشاورزان بحث جدیدی در مدیریت بهینه آب و فناوری (حداقل در ادبیات موجود در ایران) است که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. اینکه شاید بتوان گفت گرفتاری در این شرایط علاوه بر عدم مدیریت صحیح در به‌کارگیری فناوری‌های مناسب، تاکنون در این زمینه تحقیق انجام نشده که تمامی ابعاد فناوری را به طور مجزا مورد ارزیابی قرار دهد؛ بلکه تنها به‌طور کلی و شاید در نگاه عموم بعد سخت‌افزاری آن بیشتر موردتوجه قرار گرفته است.

در واقع برای استفاده بیشتر از آب در بخش کشاورزی در چارچوب مدیریت و ارزیابی فناوری پژوهش‌های زیادی انجام نشده و پژوهشی که ابعاد فناوری‌های آبیاری در کشاورزی را به طور جداگانه و با استفاده از مدل‌های ارزیابی مورد بررسی تاکنون انجام نشده است. بر همین اساس توجه به توسعه فناوری و ارزیابی آن در راستای به‌کارگیری فناوری در تولید محصولات از وظایف مهم مدیریت فناوری است که در سال‌های اخیر در کشور ما نیز لزوم توجه به این مبحث موردتوجه جدی قرار گرفته است؛ بنابراین در این مطالعه سعی شده است با تمرکز بر مدیریت بهینه آب در بخش کشاورزی با ارزیابی فناوری در انتخاب و به‌کارگیری فناوری‌های مناسب، این بعد از توسعه بخش کشاورزی استان کرمانشاه مورد کنکاش قرار گیرد. باتوجه به این مهم در این پژوهش به بررسی و ارزیابی فناوری‌های آبیاری موجود در کشاورزی استان کرمانشاه با در نظر گرفتن تمامی ابعاد آن پرداخته شده است. در این راستا برای اولین بار از روش اطلس فناوری برای ارزیابی فناوری‌های نوین آب‌محور در بخش کشاورزی جهت بهینه‌سازی مصرف منابع آب و میزان اهمیت اجزای فناوری‌های آبیاری انجام شده است. در واقع به‌کارگیری مدل اطلس جهت تجزیه و تحلیل و سنجش موقعیت کنونی و تعیین نقاط ضعف و قوت و سطح فناوری برای رسیدن به وضعیت مطلوب است، و اینکه به هر کدام از ابعاد فناوری‌های آبیاری به چه میزان اهمیت داده می‌شود؟ در واقع نهادینه‌سازی نگاه چندبعدی به فناوری و دنبال کردن اهداف چندگانه در کنش‌ها و اقدامات مدیریت کشاورزی چه در سطح سازمان‌های دولتی و چه در بین کشاورزان انگاره‌ای است که در این تحقیق دنبال گردیده است.

بررسی پیشینه پژوهش بحران آب در ایران و همین‌طور بررسی پیشینه پژوهشی مدیریت فناوری نشان می‌دهد تاکنون تحقیقی در زمینه بررسی ارزیابی ابعاد فناوری در رابطه با حوزه کشاورزی و به‌ویژه آب انجام نشده است. به‌طوری که خلأ پژوهشی جدی در بررسی نقاط ضعف و قوت فناوری‌های آبیاری و ارتباط آن با توسعه پایدار آب در بخش کشاورزی وجود دارد. باتوجه به اینکه در هیچ پژوهشی این مسائل را در کنار هم مورد بررسی قرار نداده، در ادامه سعی شده تا حد مقدور پژوهش‌های انجام شده مرتبط با این پژوهش آورده شوند.

۱. مطالعات داخل کشور

محمدیان و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهش خود با عنوان بررسی کاربرد فناوری‌های نوآورانه شناسایی شده بر اساس شاخص‌های توسعه پایدار دریافتند که وزن شاخص‌های توسعه پایدار، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی نشان می‌دهد که برای پیاده‌سازی پروژه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء در کشاورزی (فناوری‌های نوین) بیشتر به پایداری اقتصادی اهمیت داده می‌شود. اعلم‌الهدی (۱۳۹۴) در پژوهشی با عنوان آب و فناوری اطلاعات: بررسی و احصای فناوری‌های راهبردی آب بر اساس مدل مفهومی به این نتایج دست یافتند که فناوری‌های از جنس مدیریتی و تصمیم‌سازی از مهم‌ترین و با اولویت‌ترین فناوری‌ها در حل بحران آب بوده و نقش بسزایی در این زمینه دارند. این بدان معنی است که به‌کارگیری فناوری از جنبه‌های جدید به‌ویژه از جنبه مدیریتی، تصمیم‌سازی و نیز مدیریت اطلاعات و شبیه‌سازی، نقش کلیدی در افزایش آگاهی‌ها نسبت به شرایط ریسک و بحرانی، تحلیل علت‌ها و عواقب و به دنبال آن مدیریت جامع منابع آب را در پی خواهد داشت. باقری و جوادی (۱۴۰۱) در پژوهشی باهدف ارزیابی سطح فناوری در تولید محصولات راهبردی کشاورزی ایران در نتایج خود عنوان می‌کنند که سطح فناوری در تولید محصولات راهبردی زراعی ۲ و ۳ و سطح فناوری در تولید محصولات راهبردی باغی ۱ به دست آمد. همچنین سطح فناوری در تولید محصولات راهبردی دامی ۲ و ۳ بود. فناوری‌های سطح ۳ مورد استفاده بیشتر وارداتی بودند. باوجود پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه توسعه فناوری در کشاورزی، سطح فناوری در تولید آبزیان نیز ۱ به دست آمد. بالاین‌حال، هنوز سطح فناوری در تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه در تولید آبزیان و محصولات باغی بسیار پایین است. همچنین بیشتر فناوری‌های سطح ۳، از خارج از کشور تأمین می‌شود؛ بنابراین، برنامه‌ریزی برای بهبود فناوری‌های سطح ۱ به سطح ۲ و فناوری‌های سطح ۲ به سطح ۳ و همچنین فراهم آوردن زمینه تولید محصولات فناورانه سطح ۳ در داخل کشور ضروری است. عبدی و میرک‌زاده (۱۴۰۱) در پژوهشی به‌عنوان آینده فناوری‌های آب محور در کشاورزی استان کرمانشاه در نتایج خود نشان دادند که استان کرمانشاه از لحاظ میزان بهره‌وری آب کشاورزی در دسته استان‌های با بهره‌وری پایین قرار دارد و توسعه فناوری‌های آب محور و ارزیابی و به‌روزرسانی آن‌ها را کلید حل بحران آب و افزایش بهره‌وری عنوان می‌کنند. همچنین یکی از گزینه‌های نو، مدیریت صحیح فناوری‌های نوین، شناخت، به‌روزرسانی و به‌کارگیری روش‌های نوین آبیاری به‌موقع و متناسب با شرایط است که لازمه این امر ارزیابی فناوری‌های موجود باتوجه به کاربری و کارایی آنها است. به همین جهت توسعه فناوری‌های آب محور بایستی به طور مستمر و با دید آینده‌پژوهانه مورد بررسی قرار گیرد.

پورغلام آمیجی و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی با عنوان آسیب‌شناسی و شناخت عوامل عدم اجرایی‌شدن طرح‌ها، پروژه‌ها، فناوری‌ها و پژوهش‌های فناورانه آب کشور؛ به این نتایج دست یافتند که آسیب‌شناسی عدم اجرایی‌شدن طرح‌ها و پژوهش‌های فناورانه آب کشور، می‌تواند در جهت حل مشکل و رفع نقاط ضعف قدم برداشت. مهم‌ترین مشکلات مربوط به عدم سهولت در بهره‌برداری از فناوری‌ها و بازده اقتصادی - فنی پایین و خارج‌شدن از چرخه کاربرد آنها است.

رجا و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهش خود به بررسی اثربخشی راهکارهای مدیریتی کاهش مصرف آب کشاورزی با استفاده از مدل AquaCrop پرداختند نتایج به‌دست آمده نشان داده در بسیاری از مواقع می‌توان بدون رفتن زیر بار هزینه‌های کلان برای تأمین امکانات و تجهیزات مدرن، در شرایط مدیریتی برتر موجود در منطقه با اعمال سناریوهای مختلف از جمله بهبود راندمان، تغییر تاریخ کاشت و کم آبیاری در مصرف آب آبیاری مورد نیاز صرفه جویی قابل توجهی کرد. طبیعتاً سهم هر کشت در میزان صرفه جویی متناسب با متوسط آب مصرفی در هکتار و سطح اراضی تحت هر کشت است.

۲. مطالعات خارج از کشور

هلویگ و آدامز^۱ (۲۰۰۹) مطالعه‌ای با عنوان کاربرد مدل تولید مرزی برای مطالعه رشد بهره‌وری، تغییر فناوری و تغییر کارایی در صنعت بوده است. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که رشد بهره‌وری در طی دوره زمانی مورد مطالعه قابل توجه بوده و تغییر فناوری بیشترین و تغییر مقیاس کمترین تأثیر را در این رشته داشته‌اند، ضمن اینکه تغییر کارایی تأثیر اندک و منفی در رشد بهره‌وری داشته است.

برنت و همکارانش^۲ (۲۰۱۱) در پژوهشی، مبحث ترازنامه فناوری پایدار و چارچوب ارزیابی فناوری با رویکرد پایداری و نظام‌مند را مطرح کردند. آنان در بررسی خود به این نتیجه رسیدند که راه‌حل‌های مشکلات پایداری را می‌توان از طریق استفاده از فناوری جدید که ضایعات را کاهش داده و فرصت‌های توسعه را فراهم می‌کند به دست آورد، و برای ارزیابی سریع فناوری و فرایند پیاده‌سازی در این پژوهش از دیدگاه کیفی با استفاده از معیارهای توسعه یافته از طریق مشارکت ذی‌نفعان و عوامل فنی از طریق نظرات خبرگان بهره گرفت.

مونگویا و همکاران^۳ (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان درک‌پذیرش نوآوری‌ها در کشاورزی که عوامل مربوط به پذیرنده و عوامل مرتبط با فناوری را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که بهره‌برداران در صورتی فناوری نوینی را بکار می‌گیرند و جایگزین می‌کنند که در جهت منافع آن‌ها باشد، اما برخلاف فرایندهایی که منجر به جذب اولیه نوآوری‌های کشاورزی می‌شوند، فرایندهایی که استفاده مداوم از آن‌ها را هدایت کند به طور گسترده مورد تحقیق قرار نگرفته است.

پریت و همکاران^۴ (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان فناوری‌هایی برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی: بررسی سیستماتیک پایداری به این نتایج دست یافتند که این استراتژی‌های نوآورانه پتانسیل کاهش مصرف آب را دارند، اما تحقیقات بیشتری برای درک کامل اثربخشی و معاوضه‌های بالقوه آن‌ها مورد نیاز است؛ بنابراین، برای به حداکثر رساندن صرفه‌جویی در مصرف آب، باید عوامل برون‌زا و درون‌زا را در نظر گرفت.

باتوجه به پژوهش‌های مورد مطالعه، استفاده از فناوری امری اجتناب‌ناپذیر است و بحران آب نیز یکی از مهم‌ترین مسائلی است که جهان با آن روبرو است. در هر کدام از این پژوهش‌ها به برخی از عوامل مؤثر در استفاده و به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری از جمله عوامل اقتصادی، اجتماعی، اقلیمی و عوامل فنی اشاره شده است. اما باتوجه به بررسی منابع صورت گرفته هیچ پژوهشی تمامی ابعاد فناوری که شامل فن‌افزار، انسان‌افزار، دانش و اطلاعات افزار، و عوامل محیطی و سازمانی است را مورد توجه قرار نداده؛ اینکه آیا این فناوری برای مناطق مورد مطالعه مناسب است یا خیر، و کدام بعد آن نادیده گرفته شده، از این‌رو قبل از ورود و به‌کارگیری هرگونه فناوری جدید در منطقه بایستی شرایط فعلی فناوری‌های مورد استفاده و تمامی ابعاد آن فناوری به‌درستی مورد بررسی قرار گیرد تا مطمئن شد که فناوری معرفی شده متناسب با شرایط کشاورزان و اراضی منطقه باشد؛ بنابراین باتوجه به مرور مطالعات انجام شده و مصاحبه‌های صورت گرفته می‌توان به یک جمع‌بندی جامع از ارزیابی ابعاد آن رسید که جهت بررسی مسئله مدیریت فناوری‌های آب محور می‌بایست تمامی ابعاد فناوری را مورد بررسی قرارداد.

روش پژوهشی

در این پژوهش از مدل اطلس فناوری (SCAPE) استفاده شده است. این مدل از مدل‌های ارزیابی فناوری است که بر جنبه‌های مختلف آن تمرکز دارد. بر اساس روش اطلس فناوری، چهار جزء در تعیین فناوری افزوده و سطح فناوری دخالت دارند. این چهار جزء عبارت‌اند از: فن‌افزار، انسان‌افزار، اطلاعات افزار و سازمان‌افزار؛ سطح فناوری یک واحد را نشان می‌دهد.

پژوهش حاضر با رویکرد کمی و باهدف بررسی و تحلیل فناوری‌های آبیاری موجود در کشاورزی استان کرمانشاه با بهره‌گیری از روش اطلس فناوری و تکنیک کریتیک^۴ انجام شد. پژوهش از نظر میزان کنترل متغیرها از نوع غیرآزمایشی است، از لحاظ نحوه

^۱ Helvoigt and Adams

^۲ Brent et al

^۳ Preite et al

^۴ CRITIC

گردآوری داده‌ها میدانی و باتوجه به اینکه نتایج پژوهش به برنامه‌ریزان و کشاورزان در تصمیم‌گیری به‌منظور انتخاب و به‌کارگیری فناوری مناسب آبیاری از لحاظ جلوگیری از هدررفت آب و پایداری کشاورزی کمک می‌کند از لحاظ هدف از نوع تحقیقات کاربردی محسوب می‌شود. جامعه مورد مطالعه شامل سه بخش کشاورزان، کارشناسان و انجمن صنفی (شرکت‌های مجری و شرکت‌های طراح فناوری‌های آب محور) بود کارشناسانی که در زمینه تکنولوژی‌های آب و آبیاری صاحب‌نظر و صاحب‌تجربه بودند و همچنین در دو جامعه طراحان و کشاورزان که توسط شرکت آب منطقه‌ای ذی‌صلاح تشخیص داده شدند (۱۲۷ نفر). در بخش کارشناسان؛ اداره جهاد کشاورزی، امور آب منطقه‌ای استان کرمانشاه، اعضای هیئت‌علمی گروه آب دانشگاه رازی و مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی و منابع طبیعی را در بر گرفت. در بخش کشاورزان، کشاورزان آبی کار استان کرمانشاه طبق اقلیم‌های متفاوت و تقسیمات جغرافیایی، شهرستان‌هایی (کرمانشاه، کنگاور، روانسر، اسلام‌آباد غرب و سرپل ذهاب) با بیشترین سطح زیر کشت آبی باتوجه به الگوی کشت غالب (گندم، جو، کلزا، ذرت، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی) در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ بود که از نظر استفاده از تکنولوژی آبیاری کشاورزان پیشرو قلمداد می‌شدند. از این رو، نحوه انتخاب نمونه به‌صورت قضاوتی بود و در مجموع هر سه گروه پاسخگو در نهایت ۹۰ پرسش‌نامه بدون ایراد احصاء و تحلیل بر مبنای آن انجام شد ($n=90$). ابزار اصلی گردآوری داده‌ها پرسش‌نامه استاندارد مدل اطلس بود که باتوجه به بستر کشاورزی مناسب‌سازی شده بود. روایی محتوایی پرسش‌نامه به تأیید خبرگان و کارشناسان رسیده و میزان پایایی آن نیز به کمک آزمون کرونباخ مورد تأیید قرار گرفت ($\alpha = 0.78$). در ادامه تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسل، روش کریتیک و روش اطلس فناوری انجام شد.

۱. ابعاد فناوری و نحوه سنجش آن‌ها

به‌منظور جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز در بخش مربوط به مدل اطلس از پرسش‌نامه استاندارد اطلس فناوری که از سوی اسکاپ^۱ ارائه شده و شامل ۴ بخش برای سنجش چهار بعد تشکیل‌دهنده فناوری است (اطلاعات افزار، فن‌افزار، انسان‌افزار، مدیریت و سازمان افزار) استفاده شد (ارشادی سیس و همکاران، ۱۳۹۳). در این پرسش‌نامه شاخص‌ها و زیرشاخص‌هایی برای اندازه‌گیری و تحلیل اجزای فناوری ما بین کنشگران مختلف، اندازه‌گیری شد که ارزیابی محتوی فناوری باهدف اندازه‌گیری سهم هر یک از اجزای فناوری در میزان بهره‌وری آب انجام شد. پرسش‌نامه به سنجش مدیریت و سازماندهی، نیروی انسانی، سامانه‌های اطلاعاتی، و بخش فنی پرداخته و شاخص‌های هر بخش در جدول (۱) بیان گردیده است.

جدول ۱. ابعاد فناوری در مدل ممیزی اطلس (مروستی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵)

اطلاعات افزار	فن افزار	انسان افزار	مدیریت و سازمان افزار
مکانیزه بودن سامانه‌ها	دامنه فعالیت‌ها فناوری	ابتکار عمل در کشاورزان	رهبری و ایجاد انگیزه در کشاورزان
به‌روزرسانی اطلاعات در بین کشاورزان	دقت مورد نیاز فناوری	گرایش به موفقیت در کشاورزان	استقلال کشاورز در به‌کارگیری فناوری
جامعیت اطلاعات در اختیار کشاورزان	استفاده مورد نیاز از فناوری	گرایش به همکاری در بین کشاورزان	حس جهت‌یابی
گردش اطلاعات بین کشاورزان مختلف	میزان کنترل	گرایش به جدی بودن/میزان جدیت کشاورزان در محیط کار	میزان درگیری بهره‌وران در تصمیم‌گیری
	قابلیت‌های فنی فناوری	ظرفیت قبول خطر یا قدرت پذیرش ریسک در کشاورزان	گرایش به متعهد بودن کشاورزان در
		گرایش به وقت‌شناسی	فضای مناسب نوآوری
			درستی در اعمال کشاورزان

^۱ Economic and Social Commission for Asia and Pacific (ESCAP)

در ادامه به تفصیل، محاسبات مربوط به هر یک از ابعاد و روش جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها ارائه شده است

۲. محاسبه سهم فن افزار

به منظور سهم فن افزار (مشخصات عملکرد، برای ماشین و تجهیزات و ابزار فنی) برای هر کدام از شاخص‌ها حالت‌های ممکن در نظر گرفته شد و بین صفر تا ده امتیازدهی گردید و در نهایت میانگین امتیازات هر مرحله مورد محاسبه قرار گرفت. سپس دو حد پیچیدگی که یکی مربوط به حد پایین پیچیدگی ماشین‌آلات هر مرحله و دیگری مربوط به حد بالای پیچیدگی ماشین‌آلات هر مرحله از فرایند تعیین شد، و برای هر مرحله وزنی تعیین و در نهایت سهم فن افزار به صورت رابطه (۱) محاسبه شد.

$$T_i = \frac{1}{9} \left[LL + \frac{ST(UL-LL)}{10} \right] \quad (1)$$

$$T = \sum T_i * W_i$$

که در این رابطه (۱)، LL = حد پایین پیچیدگی فن افزار مرحله i ام، UL = حد بالای پیچیدگی فن افزار مرحله i ام، ST = میانگین امتیاز شاخص‌های مرحله i ام، و W_i = وزن مرحله i ام است. لازم به ذکر است که W_i بر اساس نظر کارشناسان متخصص مورد بررسی، تعیین گردید. T نیز همان مقدار سهم کل فن افزار است (کریمی و بهرامی، ۲۰۱۶).

۳. محاسبه سهم انسان افزار

به منظور سهم انسان افزار (نیازهای کفایتی برای توانایی‌های انسانی) در فناوری ابتدا نیروی انسانی به طبقات مختلفی از جمله مدیران، کارشناسان، کشاورزان تقسیم‌بندی شد و سپس برای هر طبقه شاخص‌هایی در رابطه با عواملی از قبیل ابتکار و نوآوری، تمایل به مسئولیت‌پذیری تعیین گردید. سپس سؤالاتی به منظور کمی کردن این عوامل تعیین و امتیازدهی شد که دو حد بالا و پایین برای پیچیدگی توانایی‌های هر کدام از طبقات نیروی انسانی مشخص و در نهایت با استفاده از رابطه (۲) سهم انسان افزار تعیین گردید.

$$H_i = \frac{1}{9} \left[LL + \frac{SH_i(UL-LL)}{10} \right] \quad (2)$$

$$H = \sum H_i W_i$$

در رابطه (۲)، LL = حد پایین پیچیدگی انسان افزار مرحله i ام، UL = حد بالای پیچیدگی انسان افزار مرحله i ام، SH = میانگین امتیاز شاخص‌های مرحله i ام، و W_i = وزن مرحله i ام است. لازم به ذکر است که W_i بر اساس نظر کارشناسان متخصص مورد بررسی، تعیین گردید.

۴. محاسبه سهم اطلاعات افزار

سهم اطلاعات افزار (نیازهای کفایتی برای اطلاعات یا افزار اطلاعاتی) در سطح کل مورد بررسی محاسبه شد. برای تعیین سهم اطلاعات افزار ابتدا شاخص‌هایی از قبیل جامعیت اطلاعات، به روز بودن اطلاعات، شبکه‌ای بودن سامانه اطلاعات تعیین و امتیازدهی گردید. در نهایت با استفاده از جدول مربوط به درجه پیچیدگی اطلاعات افزار در دو حد بالا و پایین برای اطلاعات افزار در واحد مورد بررسی تعیین و سهم اطلاعات افزار از رابطه (۳) محاسبه گردید.

$$I = \frac{1}{9} \left[LL + \frac{SI(UL-LL)}{10} \right] \quad (3)$$

در این رابطه (۳)، LL = همان حد پایین پیچیدگی اطلاعات افزار مرحله i ام، UL = حد بالای پیچیدگی اطلاعات افزار مرحله i ام، SI = میانگین امتیاز شاخص‌های مرحله i ام است.

۵. محاسبه سهم سازمان افزار

سازمان افزار (معیارهای کارایی برای سازماندهی و مدیریت یا افزار سازمانی) نیز مانند اطلاعات افزار در سطح کل مورد بررسی محاسبه شد. به منظور سهم سازمان افزار ابتدا شاخص‌هایی در رابطه با عواملی از قبیل توانایی ایجاد انگیزه، آینده‌نگری تعیین گردید

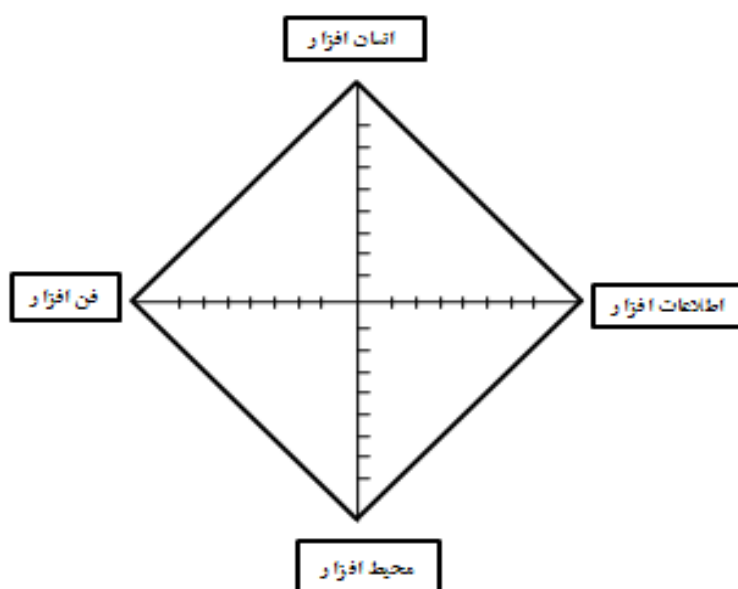
و سؤالات مرتبط با هر کدام امتیازدهی و محاسبه گردید و در نهایت باتوجه به جدول مربوط به پیچیدگی سازمان افزار حد بالا و پایین تعیین و سهم سازمان افزار از رابطه (۴) محاسبه شد.

$$O = \frac{1}{9} \left[LL + \frac{SO (UL - LL)}{10} \right] \quad (4)$$

در این رابطه (۴)، LL = همان حد پایین پیچیدگی سازمان افزار مرحله i ام، UL = حد بالای پیچیدگی سازمان افزار مرحله i ام، SO = میانگین امتیاز شاخص های مرحله i ام است

۶. نمودار THIO

در گام بعدی، نتایج این تحلیل و بررسی ها بر روی نمودار $THIO^1$ نشان داده شد. شکل (۱) دارای چهار محور است که هر کدام، یک جزء از فناوری را نشان می دهد. بیشترین مقدار یک و کمترین مقدار صفر است. به این ترتیب میزان اختلاف هر جزء با حالت ایده آل (یعنی ۱) و همچنین تفاوت اجزا با یکدیگر مشخص خواهد شد. این مورد به برنامه ریزان در تصمیم گیری برای توسعه و تغییر فناوری کمک شایانی می کند.



نمودار ۱. نمودار THIO

۷. ضریب کمک فناوری^۲ TCC

هر کدام از اجزا طبق اطلاعات به دست آمده از فرمول های فوق دارای رتبه بین صفر تا یک خواهند بود، عدد صفر بیانگر بدترین حالت آن جزء فناوری در تناسب با فناوری کلی و عدد یک بهترین وضعیت آن جز را نشان می دهد. هنگامی که نقش هر یک از چهار جزء فناوری به صورت کمی به دست می آید باید ارزش واحدی که نشان دهنده نقش کل این چهار جزء باشد، برآورد گردد تا بتوان یک شاخص کلی به دست آورد. برای انجام این کار از تابع توانی به نام ضریب کمک فناوری (TCC) استفاده شد. بیان ریاضی این تابع به صورت رابطه (۵) است که با حاصل ضرب چهار بعد اصلی فناوری که طبق استاندارد اسکاپ این ابعاد فناوری عبارتند از چهار بخش فن افزار، انسان افزار، اطلاعات افزار و سازمان افزار با نمادهای T, H, I, O ، و توان β مربوط به شدت تأثیر هر یک از اجزاء روی ضریب کمک فناوری است. در واقع هر کدام از اجزا در فرایند تولید دارای درجه اهمیتی هستند که در اینجا جهت به دست آوردن آن از روش کریتیک استفاده شد.

¹ ابزاری مقایسه ای جهت تحلیل وضعیت همزمان مولفه های فناوری که مخفف: Technoware, Humanware, Infoware, Orgaware است

² Technology Contribution Coefficient

$$TCC = T^{\beta t} \cdot H^{\beta h} \cdot I^{\beta i} \cdot O^{\beta o} \quad (5)$$

۸. وزن‌دهی ابعاد با استفاده از روش کریتیک^۱ (CRITIC)

در فرایند تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت اولویت‌بندی معیارهای تصمیم‌گیری ابتدا وزن‌دهی بایستی انجام شود. وزن معیارها از دیدگاه ذهنی تصمیم‌گیرندگان تأثیر می‌پذیرد. وزن‌دهی معمولاً توسط تصمیم‌گیرندگان بر اساس تجربه، دانش و درک مسئله انجام می‌شود. با این وجود با بیشتر شدن تعداد معیارها، احتمال خطاهای انسانی و ایجاد شک و تردید در مورد قابلیت اطمینان نتایج نیز افزایش می‌یابد. برای غلبه بر چنین مشکلاتی، رویکردهای ارزش‌گذاری عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند (گل‌قامت راد و همکاران، ۱۳۹۸).

روش کریتیک، روشی عینی برای تعیین وزن معیارهاست که شامل شدت تضاد و ناسازگاری بین اجزای یک مسئله تصمیم‌گیری است. این دو مقوله در آمار به وسیله ضرایب همبستگی و انحراف معیار صورت می‌گیرد. در واقع، انحراف معیار مربوط به مقادیر خود معیار بوده و ضریب همبستگی مربوط به جفت معیارها است. این روش توسط کاندوس و دبرا به سال ۲۰۱۰ معرفی شده است (علی‌نژاد و خلیلی^۲، ۲۰۱۹).

اولین گام در این روش تشکیل ماتریس تصمیم است که در آن ستون‌ها از معیارها و سطرها از گزینه‌ها تشکیل شده است. معیارهای تدوین شده به منظور اعتبارسنجی و وزن‌دهی به متخصصان ارسال شد. ۱۰ متخصص مرتبط معیارهای تدوین شده را وزن‌دهی نمودند. معیار اصلی محاسبه‌ی شاخص‌های تدوین شده متوسط متغیرها و در برخی موارد درصد پاسخگویی در نظر گرفته شد. در این روش مثبت و منفی بودن معیارها دخیل نیست. لازم به ذکر است به منظور مقایسه‌ی معیارها مقیاس آن‌ها یکسان گردید. بدین منظور اختلاف موجود بین معیارها در مقیاس آن‌ها و عدم تجانس آن‌ها از طریق ضرب در وزن معیار و تقسیم بر میانگین صورت گرفت. این فرمول برای خالی از مقیاس کردن شاخص‌ها بکار می‌رود (علی‌نژاد و خلیلی، ۲۰۱۹).
گام دوم در این روش نرمال‌سازی ماتریس تصمیم است. برای نرمال‌سازی از رابطه (۶) استفاده شد. با استفاده از این رابطه ماتریس تصمیم نرمال شد و کلیه درایه‌های آن در بازه صفر تا ۱ قرار گرفت.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، x_{ij} مربوط به مقدار مشاهده شده سطر (i) و ستون (j) خاص در مجموعه داده‌ها، $x_j^{\min}$ حداقل مقدار ممکن برای ویژگی ستون (j) مورد نظر در مجموعه داده‌ها، و $x_j^{\max}$ حداکثر مقدار ممکن، پس مقدار اطلاعات قابل استخراج از معیار را محاسبه، این مقدار را با C_j نشان می‌دهیم و از رابطه (۷) محاسبه شد.

$$r_j = \sigma_j \sum_{i=1}^m (1 - r_{ij}) \quad (7)$$

σ_j انحراف معیار j امین معیار است و r_{ij} همبستگی بین دو معیار i و j است. بر اساس تحلیل فوق، می‌توان نتیجه گرفت که ارزش بالاتری از C_j مقدار بیشتری از اطلاعات را از معیار داده شده ارائه می‌دهد؛ بنابراین اهمیت نسبی معیار برای یک مسئله تصمیم‌گیری مورد توجه بیشتری است.

و در گام سوم وزن معیارها با استفاده از رابطه (۸) محاسبه شد.

$$w_{ij} = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (8)$$

¹ Criteria Importance Through Intercriteria Correlation

² Alinezhad & Khalili

یافته‌های پژوهش

در این بخش پژوهش، یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌ها بر اساس مدل اطلس در دو بخش شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر بر ارتقای سطح فناوری و ارزیابی ابعاد فناوری ارائه می‌شود.

۱. عوامل مؤثر بر ارتقای فناوری

بر اساس یافته‌های جدول (۲) کارشناسان اداره جهاد کشاورزی، امور آب منطقه‌ای استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، و اساتید گروه آب ۳۵ نفر از جامعه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده، انجمن صنفی (شرکت‌های مجری و شرکت‌های طراح فناوری‌های آب محور) ۲۵ نفر از جامعه مورد مطالعه را به خود اختصاص دادند، و در این بخش کشاورزان آگاه و فعال در زمینه به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری که مورد مطالعه قرار گرفتند شامل ۳۰ نفر بودند.

جدول ۲. فراوانی جامعه مورد مطالعه برحسب گروه‌های مختلف انسانی

گروه انسانی	فراوانی	درصد
کارشناس	۳۵	۳۸/۹
طراح	۲۵	۲۷/۸
کشاورز	۳۰	۳۳/۳
کل	۹۰	۱۰۰

۲. رتبه‌بندی عوامل مؤثر بر ارتقای فناوری

به‌منظور بررسی تفاوت معنادار میان اهمیت عوامل مؤثر بر ارتقای فناوری آبیاری کشاورزی از منظر پاسخ‌دهندگان، از آزمون فریدمن استفاده شد که گزارش آن در جدول (۳) آمده است.

جدول ۳. نتیجه آزمون فریدمن

تعداد	آماره آزمون	درجه آزادی (df)	سطح معناداری (مقدار p)
۹۰	۳۸/۳۱	۳/۴۵	۰/۰۰۰۱

باتوجه به مقدار $p = ۰/۰۰۰۱$ که کمتر از $۰/۰۵$ است، نشان‌دهنده تفاوت معنادار در رتبه بندی گویه‌ها از نظر پاسخ‌دهندگان است. به عبارت دیگر، پاسخ‌دهندگان به برخی عوامل مؤثر در ارتقای فناوری اهمیت بیشتری داده‌اند و این تفاوت از لحاظ آماری معنادار است.

در ادامه به آمار توصیفی عوامل مؤثر بر ارتقای فناوری در بخش کشاورزی در جدول (۴) پرداخته شده است. تحلیل گویه‌ها نشان داد که میانگین پاسخ‌ها در بازه ۳/۳۷ تا ۳/۷۴ قرار دارد که نشان‌دهنده ارزیابی نسبتاً مثبت پاسخ‌دهندگان نسبت به همه عوامل است. اما از دیدگاه پاسخ‌دهندگان، برخی عوامل در ارتقای فناوری اهمیت بیشتری دارند. به‌طوری که گرایش به همکاری کشاورزی در به‌کارگیری فناوری با بالاترین میانگین ۳/۷۴ و رتبه اول، به‌عنوان مهمترین عامل شناسایی شده است. به ترتیب قدرت مالی کشاورزان و دسترسی به امکانات اولیه و مورد نیاز فناوری رتبه‌های دوم و سوم را دارند که بیانگر اهمیت منابع مالی و لزوم ایجاد زیرساخت‌های مناسب در فرایند ارتقا و به‌کارگیری فناوری‌های جدید است. در مقابل عواملی مانند قدرت پذیرش ریسک در بین کشاورزان، وجود رهبری برای ایجاد انگیزه، خلاقیت بالقوه در کشاورزان در رتبه‌های پایین‌تری قرار دارند.

جدول ۴. عوامل مؤثر بر ارتقای فناوری‌های نوین آبیاری در بخش کشاورزی

رتبه	انحراف معیار	میانگین	گویه‌ها
۱۰	۰/۹۶	۳/۴۵	جامع بودن اطلاعات در خصوص فناوری
۷	۱/۳۱	۳/۵۴	سیاست‌گذاری بلندمدت در مدیریت کلان کشاورزی
۵	۱/۱۴	۳/۶۶	به‌روز بودن اطلاعات در حوزه فناوری‌های کشاورزی
۳	۱/۰۱	۳/۷۱	دسترسی به امکانات اولیه و مورد نیاز فناوری‌ها
۴	۰/۹۷	۳/۷۰	موقعیت مناسب برای به‌کارگیری فناوری‌ها
۱۱	۱/۱۶	۳/۴۴	خلاقیت بالقوه و گرایش به موفقیت در کشاورزان
۲	۱/۰۸	۳/۷۲	قدرت مالی کشاورزان
۱	۱/۰۳	۳/۷۴	گرایش به همکاری در کشاورزان در به‌کارگیری فناوری
۱۲	۱/۱۶	۳/۴۱	قدرت پذیرش ریسک در بین کشاورزان
۶	۰/۹۷	۳/۶۵	میزان حدیث کشاورزان در فعالیتهای کشاورزی
۱۳	۱/۳۰	۳/۳۷	وجود رهبری جهت ایجاد انگیزه در کشاورزان
۹	۱/۳۶	۳/۴۶	میزان تعهد کشاورزان به منابع در دسترس
۸	۱/۰۵	۳/۴۷	استقلال در بخش کشاورزی (در بعد برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری)

یافته‌های حاصل از جدول (۴) نتایج یافته‌های پیشین (تحلیل میانگین گویه‌ها) را تقویت می‌کند، زیرا نشان می‌دهد که تفاوت مشاهده شده در رتبه‌ها تصادفی نبوده و مبنای آماری دارد. تا اینجا میزان اهمیت عوامل مؤثر بر ارتقا و به‌کارگیری فناوری‌های آبیاری به‌طور کلی مورد بررسی قرار گرفت؛ اما ارزیابی جامع از فناوری، به‌ویژه در حوزه‌های پیچیده‌ای مانند کشاورزی مستلزم در نظر گرفتن ابعاد چندگانه و مکمل فناوری است. بر اساس مدل‌های نوین تحلیل فناوری، فناوری نه فقط یک پدیده فنی بلکه یک منظومه چهار وجهی است که تمامی ابعاد آن به طور جداگانه در شرایط کنونی در ادامه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۳. ارزیابی ابعاد مختلف فناوری

در این بخش باتوجه به اطلاعات به‌دست‌آمده از پرسش‌نامه تجزیه و تحلیل مربوط به هر یک از چهار جزء فناوری بیان می‌شود.

ارزیابی نیروی انسانی

در این بخش که مربوط به ارزیابی بعد انسان‌افزار فناوری است. در جدول (۵) میانگین امتیاز شاخص‌های انسان‌افزار بر حسب گروه‌های مختلف نیروی انسانی به همراه طبقات آن بیان شده است.

جدول ۵. میانگین امتیاز شاخص‌های بعد انسان‌افزار بر حسب گروه‌های نیروی انسانی

کشاورزان	طراحان	کارشناسان	میانگین امتیاز شاخص‌ها
۳/۶۴	۳/۶۱	۳/۶۲	گرایش به موفقیت
۳/۶۱	۳/۷۳	۳/۵۰	گرایش به کار دسته‌جمعی
۳/۵۲	۳/۵۹	۳/۲۶	ابتکار بالقوه
۷/۴۸	۶/۹۳	۷/۰۴	تمایل به وقت‌شناسی
۶/۵۸	۶/۹۶	۶/۵۶	تمایل به ریسک‌پذیری
۷/۱۰	۷/۱۹	۵/۹۳	تمایل به مسئولیت‌پذیری
۶/۶۷	۶/۴۰	۵/۷۱	تمایل به یادگیری

باتوجه به جدول (۵) به وضوح می‌توان دریافت که طراحان و کشاورزان در مجموع، نسبت به کارشناسان در شاخص‌های انسان‌افزار عملکرد بهتری دارند. طراحان در اکثر شاخص‌ها نظیر کار گروهی، ابتکار، ریسک‌پذیری و مسئولیت‌پذیری دارای میانگین بالاتر از سایر گروه‌ها هستند. این نشان می‌دهد که از نظر ظرفیت‌های نرم‌افزاری انسانی، گروه طراحان وضعیت نسبتاً مطلوب‌تری دارند، با ماهیت شغلی آنان که مستلزم خلاقیت، تعامل بین‌بخشی و نوآوری است همخوانی دارد. در واقع طراحان از منظر توانمندی حرفه‌ای در بعد انسان‌افزار پیشرو هستند. کشاورزان در شاخص‌هایی چون وقت‌شناسی، یادگیری و مسئولیت‌پذیری عملکرد بالایی

دارند. این مسئله نشان می دهد که علیرغم مسئولیت های ساختاری، کشاورزان از نظر نگرش های فردی و انگیزه های درونی، آمادگی بالایی برای به کارگیری فناوری دارند. به ویژه تمایل بالای آن ها به یادگیری و وقت شناسی بسیار معنادار است، چرا که نشان دهنده ظرفیت تطبیق و توسعه پذیری فناوری در سطح مزرعه است. اما کارشناسان در بیشتر شاخص ها (به ویژه ابتکار، یادگیری، مسئولیت-پذیری) پایین ترین میانگین را دارند. شاید بتوان گفت دلیل این مسئله را باید در نوع وظایف اداری یا در نظام سازمانی رسمی جست و جو کرد؛ نظامی که مانع بروز ابتکار و یادگیری تطبیقی می شود.

در خصوص تصمیم گیری در مورد نیروی انسانی جدول (۶) با توجه به امتیازات به دست آمده از نیروی انسانی و سطوح پیچیدگی نیروی انسانی، امتیاز جزء انسان افزار را نشان می دهد.

جدول ۶. سهم بعد انسان افزار در محتوای فناوری برحسب گروه های انسانی

طبقات نیروی انسانی	میانگین امتیاز (SH)	پایین ترین حد پیچیدگی (LL)	بالاترین حد پیچیدگی (UL)	وزن هر طبقه (W _i)	سهم انسان افزار (H _i)	سهم کل (H _i . W _i)
کشاورزان	۵/۵۱	۱	۹	۰/۳۴	۰/۶۰	۰/۲۱
طراحان	۵/۴۸	۱	۹	۰/۳۴	۰/۵۹	۰/۲۰
کارشناسان	۵/۰۸	۱	۹	۰/۳۱	۰/۵۶	۰/۱۷

کشاورزان با مقدار ۰/۶۰ بیشترین سهم انسانی در پیچیدگی فناوری را دارند. برتری نسبی کشاورزان از نظر سهم انسان افزار نشان می دهد که درک عملی و تجربی کشاورزان از فناوری نقش محوری دارد، و کشاورزان عامل مهمی در انطباق پذیری فناوری با بستر انسانی هستند. طراحان با سهم پیچیدگی ۰/۵۹ و سهم کل ۰/۲۰ در رتبه دوم قرار دارند. این نزدیکی به سهم کشاورزان نشان می دهد که طراحان نقش موثرتری در تجسم نیازهای انسانی در طراحی فناوری دارند و نسبت بالای آن گویای آگاهی از بعد انسانی در فرایند طراحی و توسعه فناوری است. کارشناسان با کمترین میزان سهم انسانی در محتوای فناوری را دارند، هم در میانگین امتیاز ۵/۰۸ و هم در سهم کل ۰/۱۷، این وضعیت می تواند نشانگر این باشد که نگرش کارشناسان بیشتر معطوف به ساختارهای رسمی و تخصص های فناورانه غیرانسان محور است. مشارکت مستقیم آن ها در جنبه های انسانی در فناوری ضعیف تر است. در مجموع سهم بعد انسان افزار ۰/۵۸ است. در واقع بیانگر آن است که تمایل به مسئولیت پذیری از طریق یادگیری تطبیقی عمل می کند که کشاورزان تجربیات را با فناوری تطبیق می دهند، اما دلیل پایین بودن آن در بین کارشناسان می تواند بخاطر ساختار اداری و مکانیسم سازمانی محدود کننده باشد.

ارزیابی بعد فن افزار

برای ارزیابی این بعد که مربوط به بعد فنی فناوری است. جدول (۷) در خصوص تصمیم گیری در مورد بعد سخت افزاری فناوری با توجه به امتیازات به دست آمده در مورد پیچیدگی بعد فن افزار، امتیاز جزء فن افزار را نشان می دهد.

جدول ۷. سهم بعد فنی فناوری

شاخص ها	میانگین امتیاز (ST)	پایین ترین حد پیچیدگی (LL)	بالاترین حد پیچیدگی (UL)	وزن هر طبقه (W _i)	سهم انسان افزار (T _i)	سهم کل (T _i . W _i)
مواد	۴/۷۷	۱	۹	۰/۳۳	۰/۵۳	۰/۱۷
موقعیت مزارع	۴/۶۰	۱	۹	۰/۳۲	۰/۵۲	۰/۱۶
تجهیزات	۵/۰۱	۱	۹	۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۱۹

با توجه به جدول (۷) شاخص تجهیزات عامل کلیدی در فن افزار است طوری که با بیشترین امتیاز (۵/۰۱) و بیشترین سهم کل (۰/۱۹) مهم ترین مؤلفه در بعد فنی ارزیابی شده است. این داده بیانگر آن است که در حال حاضر به زیرساخت و تجهیزات فنی مزارع به عنوان مهم ترین نیاز فنی برای توسعه فناوری در بخش کشاورزی اهمیت بیشتری داده می شود. از آنجایی که تجهیزات مستقیماً با بهره وری، دقت و مقیاس پذیری عملیات مرتبط هستند این یافته از لحاظ کاربردی بسیار معنادار است. شاخص مواد

(۴/۷۷) و موقعیت مزارع (۴/۶۰) دارای نقش کمتری نسبت به تجهیزات هستند. در حال حاضر مجموع سهم بعد فن افزار ۵۲ درصد است.

ارزیابی دانش فنی و اطلاعات

برای ارزیابی وضعیت دانش فنی و اطلاعات باتوجه به ضوابط ارائه شده در مدل از شاخص‌های وضعیت سامانه‌های اطلاعاتی، به‌روز بودن آن‌ها و جامعیت اطلاعات، نگهداری و دسترسی اطلاعات، گردش اطلاعات استفاده شده است. جدول شماره (۸) میانگین امتیازات به‌دست‌آمده از هر کدام را نشان می‌دهد، و جدول (۹) سهم اطلاعات افزار را در تولید نشان می‌دهد.

جدول ۸. خلاصه شاخص‌های وضعیت دانش فنی و اطلاعات

شاخص‌ها	جامعیت اطلاعات	وضعیت سامانه‌های اطلاعاتی	به‌روز بودن اطلاعات	نگهداری و دسترسی	گردش اطلاعات	میانگین کل
امتیاز میانگین	۴/۴۶	۴/۲۴	۴/۱۴	۴/۱۲	۲/۸۸	۳/۹۶

باتوجه به جدول (۸) امتیاز شاخص‌ها همگی در بازه نسبتا میانه تا نسبتا بالا (بین ۴/۱ تا ۴/۵) قرار دارند به جز گردش اطلاعات که با امتیاز ۲/۸۸ در سطح پایین‌تری قرار گرفته است.

جدول ۹. سهم اطلاعات افزار در محتوای فناوری

	میانگین امتیاز (SI)	پایین‌ترین حد پیچیدگی (LL)	بالا‌ترین حد پیچیدگی (UL)	وزن هر طبقه (W _i)	سهم اطلاعات افزار (I _i)	سهم کل (I _i .W _i)
امتیازات	۳/۹۶	۱	۹	۱	۰/۴۶	۰/۴۶

عدد ۳/۹۶ در جدول (۹) نشان‌دهنده آن است که کشاورزان سطح متوسطی از دانش و آگاهی اطلاعاتی مرتبط با فناوری را دارا هستند؛ اما این عدد هنوز از آستانه مطلوب (مثلا ۵ یا بالاتر) پایین‌تر است. همچنین سهم اطلاعات افزار در محتوای فناوری‌های آبیاری معادل ۰/۴۶ برآورد شده که بیانگر آن است اطلاعات، داده‌ها و دانش ضمنی مرتبط با فناوری هنوز به سطح بهینه نرسیده است.

ارزیابی محیط به‌کارگیری فناوری

در ارزیابی مدیریت و سازماندهی که در این پژوهش بنا به موضوع بسترسازی شده و به‌عنوان عوامل محیطی به‌کارگیری فناوری معادل‌سازی شده از ۵ شاخص در طی ۱۶ سوال استفاده شده است که لیست شاخص‌ها و میانگین آنها در جدول شماره (۱۰) ارائه شده است. در ادامه باتوجه به میانگین امتیازات سهم سازمان افزار یا همان محیط به‌کارگیری فناوری در محتوای فناوری در جدول (۱۱) بیان گردیده است.

جدول ۱۰. میانگین امتیازات شاخص‌های محیطی (سازمانی)

شاخص‌ها	جهت‌یابی	میزان درگیر بودن	رهبری جهت‌انگیزه	فضای مناسب	استقلال داخلی	میانگین کل
امتیاز میانگین	۶/۲۸	۶/۵۱	۶/۶۷	۴/۳۹	۵/۳۱	۵/۸۳

باتوجه به جدول (۱۰) میانگین کل شاخص‌های محیطی معادل ۵/۸۳ از ۱۰ است که نشان می‌دهد وضعیت این بعد تا در سطح نسبتا مطلوب اما نه ایده‌آل قرار دارد. این مقدار نشان‌دهنده آن است که سازمان‌ها و ساختارهای نهادی تا حدی زمینه‌ساز استقرار فناوری بوده‌اند ولی هنوز تا توسعه یافتگی کامل فاصله وجود دارد.

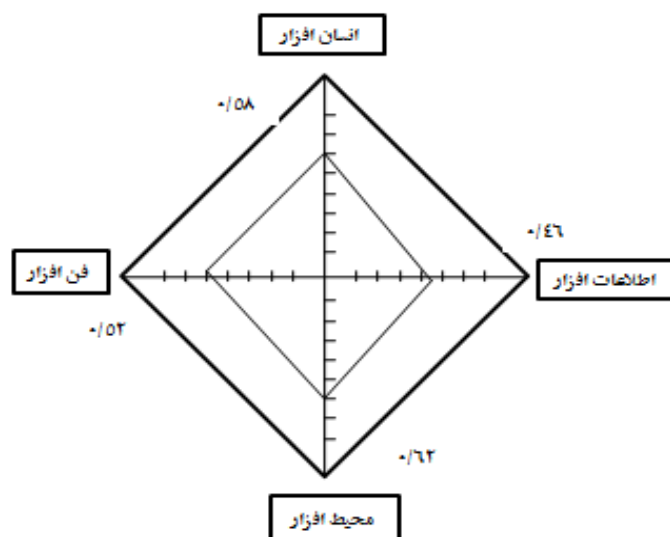
جدول ۱۱. سهم محیط (سازمان) افزار در محتوای فناوری

میانگین امتیاز (SO)	پایین ترین حد پیچیدگی (LL)	بالاترین حد پیچیدگی (UL)	وزن هر طبقه (W _i)	سهم اطلاعات افزار (O _i)	سهم کل (O _i , W _i)
۵/۸۳	۱	۹	۱	۰/۶۲	۰/۶۲

عدد ۵/۸۳ در جدول (۱۱) نشان دهنده ارزیابی نسبتاً مطلوب کاربران از مولفه های محیطی و سازمانی اثرگذار بر فناوری است. سهم ۶۲ درصدی این بعد در محتوای فناوری بسیار قابل توجه است. این مقدار بیشترین سهم را در میان ابعاد چهارگانه فناوری است. این یافته ها بیانگر آن است که موفقیت در استقرار و ارتقای فناوری به ویژه در حوزه هایی مانند آبیاری بیش از آنکه به تجهیزات یا اطلاعات فنی وابسته باشد، متکی به عوامل سازمانی و مدیریتی است.

۴. نمودار THIO

به منظور مقایسه اجزای فناوری با یکدیگر از نمودار THIO استفاده می شود. این نمودار علاوه بر آنکه امکان مقایسه چهار جزء فناوری را با یکدیگر فراهم می سازد، فاصله هر یک از اجزا را با سطح مطلوب یا همان بهترین وضعیت که می تواند ۱۰۰ درصد باشد نشان می دهد. شکل (۲) این پژوهش با توجه به اطلاعات به دست آمده به قرار زیر است.



شکل ۲. نمودار THIO

همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود بالاترین وزن متعلق به بعد محیط افزار (۰/۶۲) است. این نشان می دهد که در حال حاضر شرایط محیطی از آمادگی نسبی برخوردار است. دومین بعد در اینجا بعد انسان افزار با ۰/۵۸، بیانگر آن است که نیروی انسانی یا دانش بهره برداران وضعیت در حد متوسطی دارد و نیازمند بهبود است. همین طور بعد فن افزار با مقدار ۰/۵۲ وضعیت متوسطی دارد و تجهیزات به کار رفته نیاز به ارتقا و توسعه دارند. اما کمترین مقدار و زیر متوسط مربوط به بعد اطلاعات افزار (۰/۴۶) است، این ضعف در سامانه های اطلاعاتی و مدیریت دانش را نشان می دهد که می تواند مانعی برای توسعه اثربخش فناوری های آبیاری باشد. به طور کل می توان گفت فرم نامقارن نشان دهنده عدم توازن میان ابعاد مختلف فناوری آبیاری است. بیشترین ضعف در زمینه اطلاعات افزار می تواند باعث ناکارآمدی در تصمیم گیری، پیش بینی نیاز آبی، یا استفاده بهینه از منابع شود. در اینجا اهمیت سرمایه گذاری در حوزه اطلاعاتی و ایجاد زیرساخت های نرم افزاری و هوشمندسازی برجسته تر می گردد. در واقع این عدم تعادل عملکرد کلی سامانه های آبیاری را تحت تأثیر قرار می دهد.

باتوجه به اینکه هر کدام از اجزای فناوری در فرایند تولید دارای درجه اهمیتی هستند، در اینجا جهت به دست آوردن آن از روش کریتیک استفاده شد؛ زیرا باتوجه به ماهیت چندبعدی ارزیابی فناوری‌ها، استفاده از روش کریتیک امکان می‌دهد تا شاخص‌هایی که دارای تنوع اطلاعاتی بالاتر و کمترین هم‌پوشانی با سایر شاخص‌ها هستند، وزن بیشتری دریافت نمایند. این ویژگی قدرت تحلیل را در شناسایی فناوری‌های برتر افزایش و از تأثیر نامتناسب شاخص‌های همبسته جلوگیری می‌کند.

۵. وزن ابعاد فناوری با استفاده از روش CRITIC

در این بخش پژوهش با استفاده از روش کریتیک ابعاد فناوری در اختیار خبرگان قرار داده شد تا بر اساس اهمیتشان در به کارگیری فناوری‌های آبیاری نسبت به مرتب‌سازی آن‌ها اقدام شود. در ادامه اهمیت نسبی هر بعد نسبت به بعد بالاتر از خود تعیین شد و در نهایت با استفاده از میزان اهمیتی که خبرگان برای هر بعد در نظر گرفتند، وزن نهایی و میزان اهمیت هر یک از ابعاد به دست آمد. بدین ترتیب و بر اساس مراحل گفته شده به تحلیل نتایج این روش پرداخته شد. مراحل گام به گام وزن‌دهی به ابعاد باتوجه به توضیحاتی که در مورد روش کریتیک در بخش مواد و روش‌ها آمده در اینجا به یافته‌های آن پرداخته شد. جدول (۱۲) حاوی اطلاعات عددی از ۴ بعد فناوری برای فناوری‌های مختلف آبیاری از دیدگاه متخصصین است. در مرحله بعدی استاندارد کردن ماتریس وضع موجود باتوجه به ابعاد برای هر کدام از گزینه‌های مورد مطالعه انجام شد که نتایج آن نیز در جدول (۱۲) نشان داده شده است. سپس در مرحله بعدی محاسبات، انحراف معیار مقادیر ابعاد نرمالیزه شده اولیه برآورد شد که نتایج آن در جدول (۱۲) آورده شده است.

جدول ۱۲. ماتریس داده‌های خام و نرمال ابعاد

پاسخگو	فن افزار		انسان افزار		اطلاعات افزار		محیط افزار	
	خام	نرمال	خام	نرمال	خام	نرمال	خام	نرمال
۱	۶	۱	۷	۱	۶	۱	۵	۰/۶۶
۲	۵	۰/۶۶	۶	۰/۵	۶	۱	۵	۰/۶۶
۳	۶	۱	۷	۱	۶	۱	۵	۰/۶۶
۴	۶	۱	۷	۱	۵	۰/۶۶	۴	۰/۳۳
۵	۴	۰/۳۳	۷	۱	۶	۱	۴	۰/۳۳
۶	۳	۰	۵	۰	۳	۰	۳	۰
۷	۵	۰/۳۳	۷	۱	۶	۱	۵	۰/۶۶
۸	۴	۰/۳۳	۷	۱	۶	۱	۵	۰/۶۶
۹	۵	۰/۶۶	۷	۱	۶	۱	۶	۱
۱۰	۵	۰/۶۶	۷	۱	۶	۱	۵	۰/۶۶
S.D.	۰/۳۴	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۷			

در نهایت در گام آخر وزن اولیه و وزن نهایی و میزان اهمیت هر یک از معیارها به دست آمد که نتایج آن به شرح جدول (۱۳) است.

جدول ۱۳. وزن‌های ابعاد با استفاده از روش CRITIC

معیارها	فن افزار	انسان افزار	اطلاعات افزار	محیط افزار
وزن اولیه (C)	۱/۳۷	۰/۴۹	۰/۴۲	۱/۱۸
وزن نهایی (w)	۰/۳۹	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۳۴

همان طور که اطلاعات مندرج در جدول (۱۳) نشان می دهد فن افزار با وزن ۰/۳۹ مهم ترین بعد در ارزیابی فناوری محسوب می شود. محیط افزار با وزن ۰/۳۴ نیز اهمیت بالایی دارد، اما انسان افزار و اطلاعات افزار به ترتیب با وزن ۰/۱۴ و ۰/۱۲ نسبتاً کم اهمیت تر در این ارزیابی هستند.

۶. ضریب کمک فناوری TCC

همان طور که در بخش روش پژوهش در رابطه با این ضریب صحبت شد، یک شاخص کلی به دست می دهد که نشان دهنده نقش کلی چهار جزء فناوری است؛ بنابراین، در نهایت بر اساس شکل شماره (۲) و وزن به دست آمده برای هر بعد سازمان افزار، فن افزار، انسان افزار و اطلاعات افزار که سهم هر کدام به ترتیب در ادامه آمده؛ $O^{\beta O} = 0.21$ ، $T^{\beta T} = 0.20$ ، $H^{\beta H} = 0.08$ ، $I^{\beta I} = 0.05$ که ارجحیت یا همان میزان بهایی که در حال حاضر به هر یک از ابعاد فناوری های آبیاری در استان کرمانشاه داده می شود نسبت به یکدیگر به این صورت $O > T > H > I$ است؛ بنابراین بیشترین اهمیت به بعد محیطی و سازمانی، و پس از آن به بعد فن افزار داده می شود، اما بعد نیروی انسانی و اطلاعات با وزن های به مراتب پایین تر زیاد مورد توجه قرار نگرفته اند که نشان دهنده نادیده گرفته شدن ابعاد سیاسی و اطلاعاتی است. باتوجه به امتیازهای به دست آمده ضریب کمک فناوری برابر است با:

$$TCC = T^{\beta T} * H^{\beta H} * I^{\beta I} * O^{\beta O}$$

$$TCC = 0.52^{0.39} * 0.58^{0.14} * 0.46^{0.12} * 0.62^{0.34}$$

$$TCC = 0.77 * 0.92 * 0.91 * 0.84 = 0.54$$

به عبارت دیگر میزان اهمیتی که به کل ابعاد فناوری های آبیاری در کشاورزی استان کرمانشاه داده می شود در حد ۰/۵۴ است، بدین معناست که میزان کلی توجه و سرمایه گذاری روی ابعاد مختلف فناوری های آبیاری در استان کرمانشاه در وضعیت کنونی تنها ۵۴ درصد ظرفیت مطلوب ارزیابی می شود.

بحث

آب در کنار نقش مهمی که در کشاورزی دارد و منجر به توسعه پایدار می شود؛ اما استفاده نادرست و بی رویه از این منبع تجدیدناپذیر مشکلات زیادی را به وجود آورده است. استان کرمانشاه نیز از قطب های اصلی تولید کشاورزی کشور است و می تواند نقش مهمی در توسعه پایدار کشور داشته باشد؛ اما استفاده بیش از حد و نامناسب از آب در استان کرمانشاه جهت تولید مواد غذایی بیشتر، رفتاری غیرمنطقی است که در بخش کشاورزی با آن روبه رو هستیم که تبعات منفی این پدیده به خود حوزه کشاورزی برمی گردد. به طوری که کاهش آب های زیرزمینی و ایجاد دشت های ممنوعه شده را در این استان به دنبال داشته است؛ بنابراین باتوجه به نقش آب در کشاورزی و اینکه بخش کشاورزی بایستی بتواند غذای کافی برای جمعیت حال و آینده تأمین نماید (رضاییان و رضاییان، ۱۳۹۵؛ ری و همکاران^۱، ۲۰۱۳)، و مسئله اصلی کشاورزی کمبود آب است که باید آن را مدیریت نمود. از آنجایی که پایداري بخش کشاورزی وابسته به آب، مستلزم اصلاح نظام آبیاری از طریق توسعه فناوری های نوین آبیاری و به کارگیری فناوری های نوین متناسب با شرایط از طریق ارزیابی عملکرد فناوری است (بیلائی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ لذا این پژوهش باهدف کلی بررسی و تحلیل فناوری های آبیاری موجود در کشاورزی استان کرمانشاه با بهره گیری از روش اطلس فناوری و تکنیک کریتیک (CRITIC) در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ انجام شد.

یافته های حاصل از تحلیل صورت گرفته بر اساس روش اطلس فناوری نشان دهنده تأثیر کلیه عوامل بر توسعه کاربرد فناوری های نوین در بخش آب و آبیاری در استان کرمانشاه است. اما از دیدگاه پاسخ دهندگان، برخی عوامل در ارتقای فناوری اهمیت بیشتری دارند. به طوری که گرایش به همکاری کشاورزی در به کارگیری فناوری های آبیاری در کشاورزی استان کرمانشاه به عنوان مهم ترین عامل شناسایی شده است. زیرا همکاری از طریق تعامل موقعیتی عمل می کند که کشاورزان از تجربیات همتایان می آموزند و ریسک را تقسیم می کنند. اولویت همکاری با مطالعه سعادت و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی دارد که اعتماد و مشارکت را کلیدی می دانند. این نشان دهنده نقش کلیدی تعامل و همکاری فعالانه کشاورزی در فرایند به کارگیری و توسعه فناوری است. این یافته

¹ Ray et al

² Billaii et al

بیشتر ناظر بر تاثیر بیشتر عوامل غیر فنی بر نسبت به عوامل فنی در به‌کارگیری و ارتقای فناوری‌های آب محور در بخش کشاورزی است. این یافته در کنار تأکید ویژه پاسخگویان بر قدرت مالی کشاورزان و دسترسی به امکانات اولیه و موردنیاز فناوری به‌عنوان عوامل دوم و سوم، بیانگر محوریت نقش کشاورز در طراحی و تولید فناوری‌های آب محور است. یافته با نتایج تحقیق زاهدپور یگانه و همکاران (۱۴۰۴)، لایخار و همکاران (۲۰۲۴) که معتقد بر لزوم دیدگاه سیستمی در تولید و طراحی فناوری‌ها می‌باشند همخوانی دارد؛ لذا تحلیل اکولوژی انسانی کشاورزان که ابعاد انسانی و غیر انسانی را در بر گرفته و راهبر رفتارهای کشاورز است شرط اساسی موفقیت طراحان و مدیران فناوری در بخش کشاورزی است. در تأیید این یافته عواملی مانند قدرت پذیرش ریسک در بین کشاورزان، وجود رهبری برای ایجاد انگیزه، خلاقیت بالقوه در کشاورزان در رتبه‌های بعدی قرار دارند که به نوعی لزوم مدیریت و برنامه‌ریزی چالش در حوزه‌های فرهنگی، روانشناختی یا رهبری در فرایند ارتقای فناوری می‌باشد. از این رو بعد فنی و تخصصی فناوری‌های آب محور میبایست مکمل زیست بوم پایدار کشاورزی بوده و این مهم در اکولوژی‌های انسانی متفاوت انعطاف‌پذیری و ارزیابی مدام طراحان و مدیران توسعه فناوری در کشاورزی را می‌طلبد. در مجموع می‌توان گفت که ابعاد اجتماعی و اقتصادی مانند همکاری، قدرت مالی، و دسترسی به امکانات فیزیکی در اولویت اول برای ارتقای فناوری آبیاری کشاورزی قرار دارند. این مسئله می‌تواند جهت‌گیری سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلان در زمینه توسعه فناوری‌های آبیاری را مشخص‌تر نماید. این نتایج با برخی مطالعات پیشین همسو است. همچنین با پژوهش سعاد و همکاران (۱۳۹۵) که از اعتماد متقابل و مشارکت گروهی به‌عنوان عوامل تسهیل‌کننده ارتقای فناوری یاد می‌کند همخوانی دارد، مطالعه پرتی^۱ (۱۹۹۵) در مطالعات خود نشان داده که پذیرش جمعی فناوری اغلب مقدم بر پذیرش فردی است. مطابق با نتایج پژوهش‌های پیشین، تأثیرپذیری انتخاب فناوری از عوامل اجتماعی به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده مطرح شده است (پنل و همکاران^۲، ۲۰۰۶؛ راجرز^۳، ۲۰۰۷). به‌ویژه در حوزه فناوری‌های کشاورزی، تطابق اجتماعی-فرهنگی، میزان مشارکت بهره‌برداران و سطح آموزش، نقش بسزایی در انتخاب و استفاده مستمر از فناوری‌های جدید دارد (معتقد و چوپچیان^۴، ۲۰۲۴). تفاوت‌ها نیز به‌احتمال زیاد ناشی از ویژگی‌های زمینه‌ای منطقه، میزان توسعه نهادی و نوع فناوری‌های موردنظر است.

یافته‌های تحقیق در خصوص بررسی ابعاد فناوری نشان‌دهنده نقش برتر کشاورزان و طراحان در بعد انسان افزار نسبت به کارشناسان برای هر دو گروه مذکور کارایی و تناسب تکنولوژی با زیست‌بوم کشاورزی به معنای پایداری شغلی و در نهایت موفقیت در ابعاد مختلف توسعه کشاورزی است و بدیهی است که با حساسیت بیشتر در بعد انسان‌افزار تکنولوژی‌های آب محور نقش ایفا کنند. اما کارشناسان در بیشتر شاخص‌ها (به‌ویژه ابتکار، یادگیری، مسئولیت‌پذیری) پایین‌ترین میانگین را دارند. این مسئله ممکن است به دلیل نوع وظایف اداری یا ساختار بوروکراتیک باشد که ابتکار عمل و یادگیری تطبیقی را محدود می‌کند. به عبارتی به‌احتمال زیاد تغییر تکنولوژی در کشاورزی به طور مستقیم نفعی به کارشناسان دولتی نمی‌رساند و بعلاوه بر وظایف شغلی آنها نیز ممکن است بیفزاید؛ لذا با شرایط موجود تکنولوژی‌های آب محور در کشاورزی مشکل‌چندانی ندارند و همچنین نقش آنها در بعد انسان‌افزار کمتر از دو گروه دیگر است.

یافته‌های تحقیق بهتر بودن بعد محیط افزار (۰/۶۲) را نسبت به انسان افزار با ۰/۵۸، و بعد فن افزار با مقدار ۰/۵۲ در استان نشان داده است. چرایی عدم هماهنگی ابعاد مختلف فناوری در استان مساله‌ای است که نیاز به تحقیق بیشتری دارد. به نظر می‌رسد محیط افزار فناوری تحت تاثیر پیشرفت فناوری‌ها در سایر ابعاد زندگی کشاورزان قرار گرفته است و محیط شرایط بهتری برای پذیرش فناوری‌های نوین از خود نشان می‌دهد. این یافته می‌تواند نقطه مثبت و شروعی برای اصلاحات اساسی در فناوری‌های کشاورزی استان باشد. در کنار این بعد وضعیت انسان‌افزار و فن‌افزار نیز از متوسط بالاتر و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های توسعه تکنولوژی موردتوجه باشد. اما کمترین مقدار که از متوسط مقادیر پایین‌تر بوده، مربوط به بعد اطلاعات افزار (۰/۴۶) است، این ضعف در سامانه‌های اطلاعاتی و مدیریت دانش را نشان می‌دهد که می‌تواند مانعی برای توسعه اثربخش فناوری‌های آبیاری باشد.

^۱ Pretty^۲ Pannell et al^۳ Rogers^۴ Mo'taqed & Choobchian

به‌ویژه در شرایط فعلی که هوش‌های مصنوعی در کنار پارادایم فکری مربوط به کشاورزی دقیق تعیین کننده و راهبر توسعه کشاورزی در کل دنیا است، عدم توجه به این یافته و عدم اقدام مؤثر در تشکیل پایگاه داده‌های فناوری در بخش کشاورزی منجر به عقب افتادگی ساختاری و فرایندی در فناوری‌های بخش کشاورزی به طور عام خواهد شد. به طور کل می‌توان گفت فرم نامقارن نشان دهنده‌ی عدم توازن میان ابعاد مختلف فناوری آبیاری است. براین اساس، توسعه شبکه‌های اطلاع‌رسانی، آموزش‌های کاربردی، و انتقال دانش بومی و فناورانه به کشاورزان می‌تواند به ارتقای سهم اطلاعات افزار و در نتیجه پایداری بیشتر فناوری کمک کند. زیرا این می‌تواند یکی از گلوگاه‌های اصلی در به‌کارگیری مؤثر فناوری‌های آبیاری باشد، و این شکاف اطلاعاتی می‌تواند به دلیل نبود ساختار مناسب برای تبادل دانش بین ذی‌نفعان، ضعف در انتقال دانش به کشاورزان یا محدود بودن کانال‌های ارتباطی باشد. از این‌رو، ارتقای زیرساخت‌های تبادل دانش، توسعه شبکه‌های دانش‌بنیان، و آموزش مداوم کاربران برای افزایش اثربخشی اطلاعات فناورانه ضروری است. علاوه بر عدم مطالعه در ابعاد مختلف مدیریت فناوری و نوآوری در کشاورزی مدیران و مسئولان مربوطه را از اهمیت پرداختن به ساماندهی مدیریت اطلاعات و تشکیل پایگاه داده‌ها باز داشته است. به عبارتی توسعه تکنولوژی در چارچوب برنامه‌ای بلندمدت و استراتژیک که بتواند همگام با تغییرات ابعاد مختلف نظام‌های اقتصادی و اجتماعی حاکم بر کشاورزی به توسعه و تقویت تکنولوژی‌های به‌روز بپردازد، عمل نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

فناوری همواره به‌عنوان ابزار بهره‌وری بیشتر از منابع در توسعه ابعاد مختلف نقش ایفا کرده است. نقصان اساسی در منابع آب کشاورزی استان از یک سو و ازسوی دیگر ضعف توسعه فناوری و نبود نظام جامع مدیریت فناوری در کشاورزی دلیل اصلی انجام این تحقیق در استان کرمانشاه بوده است. از آنجاکه توسعه فناوری نیازمند نگرش چندبعدی و تصمیم‌گیری بر اساس معیارهای مختلف است چارچوب اصلی تحقیق بر مدل اطلس فناوری به‌عنوان یکی از مدل‌های جامع بررسی و ارزیابی فناوری قرار گرفته است. این مدل در این پژوهش برای اولین بار در فناوری‌های بخش کشاورزی مناسب‌سازی و بکار رفته است و تحقیق در این بعد هم در زمینه روش‌شناسی و هم در بعد مبانی نظری نوآوری داشته است. تحقیق به‌طور کلی نشان می‌دهد که اطلاعات، داده‌ها و دانش ضمنی مرتبط با فناوری هنوز به سطح بهینه نرسیده است. چنین وضعیتی می‌تواند ناشی از چالش‌هایی چون ضعف در زیرساخت‌های اطلاعاتی، عدم دسترسی پایدار به آموزش‌های به‌روز، یا ناکارآمدی سامانه‌های اطلاعات کشاورزی باشد. براین اساس، توسعه شبکه‌های اطلاع‌رسانی، آموزش‌های کاربردی، و انتقال دانش بومی و فناورانه به کشاورزان می‌تواند به ارتقای سهم اطلاعات افزار و در نتیجه پایداری بیشتر فناوری کمک کند. زیرا این می‌تواند یکی از گلوگاه‌های اصلی در به‌کارگیری مؤثر فناوری‌های آبیاری باشد، و این شکاف اطلاعاتی می‌تواند به دلیل نبود ساختار مناسب برای تبادل دانش بین ذی‌نفعان، ضعف در انتقال دانش به کشاورزان یا محدود بودن کانال‌های ارتباطی باشد. از این‌رو، ارتقای زیرساخت‌های تبادل دانش، توسعه شبکه‌های دانش‌بنیان، و آموزش مداوم کاربران برای افزایش اثربخشی اطلاعات فناورانه ضروری است. از نظر نقش در بعد انسان‌افزاری، کشاورزان و طراحان تأثیرگذارترین گروه‌ها هستند، بنابراین سیاست‌های فناورانه بایستی به‌صورت دوسویه میان طراحان و کشاورزان تنظیم شود، و نقش کارشناسان بایستی بازتعریف و تقویت گردد تا شکاف میان نظریه و عمل در فرایند انتقال فناوری کاهش یابد. در ارزیابی عوامل محیطی پایین‌بودن و نارضایتی از فضای مناسب سازمانی گویای فقدان زیرساخت‌ها و فضای حمایتی کافی برای نهادینه‌سازی فناوری‌های نوین است؛ لذا تقویت فضای نهادی، تسهیل قوانین، افزایش استقلال محلی و توسعه زیرساخت‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری از پیش‌شرط‌های حیاتی برای تحقق کارآمدی فناوری‌های آبیاری به شمار می‌رود. پژوهش رضایی، حسینی و شعبانعلی فمی (۱۳۸۸) درباره موانع توسعه آبیاری نوین در غرب کشور نیز تأکیدی بر نتایج این پژوهش است؛ زیرا به این نتیجه دست یافتند که گرچه زیرساخت‌های فنی و سازوکاری توسعه یافته‌اند، اما نبود آموزش مستمر، عدم دسترسی به اطلاعات فنی و مقاومت کاربران به دلیل ناآگاهی مهم‌ترین موانع اثربخشی فناوری‌ها به شمار می‌آیند. باین حال برخلاف این شواهد، ارزیابی ما از وضعیت کنونی استان کرمانشاه نشان می‌دهد که بعد انسانی و اطلاعاتی کمترین وزن را در تحلیل به خود اختصاص داده است. این موضوع را می‌توان به ضعف در طراحی سیاست‌های یکپارچه، کم‌توجهی به دانش بومی، و عدم سرمایه‌گذاری هدفمند

در ارتقای مهارت بهره‌برداران نسبت داد. همچنین نتایج وزن‌دهی ابعاد با روش کریتیک نیز گویای آن است که در وضعیت فعلی اولویت اصلی در توسعه فناوری‌های آبیاری به بعد سخت‌افزار اختصاص یافته، درحالی که میزان اهمیت به انسان افزار و اطلاعات افزار بیانگر کم‌توجهی به زیرساخت‌های اطلاعاتی و فناوری‌های دیجیتال در مدیریت منابع آب است. این تحلیل بیانگر نیاز مبرم به بازنگری در سیاست‌گذاری‌های فناورانه باهدف تقویت هوشمندسازی، آموزش نیروی انسانی و هماهنگ‌سازی ابعاد مختلف آبیاری است.

بنابراین، می‌توان چنین استنتاج کرد که؛ اگرچه سرمایه‌گذاری بر ابعاد ساختاری و فناورانه در استان کرمانشاه در حال انجام است، اما عدم توجه به مؤلفه‌های نرم‌افزاری از قبیل آموزش، دانش فنی، مدیریت اطلاعات و انگیزه بهره‌برداران مانع اصلی تحقق کامل ظرفیت‌ها محسوب می‌شود. به‌طوری که این عدم توازن، منجر به کاهش اثربخشی سیاست‌ها، نرخ فرسودگی تجهیزات، و افت بهره‌وری آب کشاورزی در میان مدت و بلندمدت خواهد شد. در نتیجه سیاست‌گذاران بایستی از رویکردهای تک‌بعدی (متمرکز بر سخت‌افزار یا ساختار نهادی) فاصله گرفته و به سمت سیاست‌های جامع‌نگر با محوریت ظرفیت‌سازی انسانی و توسعه زیرساخت‌های دانشی حرکت کنند.

در مجموع، مطالعه حاضر نه تنها وضعیت کنونی فناوری‌های آبیاری در یکی از مناطق حساس کشور را ترسیم می‌کند، بلکه با ارائه چارچوبی تحلیلی، امکان تصمیم‌گیری داده‌محور و باز طراحی استراتژی‌های بهبود بهره‌وری منابع آب در بخش کشاورزی را فراهم می‌آورد. به‌طوری که می‌تواند مبنایی برای رصد پیشرفت فناوری‌های آبیاری، سیاست‌گذاری هدفمند، و طراحی چارچوب‌های ارزشیابی بومی در سایر مناطق با شرایط اقلیمی و ساختاری مشابه باشد.

بر اساس نتایج پژوهش، پیشنهادهای زیر در راستای به‌کارگیری فناوری آبیاری مناسب و افزایش سطح بهینه ارائه می‌شود:

پیشنهادهای کاربردی

تقویت بعد اطلاعاتی و دانش‌افزاری: با توجه به پایین‌ترین امتیاز این بعد، توسعه زیرساخت‌های تبادل دانش، سامانه‌های اطلاعات کشاورزی (AIS) و ابزارهای هوشمندسازی از ضرورت‌های اصلی است. ایجاد پایگاه داده منطقه‌ای برای اطلاعات آبیاری و اتصال آن به شبکه‌های ملی می‌تواند به ارتقای کیفیت تصمیم‌گیری و کاهش خطاها کمک کند.

ظرفیت‌سازی انسانی و ارتقای نقش کشاورزان و طراحان: نتایج نشان داد که کشاورزان و طراحان بیشترین سهم را در بعد انسان‌افزار دارند؛ بنابراین تدوین برنامه‌های آموزشی و مهارتی هدفمند برای این گروه‌ها می‌تواند در افزایش سرعت پذیرش فناوری‌های نوین و بهبود بهره‌برداری از آنها نقش کلیدی ایفا کند.

بازتعریف جایگاه کارشناسان سازمانی: به دلیل میانگین پایین شاخص‌های انسان‌افزار در میان کارشناسان، لازم است ساختار وظایف و مشوق‌های شغلی بازنگری شود. برگزاری دوره‌های ضمن خدمت، ارتقای انگیزش سازمانی و تقویت نقش کارشناسان به‌عنوان حلقه واسط انتقال فناوری از طراحان به کشاورزان پیشنهاد می‌شود.

تمرکز بر بهبود تجهیزات و فن‌افزار: نتایج روش CRITIC نشان داد فن‌افزار مهم‌ترین بعد در وضعیت کنونی است. ارتقای تجهیزات آبیاری تحت فشار، نوسازی سامانه‌های قدیمی و فراهم‌سازی دسترسی کشاورزان به فناوری‌های مقرون‌به‌صرفه از اقدامات ضروری در این حوزه است.

پایش دوره‌ای سطح فناوری آبیاری: استفاده منظم از شاخص TCC و مدل اطلس فناوری به صورت دوره‌ای (مثلاً هر سه سال یکبار) می‌تواند ابزاری برای رصد پیشرفت‌ها، سنجش اثربخشی سیاست‌ها و بازطراحی استراتژی‌های توسعه فناوری باشد.

پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده

ترکیب مدل اطلس فناوری با روش‌های پویایی سیستم‌ها: برای درک اثرات بلندمدت مداخلات سیاستی، ترکیب مدل اطلس فناوری با شبیه‌سازی‌های پویایی سیستم‌ها می‌تواند دیدی جامع‌تر در اختیار سیاست‌گذاران قرار دهد.

بررسی نقش فناوری‌های دیجیتال و هوشمندسازی: پژوهش‌های آینده می‌توانند بر کاربرد اینترنت اشیاء (IoT)، هوش مصنوعی و سامانه‌های پیش‌بینی نیاز آبی در بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی تمرکز کنند.

تحلیل اجتماعی-فرهنگی پذیرش فناوری های آب و آبیاری: ضعف نسبی در شاخص های ریسک پذیری و انگیزش کشاورزان ضرورت مطالعه جامعه شناختی و روان شناختی پذیرش فناوری های نوین آبیاری را برجسته می سازد. مدل سازی اثر تغییر اقلیم: بررسی تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر کارایی فناوری های آبیاری و توسعه فناوری های مناسب می تواند رویکردی آینده نگرانه در مدیریت منابع آب ارائه دهد. تحلیل سیاست های حمایتی و اقتصادی: پژوهش های آتی می توانند رابطه میان ابزارهای حمایتی (یارانه ها، تسهیلات اعتباری، بیمه کشاورزی) و میزان پذیرش فناوری های نوین آبیاری را به طور تجربی بررسی کنند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه رازی، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از اعضای هیات علمی، کارشناسان و کشاورزانی که در مراحل مختلف کار و به خصوص ارایه اطلاعات با محققان همکاری داشته اند کمال تشکر را دارند.

منابع

- ارشادی سیس، مهدی، خدایی محمودی، رضا، و خضروی اقدم، رضا. (۱۳۹۳). بررسی و ارزیابی اجزای فناوری با کمک مدل اطلس فناوری (مطالعه موردی: شرکت طراحی مهندسی و ساخت تجهیزات و ابزارآلات سایپا). فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی، ۱۱ (۲۲)، ۲۰-۹. <https://dor.sc.ac/dor.9-20.45-65>
- اعلم‌الهدی، علی‌اصغر. (۱۳۹۴). آب و فناوری اطلاعات: بررسی و احصای فناوری‌های راهبردی آب بر اساس مدل مفهومی. فصلنامه فناوری آب و مدیریت منابع، ۱۲ (۲)، ۴۵-۶۵. <https://www.sid.ir/FileServer/SF/6871394H01325>
- باقری، نیکروز، و جوادی، ارژنگ. (۱۴۰۱). ارزیابی سطح فناوری در تولید محصولات راهبردی کشاورزی ایران. فصلنامه توسعه فناوری کشاورزی، ۱۲ (۱)، ۳۳-۴۰. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26765403.1401.20.47.4.0>
- باللی، حمید، و کسبیلان لعل، فرزانه. (۱۴۰۰). ارزی‌گذاری اقتصادی منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی (مطالعه موردی: دشت همدان-بهار). فصلنامه اقتصاد و توسعه کشاورزی، ۳۵ (۱)، ۱۵۳-۱۳۵. <https://www.sid.ir/paper/1057390/fa>
- پورغلام آمیجی، مسعود، نجفیان، داود، و سعدی، توفیق. (۲۰۲۳). آسیب‌شناسی و شناخت عوامل عدم اجرایی‌شدن طرح‌ها، پروژه‌ها، فناوری‌ها و پژوهش‌های فناورانه آب کشور. نشریه مدیریت آب در کشاورزی، ۹ (۲)، ۱۶۵-۱۹۰. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764531.1401.9.2.12.5>
- رضایی، روح‌اله، حسینی، محمود، شعبانعلی فمی، حسین، و صفاء، لیل (۱۳۸۸). شناسایی و تحلیل موانع توسعه نانو در بخش کشاورزی ایران. فصلنامه علمی پژوهشی سیاست علم و فناوری، ۲ (۱)، ۱۶-۲۸. <https://dor.sc.ac/dor/20.1001.1.20080840.1388.2.1.3.6>
- رضاییان، احد، و رضایان، علی‌حسین. (۱۳۹۵). آینده پژوهی بحران آب در ایران به روش سناریوپردازی. مجله اکوهیدرولوژی، ۳ (۱)، ۱۷-۱. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.59185>
- زاهدپوریگانه، حسین، خورسند، افشین، رجا، امید، و کنعانی، الهه. (۱۴۰۴). تکنولوژی‌های هوشمند در کشاورزی: مدیریت آب و منابع در عصر تغییرات اقلیمی. نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۵ (۳)، ۴۳-۲۰. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11765.1155>
- سعادت، سارا، رضانی دارابی، حمید، و چرمچیان لنگرودی، مهدی. (۱۳۹۵). نقش سرمایه اجتماعی بر فرایند پذیرش نوآوری‌ها از دیدگاه توتون‌کاران استان مازندران. ششمین کنگره ملی علوم ترویج و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. https://icaenr.areeo.ac.ir/articles?_action=article&au=136529
- شهمیرزادی، طیبه، حریری، نجلا، فهیم‌نیا، فاطمه، باب الحوانجی، فهیمه، و مطلبی، داریوش. (۱۳۹۸). واکاوی شاخص‌های سنجش و ارزیابی علم، فناوری و نوآوری در سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. دو فصلنامه علمی دانشگاه شاهد، پژوهش‌های علم سنجی، ۱۵ (۱)، ۴۶-۴۷. <https://doi.org/10.22070/rsci.2018.639>
- عبدی، آمنه، و میرک‌زاده، علی‌اصغر. (۱۴۰۱). آینده فناوری‌های آب محور در کشاورزی استان کرمانشاه. سومین همایش ملی کم آبیاری و استفاده از آب‌های نامتعارف در مناطق خشک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. <https://civilica.om/doc/1666247>
- کریمی، محمدرضا، و بهرامی، سمیه. (۲۰۱۶). ارزیابی و تحلیل محتوای تکنولوژی به کمک روش اطلس تکنولوژی (مطالعه موردی واحد تولیدی نوار آبیاری از پلی‌اتیلن در بندعباس). دومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در مدیریت، اقتصاد و حسابداری، کوالالامپور، مالزی. <https://elmnet.ir/doc/20422916-22551>
- گل‌قامت‌راد، نیما، رضوی، سیداحمد، صفوی، سیدعباس، غلامی، جواد، و غفار پور، رضا. (۱۳۹۸). رتبه‌بندی مجموعه‌های نگهداری و تعمیرات هواپیماهای نظامی بر اساس عملکرد عامل انسانی با استفاده از روش هیبریدی CRITIC-VIKOR. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی دفاعی، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، تهران، ایران. <https://civilica.com/doc/1258180>
- محمودی، یزدان، قمرنیا، هوشنگ، و جوزی، مهدی. (۱۴۰۳). بررسی تأثیر سطوح ایستابی کم عمق و شور بر عملکرد و کارایی مصرف آب کینوا (Chenopodium Quinoa Willd) در محیط گلخانه. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱ (۱۸)، ۱۷۲-۱۵۵. https://idj.aid.ir/article_193195.html

- محمدیان، ایوب،، حیدری دهویی، جلیل، و قربانی، علیرضا. (۱۳۹۹). اولویت بندی کاربردهای اینترنت اشیاء در کشاورزی با استفاده از شاخص های توسعه پایدار. *نشریه حقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران*، ۵۱ (۴)، ۷۹۷-۷۴۷. <https://www.sid.ir/paper/524964/fa>
- میرعمادی، سیدایمان. (۱۳۹۸). نظام ملی نوآوری و نقش آن در بهبود سیاست های علم، فناوری و نوآوری. فصلنامه علمی- پژوهشی سیاست علم و فناوری، ۱۲ (۲)، ۱۵۴-۱۳۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080840.1398.12.2.10.5>
- نیکزاد، مینا، مرادی، حمیدرضا، و جلیلی، خلیل. (۱۴۰۴). ارزیابی کمی منابع آب زیرزمینی و ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی و عوامل اقلیمی (مطالعه موردی: دشت چمچال). *نشریه فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۵ (۳)، ۱۱۳-۹۲. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12081.1164>

References

- A'lamolhoda, A. A. (2015). Water and information technology: Reviewing and identifying strategic water technologies based on the conceptual model. *Water Technology and Resource Management Quarterly*, 12 (2), 45–65. <https://www.sid.ir/FileServer/SF/6871394H01325> [In Persian]
- Abdi, A., & Mirkzadeh, A. A. (2022). The future of water-oriented technologies in agriculture in Kermanshah Province. In *Proceedings of the 3rd National Conference on Deficit Irrigation and the Use of Non-conventional Waters in Arid Regions*, Razi University, Kermanshah, Iran. <https://civilica.com/doc/1666247> [In Persian]
- Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM). *Springer*, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9>
- Amini, J., Darvishi, M., & Khaledian, Y. (2020). A comprehensive framework for assessing the technological maturity of irrigation systems in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 239, 106267. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020>
- Bagheri, N., & Javadi, A. (2022). Assessing technology level in the production of strategic agricultural products in Iran. *Journal of Agricultural Technology Development*, 12 (1), 23–40. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26765403.1401.20.47.4.0> [In Persian]
- Balali, H., & Kasbian Laleh, F. (2021). Economic valuation of groundwater resources in the agricultural sector: A case study of Hamedan–Bahar Plain. *Agricultural Economics and Development*, 35 (1), 135–153. <https://www.sid.ir/paper/1057390/en> [In Persian]
- Balali, H., Fami, H. S., Rezvanfar, A., & Sajjadi, S. M. (2011). Analysis of sustainable water resource management in agriculture: A case from Iran. *Journal of Sustainable Development*, 4 (1), 160–168. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n1p160>
- Billaii, A., Akram, A., Ahmad, S., & Hassan, S. (2021). Assessment of modern irrigation technologies for sustainable agricultural water management. *Journal of Water and Climate Change*, 12(3), 764–776. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.123>
- Bjornlund, H., Nicol, L. A., & Klein, K. K. (2009). The adoption of improved irrigation technology and management practices – A study of two irrigation districts in Alberta, Canada. *Agricultural Water Management*, 96 (1), 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.07.007>
- Brent, A. C., Labuschagne, C., & Van Erck, R. P. G. (2011). Technology assessment in support of sustainable development: A framework for sustainable technology identification and assessment considering the triple bottom line. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.004>
- Ershadi Sis, M., Khodaei Mahmoudi, R., & Khezrloei Aghdam, R. (2014). Investigation and evaluation of technology components using the technology atlas model (Case study: Saipa Equipment and Tool Design and Manufacturing Company). *Quarterly Journal of Industrial Technology Development*, 11(22), 9–20. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26765403.1392.11.22.2.5> [In Persian]
- Food and Agriculture Organization & The World Bank. (2025). Iran –Average precipitation in depth (mm per year). In *World Development Indicator*. Washington, DC, USA. <http://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.PRCP.MN>
- Golghamat Rad, N., Razavi, S. A., Safavi, S. A., Gholami, J., & Ghaffarpour, R. (2019, July 7). Ranking of military aircraft maintenance and repair complexes based on human factor performance using the hybrid CRITIC-VIKOR method. Paper presented at the 5th National Conference on Defense Sciences and Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/1258180> [In Persian]
- Harfouche, A., Merhi, M. I., Albizri, A., Dennehy, D., & Thatcher, J. B. (2025). Sustainable Development Through Technological Innovations and Data Analytics. *Information Systems Frontiers*, 26, 1989–1996. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10796-024-10570-2>
- Helvoigt, T. L., & Adams, D. M. (2009). Using a Productivity frontier to evaluate regional efficiency of the forest products industry in the western United States. *Forest Policy and Economics*, 11 (5-6), 308–313. <https://doi.org/10.1016/i.forpol.2009.01.001>

- Karimi, M. R., & Bahrami, S. (2016). Technology content evaluation and analysis using the technology atlas method (Case study: Polyethylene irrigation tape production unit in Bandar Abbas). *Paper presented at the 2nd International Conference on Modern Research's in Management, Economics & Accounting*, Kuala Lumpur, Malaysia. <https://elmnet.ir/doc/20422916-22551> [In Persian]
- Keramatzadeh, A., Momeni, M., & Sadeghi, S. H. R. (2016). Assessment of groundwater depletion due to agricultural overuse in semi-arid regions of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75 (12), 1043. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5877-x>
- Khosravi, H., & Akbari, M. (2019). Adoption and impacts of smart irrigation technologies: A case study of preciside irrigation in Iran. *Water Policy*, 21 (3), 602-617. <https://doi.org/10.2166/wp.2019.123>
- Knowler, D., & Bradshaw, B. (2007). Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy*, 32(1), 25-48. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306919206000224>
- Lakhari, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., and Chauhdary, J. N. (2024). A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*, 14(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141> MDPI
- Miremadi, S. I. (2019). National innovation system and its role in improving science, technology, and innovation policies. *Scientific-Research Journal of Science and Technology Policy*, 12(2), 135-154. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080840.1398.12.2.10.5> [In Persian]
- Mohammadi, Y., Ghamarnia, H., & Jowzi, M. (2024). Investigating the effect of shallow and saline water table levels on the yield and water use efficiency of quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd) in a greenhouse environment. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 18(1), 155-172. https://idj.iaid.ir/article_193195.html [In Persian]
- Mohammadian, A., Heidari Dehavi, J., & Ghorbani, A. (2020). Prioritizing applications of the Internet of Things in agriculture using sustainable development indicators. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 51(4), 747-797. <https://www.sid.ir/paper/524964> [In Persian]
- Mo'taqed, M., & Choobchian, Sh. (2024). Analyzing Indicators of Adaptive Capacity of Agricultural Units in Water Insecurity Conditions in Hamedan Province. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(2), 1-14. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v11i2.2402-1312>
- Munguía, L., Escalante, J. C., & Robles Belmont, E. (2021). The management of scientific and technological infrastructures: The case of the Mexican National Laboratories. *arXiv preprint arXiv:2203.04878*. https://doi.org/10.1162/qss_a_00230
- Nikzad, M., Moradi, H. R., & Jalili, K. (2025). Quantitative assessment of groundwater resources and its relationship with land use changes and climatic factors (Case study: Chamchal Plain). *Advanced Technologies in Water Productivity*, 5(3), 92-113. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12081.1164> [In Persian]
- Pannell, D.J., Marshall, G.R., Barr, N., Curtis, A., Vancley, F., & Wilkinson, R. (2006). Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 46(11), 1407-1424. <https://doi.org/10.1071/EA05037>
- Pourgholam Amiji, M., Najafian, D., & Saadi, T. (2023). Diagnosing and identifying factors behind the non-implementation of national water projects, technologies, and research. *Water Management in Agriculture*, 9 (2), 165-190. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764531.1401.9.2.12.5> [In Persian]
- Preite, L., Solari, F., & Vignali, G. (2023). Technologies to Optimize the Water Consumption in Agriculture: A Systematic Review. *Sustainability*, 15(7), 5975. <https://doi.org/10.3390/su15075975>
- Pretty, J. (1995). Regenerating Agriculture: Policies and Practice for Sustainability and Self-Reliance. *Earthscan Publications*, London. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3105021>
- Ray, D. K., Mueller, N. D., West, P. C., & Foley, J. A. (2013). Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLOS ONE*, 8(6), e66428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066428>
- Rezaei, R., Hosseini, M., Shabaanalifami, H., & Safa, L. (2009). Identifying and analyzing barriers to nanotechnology development in Iran's agricultural sector. *Science and Technology Policy Quarterly*, 2 (1), 16-28. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20080840.1388.2.1.3.6> [In Persian]

- Rezaeian, A., & Rezaian, A. H. (2016). Future studies on Iran's water crisis using scenario planning. *Ecohydrology*, 3 (1), 1–17. <https://doi.org/10.22059/ije.2016.59185> [In Persian]
- Rogers, E. M. (2007). *Diffusions* (5th ed). Free Press, New York, USA. <https://doi.org/10.1016/j.jmig.2007.07.001>
- Saadat, S., Ramezani Darabi, H., & Charmchian Langaroudi, M. (2016). The role of social capital in the process of innovation adoption from the perspective of tobacco farmers in Mazandaran Province. *The Sixth National Congress on Agricultural Extension and Education and Natural Resources*, Shiraz University, Shiraz, Iran. https://icaeenr.areeo.ac.ir/articles?_action=article&au=136529 [In Persian]
- Shahmirzadi, T., Hariri, N., Fahimnia, F., Babalhavangi, F., & Matlabi, D. (2019). Analyzing indicators for measuring and evaluating science, technology, and innovation in the Agricultural Research, Education and Extension Organization. *Shahed University Scientific Bi-quarterly, Scientometric Researches*, 5(1), 47-66. <https://doi.org/10.22070/rsci.2018.639> [In Persian]
- Wiewie, S., Lin, Z., & Haibo. (2021). Technology audit and innovation efficiency: Evidence from manufacturing industries in China. *Journal of Engineering and Technology Management*, 60, 101633. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2021.101633>
- Xudayev, A., Jalilov, S. M., & Rasulov, M. (2021). Water resource management in arid regions: Challenges and adaptation strategies. *Journal of Water and Climate Change*, 12 (4), 1182–1195. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.001>
- Zahedpoor Yeganeh, H., Khorsand, A., Raja, O., & Kanaani, E. (2025). Smart technologies in agriculture: Water and resource management in the era of climate change. *Advanced Technologies in Water Productivity*, 5(3), 20-43. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11765.1155> [In Persian]
- Zhang, X., Huang, M., VanLoocke, A. & Zhang, Q. (2019). Modeling the effects of irrigation on land surface fluxes and crop productivity over the U.S. Midwest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 89-105. <http://doi.org/j.agrformet.2019.02.030>

Estimating the suspended sediment load in the Bahmanshir River using remote sensing

Niousha Mohmedi¹ , Morteza Bakhtiari² , and Javad Zahiri³ 

1. Department of marine structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Khuzestan, Iran. E-mail: n.mohmadi95@gmail.com
2. Corresponding author, Department of marine structures, Faculty of Marine Engineering, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Khuzestan, Iran. E-mail: bakhtiari@kmsu.ac.ir
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Civil Engineering, Khuzestan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Khuzestan, Iran. E-mail: zahiri983@gmail.com

Article Info.

Article type:

Research Article

Article history:

Received 25 July 2025

Received in revised form 26
October 2025

Accepted 03 January 2026

Available online 23 september
2026

Keywords:

Bahmanshir River,
suspended sediment load,
remote sensing method,
Modis satellite,
dam and lock navigation.

ABSTRACT

Objective: Considering to the Bahmanshir River is one of the most important exploitable rivers in the country, and currently various projects, including the construction of upstream and downstream Bahmanshir dams and navigation locks, the Torah Bakhakh pumping station, are being studied and implemented on this river, the aim of the present study was to estimate the rate of suspended sediment load that could affect the aforementioned projects.

Method: There are various methods for estimating the rate of suspended sediments and they have always been used by water science engineers. Today, with the advancement of technology and new technologies, new methods have been developed. In the present study, MODIS satellite data was used in remote sensing to study the estimation of suspended sediment load.

Results: The results of the research show that the most optimal parameter for estimating suspended sediment concentration is the red and infrared bands. Also, the significance level in both tests at the Torah Bakhakh station (annual data) and stations 3 and 5 (daily, one-year data) is greater than 0.05, and at the Torah Bakhakh station (daily, ten-year data) and stations 1, 2, and 4 (daily, one-year data) is less than 0.05.

Conclusions: The results indicate that MODIS satellite data can be effectively used to estimate suspended sediment concentration in the Bahmanshir River. The red and infrared bands were identified as the most suitable parameters for sediment estimation. Statistical results showed significant relationships at some stations and time scales, while others were not statistically significant. Overall, remote sensing provides a useful tool for monitoring suspended sediment and supporting the planning and management of hydraulic projects along the Bahmanshir River.

Cite this article: Mohmedi, N., Bakhtiari, M., & Zahiri, J. (2026). Estimating the suspended sediment load in the Bahmanshir River using remote sensing. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 100-116. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12463.1177>



© The Author(s)

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12463.1177>

Publisher: Razi University.

Introduction

The Karun River is one of the most water-rich rivers in Iran, covering a very large area of the Zagros Heights in its watershed, and it changes direction multiple times along its course. The Bahmanshir River is one of the most important navigable rivers in the country. Currently, various projects, including the construction of dams and navigational locks both upstream and downstream of the Bahmanshir River, are being studied and implemented. The aim of the present study is to estimate the amount of suspended sediment in this river, which can impact the performance of the ongoing projects during the operational period. Today, with advancements in technology and modern methods, new techniques have been developed for estimating suspended sediments, one of which is remote sensing. Reviewing the results of past research indicates the high efficiency of remote sensing methods in estimating the amount of suspended sediment load in non-tidal river conditions. However, studies show that there has not been a comprehensive investigation regarding the efficiency of using remote sensing methods for tidal rivers. Therefore, this current study focuses on estimating the amount of suspended sediment load using remote sensing in the Bahmanshir River, which is influenced by tidal effects.

Method

In the present study, remote sensing was used to estimate the amount of suspended sediment, and the efficiency of this method was examined and evaluated in comparison with the field-measured data. "In this study, to estimate the suspended sediment load, MODIS satellite data from the years 2009 to 2020 were used, covering the area from the construction site of the Bahmanshir dam and navigational lock downstream to the beginning of the river, along a length of 90 kilometers. The information collected and obtained for the current research includes data on suspended sediment concentration and satellite images from the MODIS sensor, as well as suspended sediment concentration data related to three time periods: fourteen years (annual average), ten years (daily), and one year (daily). This data has been provided by the Khuzestan Water and Power Organization, collected in the field for use in studies related to the construction of the Bahmanshir dam and navigation lock downstream. The necessary satellite images were obtained from Google Earth Engine and processed through coding in the Python environment. The study area is first defined in Google Earth software and saved in KML format. Then, using ArcGIS software, the saved KML file is imported and converted into a shapefile. In the next step, the shapefile of the study area is brought into the coding environment, and further coding is carried out. Subsequently, based on the coding time, images with a spatial resolution of 250 meters are downloaded. It is worth mentioning that in this method, initial processes including geometric corrections, atmospheric corrections, and georeferencing of the images are performed in ENVI software. To examine the correlation of the data and its significance, Pearson correlation test was used between water reflectance (independent variable) and suspended sediment concentration (dependent variable). Additionally, besides the reflectance values of the red and near-infrared bands, the band ratio ($b1/b2$) was also used as an independent variable, and the correlation values obtained for each case were analyzed. In the present study, to create an appropriate regression model and establish a relationship between the two variables, the normality of the suspended sediment concentration data (dependent variable) was first examined using SPSS

software. Subsequently, outlier data were identified and removed from the calculations, and the Shapiro-Wilk statistical test was used to assess the normality of the data

Results

As mentioned, in the present study, remote sensing methods were used to estimate the amount of suspended sediment load, and the effectiveness of this method was examined and evaluated in comparison with field-measured data. The results of the study indicate that the significance level in both the Kolmogorov-Smirnov and Shapiro-Wilk tests at the Tarrah Bakhakh station (annual data) and at stations 3 and 5 (daily, one-year data) is greater than 0.05, while at the Tarrah Bakhakh station (daily, ten-year data) and at stations 1, 2, and 4 (daily, one-year data) it is less than 0.05. This demonstrates the efficiency of the remote sensing method at the Tarrah Bakhakh station (daily, ten-year data) and at stations 1, 2, and 4 (daily, one-year data). Also The results obtained from this research indicate that satellite images from the MODIS sensor, due to their high temporal resolution (daily imaging), can play an important role in estimating suspended sediment in riverine environments and the final result show that For estimating the concentration of suspended sediments, the optimal parameters are the red and infrared bands.

Conclusions

As previously mentioned, the aim of this study was to estimate the concentration of suspended sediments in the Behmanshir River using remote sensing methods. The results obtained in this research are consistent with those of Tabatabaei and Sulaimani (2014) and Kazemzadeh et al. (2013), which showed that the wet season could be considered a suitable statistical period. Additionally, the results of Paulista et al. (2023) indicated that the red band is the best band for estimating suspended sediment concentration, which aligns with the findings of this study. Furthermore, the study by Kazemzadeh et al. (2013) demonstrated that using artificial neural networks and MODIS sensor images for monitoring suspended sediments is appropriate, which also agrees with the results of this research. The main findings of this study can be summarized as follows: The significance level in both tests at Tareh Bakh II station (annual data) and stations 3 and 5 (daily, annual data) is greater than 0.05, while at Tareh Bakh II station (daily, decadal data) and stations 1, 2, and 4 (daily, annual data), it is less than 0.05. The optimal parameters for estimating suspended sediment concentration are the red and near-infrared bands. Remote sensing is faster and more accurate compared to traditional methods. The results indicate that MODIS sensor satellite images, due to their high temporal resolution (daily imaging), can play an important role in estimating river sediment. There is no significant correlation between the data across all seasons, but limiting them to a wet period results in a higher correlation.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors of the paper sincerely appreciate the University of Marine Sciences and Naval Technology of Khorramshahr and the Khuzestan Water and Power Organization for their assistance in creating the conditions necessary for this research.

Ethical Considerations

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

Funding

Not applicable.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



تخمین میزان بار رسوبات معلق در رودخانه بهمنشیر با استفاده از سنجش‌ازدور

نیوشا مهمدی^۱، مرتضی بختیاری^۲، و جواد ظهیری^۳

۱. گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: n.mohmadi95@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران. رایانامه: bakhtiari@kmsu.ac.ir
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران. رایانامه: zahiri1983@gmail.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: رودخانه بهمنشیر، بار رسوبات معلق، روش سنجش‌ازدور، ماهواره مادیس، سد و قفل کشتیرانی.	هدف: هدف این پژوهش، تخمین میزان بار معلق رسوبات رودخانه بهمنشیر و بررسی تأثیر احتمالی آن بر عملکرد طرح‌های هیدرولیکی و کشتیرانی موجود و در حال اجرا در این رودخانه بود. روش پژوهش: در این پژوهش از روش سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره مادیس در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۹ در محدوده‌ای به طول ۹۰ کیلومتر از رودخانه بهمنشیر استفاده شد. همچنین، آزمون‌های آماری و شبکه عصبی پیشخور برای بررسی روابط بین داده‌ها و ارزیابی عملکرد مدل به کار گرفته شدند. یافته‌ها: نتایج نشان داد روش سنجش‌ازدور در ایستگاه طره‌بخاخ با داده‌های روزانه ده‌ساله و ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۴ با داده‌های روزانه یک‌ساله کارایی مناسبی دارد. همچنین، در دوره‌های مرطوب همبستگی بهتری میان داده‌ها مشاهده شد. نتایج شبکه عصبی پیشخور نیز نشان‌دهنده کارایی بالای این شبکه و امکان تعیین آرایش بهینه آن از طریق اجرای سناریوهای مختلف بود. نتیجه‌گیری: به کارگیری روش سنجش‌ازدور و شبکه عصبی پیشخور می‌تواند رویکردی مناسب برای تخمین و پایش بار معلق رسوبات رودخانه بهمنشیر و پشتیبانی از مدیریت طرح‌های هیدرولیکی و کشتیرانی این رودخانه باشد.

استناد: مهمدی، نیوشا؛ بختیاری، مرتضی؛ و ظهیری، جواد. (۱۴۰۵). تخمین میزان بار رسوبات معلق در رودخانه بهمنشیر با استفاده از سنجش‌ازدور. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۶ (۳)، ۱۱۶-۱۰۰.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12463.1177>

© نویسندگان

شر: دانشگاه رازی.



مقدمه

رودخانه‌ها منبع ارزشمندی برای تأمین آب موردنیاز برای مصارف صنعتی، کشاورزی و زیست‌محیطی هستند، بنابراین می‌توان گفت تأمین آب سطحی مهم‌ترین نقش اقتصادی یک رودخانه است (احدیان^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). رودخانه کارون یکی از پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران است و سطح بسیار وسیعی از ارتفاعات زاگرس را در حوضه آبریز خود دارد و در طول مسیر خود بارها تغییر جهت می‌دهد. این رودخانه در نزدیکی پل خرمشهر به دوشاخه تقسیم می‌شود. یکی از شاخه‌های این رودخانه در مسیری موسوم به کانال حفار امتداد یافته و بعد از گذشتن از میان شهر خرمشهر به اروندرود پیوسته به همراه رودخانه‌های دجله و فرات به سمت خلیج فارس جریان می‌یابد. مسیر دوم، اتصال رودخانه کارون به رودخانه بهمنشیر است که مستقیماً وارد خلیج فارس می‌شود. به طور معمول رواناب رودخانه کارون در مسیر عبور کانال حفار جریان داشته و دبی از رودخانه بهمنشیر چندان قابل توجه نبوده و بیشتر باهدف آبیاری مزارع منطقه به این مسیر منحرف می‌شود. شایان ذکر است که در زمان‌های سیلابی و افزایش قابل توجه آبدهی رودخانه کارون، بخشی از رواناب رودخانه از مسیر اصلی منحرف شده و به تالاب شادگان وارد می‌شود. با وارد شدن رواناب اضافی کارون به تالاب شادگان، دبی سیلاب رودخانه کارون در پایین‌دست اهواز کاهش یافته و مقادیر حداکثر یا لحظه‌ای دبی سیلاب در محدوده کانال مارد، آبادان و خرمشهر به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد این روند سبب کاهش خطر سیلاب و سیلگیری شهرهای آبادان و خرمشهر می‌شود. کانال حفار مصنوعی بوده و برای رفت و آمد کشتی‌ها تعریض و لایروبی گردیده و در نتیجه سهم بالائی از آب کارون در این کانال جریان می‌یابد. رود بهمنشیر در منطقه از اهمیت اقتصادی و نظامی ویژه‌ای برخوردار است. یکی از موضوعات مهم در خصوص بهره‌برداری از طرح‌های واقع شده بر روی رودخانه بهمنشیر رسوبات معلق است که می‌تواند عملکرد این طرح‌ها را در دوره بهره‌برداری تحت‌تأثیر خود قرار دهد. آبستگی یک فرآیند فرسایشی است که توسط حرکت آب بر روی بستر رسوبی هدایت می‌شود. آبستگی می‌تواند منجر به خطرات ایمنی سازه‌های ساخته شده و ناپایداری و فروپاشی سواحل رودخانه شود. به طور خاص، آبستگی در پیچ رودخانه‌ها یک پدیده شناخته شده است که توسط جریان‌های جریان ثانویه ایجاد می‌شود (مالکی^۲ و همکاران، ۲۰۲۵). به طور کلی روش‌های مختلفی برای محاسبه میزان بار رسوبات معلق وجود دارد که متداول‌ترین روش اندازه‌گیری غلظت رسوبات معلق بسیار معتبر بوده؛ اما این روش اغلب پرهزینه و زمان‌بر است (طباطبایی و همکاران، ۱۳۹۳). امروزه با پیشرفت تکنولوژی و ظهور فناوری‌های نوین استفاده از روش‌های جدید در محاسبه میزان بار رسوبات معلق توصیه شده است سنجش‌ازدور یکی از این روش‌هاست که می‌توان گفت سنجش‌ازدور باتوجه به ماهیت چند طیفی، پوشش دادن منطقه گسترده، داشتن روند زمانی منظم و همچنین به دلیل قابلیت تکرارپذیری تصویربرداری ماهواره‌ای روش مناسبی جهت محاسبه رسوبات معلق در آب‌های سطحی است. تا کنون محققین مختلفی از این روش استفاده کرده اند و نتایج تحقیقات ایشان نشان داده است که رابطه‌ای تجربی میان بازتابدگی و میزان رسوبات معلق وجود دارد. با بیان موارد فوق می‌توان گفت باتوجه به اهمیت رودخانه بهمنشیر لزوم داشتن اطلاعات صحیح و کافی جهت بهره‌برداری مناسب از این رودخانه بسیار حائز اهمیت می‌باشد بر این اساس و باتوجه به بررسی‌های صورت گرفته می‌توان گفت.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

حرکت ذرات معلق موجود در آب، هر زمانی که میزان سرعت برشی بستر از سرعت سقوط این ذرات بیشتر گردد، این ذرات می‌توانند به لایه‌ای بالاتر حرکت کنند و لذا نیروی بالابرنده متلاطم تا حدودی بیشتر از نیروی وزن آنهاست و در نتیجه ذرات به حالت معلق در می‌آیند. جابه‌جایی ذرات در شرایط اول و دوم را انتقال بار بستر و به حالت سوم انتقال بار معلق اطلاق می‌گردد. بر اساس تعریف آژانس حفاظت محیطی آمریکا^۳ (۲۰۰۳)، به طور کلی به ذرات ریز ارگانیک یا غیر ارگانیک که در آب معلق بوده و

¹ Ahadiyan² Maleki³ U.S. Environmental Protection Agency

به وسیله آن حمل می شوند رسوبات معلق گفته می شود. تحقیق در خصوص انتقال رسوبات همواره مورد توجه محققین مختلف بوده است که این تحقیقات را عمدتاً می توان در قالب تحقیقات میدانی، آزمایشگاهی و همچنین استفاده از مدل های عددی و روش های محاسباتی نرم دسته بندی نمود که در این بخش به تعدادی از آنها در دو طبقه بندی مطالعات داخل و خارج از کشور اشاره می شود.

۱. مطالعات داخل کشور

حیات زاده و همکاران (۱۳۹۴)، در تحقیق خود به مقایسه میان استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و روش های رگرسیونی سنج رسوب در پیش بینی میزان بار معلق پرداختند. ایشان در مطالعه خود از تعداد ۱۳۶ داده برداشت شده دبی جریان و رسوب متناظر و همچنین پارامترهای مورفولوژیکی در حوزه باغ عباس استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان می دهد که روش شبکه عصبی مصنوعی به مراتب دقت بیشتری نسبت به روش منحنی سنج دارد.

صدری نسب و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی به تأثیر پیچان رودها بر میزان غلظت بار معلق و مقدار تغییرات سطح آب در رودخانه اروند با استفاده از مدل مایک ۲۱ پرداختند. در این تحقیق به منظور صحت سنجی و واسنجی مدل از اندازه گیری های میدانی، نوسان سطح آب، سرعت جریان، و غلظت بار معلق در طول رودخانه استفاده شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد در بازه مستقیم رودخانه به فاصله ۱۷ کیلومتر بین آبادان تا خسروآباد ارتفاع نوسان سطح آب ۱۸٪ و غلظت بار معلق رودخانه ۳/۸٪ افزایش داشته و در فاصله های غیرمستقیم کوتاه تر، با دو مئاندر، ارتفاع تغییرات سطح آب ۲۲٪ و غلظت بار معلق رودخانه ۱۵٪ افزایش یافته است.

میرزاخانی و همکاران (۱۴۰۰)، در یک تحقیق آزمایشگاهی به مطالعه تأثیر پوشش گیاهی صلب بر نرخ انتقال رسوب در سواحل پرداختند. ایشان به منظور بررسی اثر مدل ساحل و پوشش گیاهی از یک فلوم لبه چاقویی مجهز به سیستم نیروسنج و دستگاه سرعت سنج صوتی داپلر استفاده نمودند. آزمایش های این تحقیق در دو چیدمان مثلثی و مستطیلی که شامل تراکم ۱۲ تا ۲۷۳ ساقه در واحد سطح بوده انجام شده است. نتایج حاصل از تحقیق نشان می دهد با افزایش تراکم پوشش و تعداد ردیف های پوشش، نرخ انتقال رسوب کاهش یافته به نحوی که در بیشترین تراکم نرخ انتقال رسوب تا ۸۰ درصد افزایش و در کمترین تراکم این میزان به مقدار ۲۰ درصد رسیده است. با گسترش استفاده از کامپیوتر استفاده از مدل های عددی و روش های محاسباتی نرم؛ مانند شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و توسعه بسیاری یافته است. به منظور شبیه سازی برآورد رسوبات رودخانه ها از تکنیک های شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی و درخت تصمیم استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان دهنده دقت بالای روش های مبتنی بر یادگیری ماشینی به ویژه مدل شبکه های عصبی کارایی بسیار خوبی برای مدل سازی و پیش بینی رسوب در مقیاس روزانه است.

۲. مطالعات خارج از کشور

رانگوت و همکاران^۱ (۲۰۱۵)، از جمله محققینی هستند که به مطالعه مد سریع در منطقه استواری رودخانه گارنون در طول دوره جزرومد بهار و اثر آن بر میزان غلظت رسوبات معلق پرداختند. نتایج به دست آمده در تحقیق آنها نشان می دهد میزان غلظت رسوب معلق دارای روند افزایش تدریجی قبل از جزرومد سریع از بیست و نه آگوست تا یکم سپتامبر ۲۰۱۵ میلادی و افزایش بسیار زیاد غلظت رسوبات در حین جریان سریع کشندی بوده است همچنین نتایج نشان می دهد جریان رسوب، در ساعت اول سیل، به طور متوسط حدود ۵۰۰ تن رسوبات را در ثانیه، در کانال عرضی ۷۰ متری حمل نموده است. مطالعه در خصوص جنبه های مختلف تأثیر پوشش های گیاهی بر روی مکانیزم های انتقال رسوب موضوع تحقیق محققین مختلف بوده است.

بررسی های واستیلا و همکاران^۲ (۲۰۱۶) بر روی جریان های فصلی و سطح آب نشان می دهد پوشش گیاهی می تواند باعث بهبود فرایند فرسایش و انتقال رسوبات در سواحل گردد و این پوشش گیاهی که در سواحل به اشکال مختلف وجود دارد می تواند

¹ Reungoat et al

² Vastila et al

تأثیر قابل توجهی در پویایی جریان، انتقال رسوب و فرایندهای بیولوژیکی و طبیعی داشته باشد. همچنین بررسی تأثیر پوشش گیاهی سخت (انعطاف‌ناپذیر) و انعطاف‌پذیر بر میزان انتقال رسوب در مجاری روباز نشان می‌دهد نقش پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر در این زمینه چشمگیرتر بوده است. به‌طوری که نرخ انتقال رسوب را حدود 70 درصد کاهش داده است و همچنین در حضور پوشش گیاهی سرعت جریان و غلظت رسوب به‌شدت دستخوش تغییر شده که نشان‌دهنده اهمیت پوشش گیاهی در پایداری بستر و سواحل است (پرناک و همکاران،^۱ ۲۰۱۸؛ ژانگ و همکاران،^۲ ۲۰۲۰).

احدیان و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی نتایج یک مطالعه عددی با استفاده از کد CCHE2D را برای بررسی تأثیر زاویه اتصال و نسبت دبی بر الگوهای جریان و فرسایش را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه پارامترهای هیدرولیکی و هندسی که بر حداکثر عمق نسبی آبستگي تأثیر می‌گذارند، تجزیه و تحلیل شدند نتایج به طور کلی با داده‌های تجربی مطابقت دارند و نشان می‌دهند که فرآیند آبستگي به همه این پارامترها بستگی دارد. نتایج عددی نشان می‌دهند که کاهش نسبت عرض شاخه فرعی به عرض کانال اصلی منجر به افزایش اندازه ناحیه جدایی می‌شود. علاوه بر این، افزایش نسبت عرض منجر به کاهش حداکثر عمق فرسایش بستر می‌شود. در نهایت، حداکثر عمق فرسایش بستر در محل تلاقی با افزایش زاویه اتصال افزایش می‌یابد.

چلوتی و همکاران^۳ (۲۰۱۹)، با استفاده از تصاویر سنجنده مادیس و لندست-۸ در مخزن دسکوبرتو ایالت گویاس به این نتیجه رسیدند محدوده قرمز طیف الکترومغناطیسی برای شناسایی تخمین غلظت رسوب معلق بسیار مناسب است. در تحقیقی با استفاده از بررسی خصوصیات طیفی ماهواره‌های لندست-۸ و سنتینل-۲ در تخمین میزان رسوبات و مواد معدنی معلق در دریاچه‌های آمازون دریافتند که تصاویر ماهواره‌ای در مورد بررسی میزان غلظت رسوبات کارساز است (ماسل و همکاران،^۴ ۲۰۱۹).

گوپتا و همکاران^۵ (۲۰۲۱)، در تحقیق خود برای محاسبه بار رسوب معلق از مدل‌های تخمین بار رسوب معلق مبتنی بر هوش مصنوعی استفاده کردند و نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و هیبرید موجکی می‌تواند در پیش‌بینی بار معلق دقت بالایی داشته باشد. بررسی‌های به‌عمل‌آمده نشان می‌دهد هر کدام از انواع تحقیقات یاد شده در خصوص انتقال رسوب دارای معایب خاص خود بوده که از جمله آنها به صرف هزینه و زمان بسیار برای دستیابی نتایج مدنظر می‌توان اشاره نمود به‌منظور جبران این کاستی‌ها امروزه استفاده از روش‌های بر مبنای سنجش‌ازدور و داده‌های ماهواره‌ای متداول شده است که در این بخش به تعدادی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

کانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۲)، در تحقیق خود از رابطه میان کدورت و غلظت رسوبات معلق در پیش‌بینی تغییرات غلظت رسوبات و کدورت با بررسی تغییر رنگ در تصاویر زیر آب استفاده نمودند.

در تحقیق دیگری پالیستا و همکاران^۷ (۲۰۲۳) به مطالعه غلظت رسوب معلق با استفاده از سنجش‌ازدور برای رودخانه تلس پیرس برزیل پرداختند و دریافتند باندهای جدا شده در مقایسه با شاخص‌های رادیومتریک همبستگی قوی‌تری را نشان می‌دهند و باند قرمز بهترین باند برای تخمین غلظت رسوبات معلق است. بررسی نتایج تحقیقات گذشته نشان‌دهنده کارایی بالای روش سنجش‌ازدور در تخمین میزان بار رسوبات معلق در شرایط رودخانه‌های غیر جزرومدی بوده است؛ ولی بررسی‌ها نشان می‌دهد تا کنون در خصوص کارایی استفاده از روش سنجش‌ازدور تحقیق بر روی رودخانه‌های جزرومدی تحقیق جامعی صورت نگرفته است؛ لذا در این تحقیق حاضر به مطالعه تخمین میزان بار رسوبات معلق با استفاده از سنجش‌ازدور در رودخانه بهمنشیر که تحت تأثیر جزرومد قرار دارد، پرداخته شده است.

¹ Parnak et al

² Zhang et al

³ Chelotti et al

⁴ Maciel et al

⁵ Gupta et al

⁶ Kang et al

⁷ Paulista et al

روش پژوهشی

در تحقیق حاضر به منظور تخمین میزان بار معلق رسوبات از روش سنجش از دور استفاده شده است و کارایی این روش در مقایسه با داده های میدانی اندازه گیری شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۱. سنجش از راه دور

سنجش از دور علم به کارگیری عکس های هوایی، عکس های فضایی و تصاویر تهیه شده از اطلاعات ماهواره ای جهت تفسیر، شناسایی و اخذ اطلاعات مختلف از پدیده های متنوع است. به عبارت دیگر می توان گفت با استفاده از روش سنجش از دور، داده های به دست آمده از ماهواره ها به عکس تبدیل شده و یا به طور مستقیم به کمک رایانه ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد (زبیری و مجد، ۱۳۹۲). همچنین در برخی منابع بیان شده است که سنجش از دور از جمله ابزارهای مناسب مدیریتی منابع زمینی است که داده های به روز را توسط سنجنده های مختلف در زمینه های متفاوت منابع زمینی ثبت می نماید. لازم به ذکر است که داده های ماهواره ای، منطقه وسیعی را نسبت به سایر ابزارها مانند عکس های هوایی و نقشه برداری زمینی پوشش داده و امکان ثبت انعکاسات انرژی الکترومغناطیس علاوه بر طیف مرئی در طول موج های خارج از طیف مرئی وجود دارد. وجود پوشش های تکراری داده های ماهواره ای، برای هر منطقه در فواصل زمانی یکسان، امکان مطالعه و نمایش تغییرات فرآیندهای دینامیک را در آن منطقه امکان پذیر می نماید. (علوی پناه، ۱۳۹۵). با استفاده از قابلیت بازتابش طیفی سنجش از راه دور اندازه گیری شده به وسیله گیرنده های ماهواره ای این راه می تواند یک جایگزین سریع و مقرون به صرفه برای تخمین غلظت رسوبات معلق در اقیانوس ها، دریاها، رودخانه ها و آب های ساحلی باشد.

۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر رودخانه بهمنشیر بوده که یکی از شاخه های منشعب شده از رودخانه کارون است. رودخانه کارون پس از رسیدن به شهر خرمشهر به دوشاخه تقسیم شده، شاخه نخست که از خرمشهر گذشته و به سمت اروندرود در مرز ایران و عراق رفته و شاخه دوم بهمنشیر است که با گذر از کنار آبادان مستقیم به خلیج فارس می ریزد. طول رودخانه بهمنشیر حدود ۹۰ کیلومتر، عرض آن ۶۰۰ متر و عمق آن حدود ۴ متر است. مختصات جغرافیایی آن ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه الی ۴۸ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۲۴ دقیقه الی ۳۰ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی است در شکل (۱) محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است.



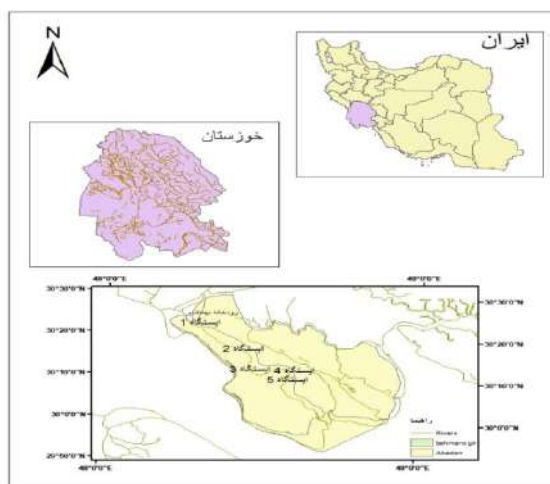
شکل ۱. نمایی از منطقه مورد مطالعه

۳. روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر از داده‌های میدانی ۵ ایستگاه واقع بر روی رودخانه بهمنشیر و سپس تخمین میزان بار معلق رسوبات در این ایستگاه‌ها استفاده شده است در شکل (۲) و جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌ها آورده شده است.

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های واقع در طول رودخانه

ردیف	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	ایستگاه ۱ (ابتدای رودخانه بهمنشیر)	۳۰.۲۴۰۶/۸۳	۴۸.۱۴۵۳/۳۶
۲	ایستگاه ۲ (ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ)	۳۰.۱۵۵۹/۵۹	۴۸.۲۶۵۹/۵۹
۳	ایستگاه ۳ (ایستگاه پمپاژ طره بخاخ)	۳۰.۱۱۳۳/۸۲	۴۸.۳۷۵۷/۲۷
۴	ایستگاه ۴ (انتهای رودخانه بهمنشیر قبل از پل چوئیده)	۳۰.۱۲۲۹/۲۳	۴۸.۳۴۰۱/۱۶
۵	ایستگاه ۵ (پل چوئیده)	۳۰.۱۰۱۷/۹۷	۴۸.۳۵۲۵/۲۶



شکل ۲. نمایی از ایستگاه‌های واقع در طول رودخانه مورد مطالعه

۴. نحوه جمع‌آوری داده‌ها

در اطلاعات جمع‌آوری و اخذ شده مورد نیاز در تحقیق حاضر شامل داده‌های غلظت رسوب معلق و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مادیس که دارای تصاویر بادقت کافی در بازه زمانی و مکانی محدوده مطالعه بوده و همچنین داده‌های غلظت رسوب معلق مربوط به سه بازه زمانی چهارده ساله (میانگین سالانه)، ده ساله (روزانه) و یک ساله (روزانه) بوده (که هم از نظر رژیم آبدی و هم از جنبه جامعیت مناسب بوده) از اطلاعات از سازمان آب و برق خوزستان تهیه شده که به صورت میدانی جهت استفاده در مطالعات طرح احداث سد و قفل کشتیرانی بهمنشیر پایین دست داده برداری شده است و برای اخذ تصاویر ماهواره‌ای مورد نیاز از گوگل ارث انجین و بر اساس کدنویسی و محیط پایتون انجام شده است. محدوده مورد مطالعه ابتدا در نرم افزار گوگل ارث مشخص و با فرمت KML ذخیره می‌گردد سپس با استفاده از نرم افزار ArcGIS فرمت KML ذخیره شده، فراخوانی شده و تبدیل به شیپ فایل شده است در مرحله بعد شیپ فایل محدوده مورد مطالعه وارد محیط کدنویسی شده و در ادامه کدنویسی انجام می‌گردد. پس از آن باتوجه به زمان کدنویسی شده تصویرهای مدنظر در تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، برای بارگیری اقدام نمود. لازم به ذکر است در این روش پردازش‌های اولیه شامل تصحیحات هندسی و اتمسفری و ژئو فرانس نمودن بر روی تصاویر در نرم افزار انوی انجام می‌گردد. در تحقیق حاضر تصاویر روزانه مربوط به ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸ به مدت ده سال (تعداد ۱۲۹ تصویر) مطابق با تاریخ نمونه برداری زمینی سازمان آب و برق خوزستان اخذ گردید. همچنین تصاویر طبقه بندی شده

سالانه (تعداد ۱۴ تصویر) ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ از سال ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹ به مدت چهارده سال است که با میانگین سالانه داده های غلظت رسوب معلق سازمان آب و برق خوزستان مورد بررسی و مطابقت قرار گرفته است. تصاویر روزانه شامل ایستگاه های ۱ تا ۵ هرکدام به تعداد ۱۲ تصویر، مربوط به سال های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۷ به مدت یک سال منطبق با نمونه برداری زمینی صورت گرفته از طرف شرکت مشاور زیر نظر سازمان آب و برق خوزستان است. پس از حذف تصاویر دارای ابر و سایر اشکالات رادیومتریک و داده های پرت غلظت رسوب معلق، تعداد ۷۲ تصویر روزانه (ده ساله) برای ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ و ۶ تصویر روزانه (یک ساله) برای ایستگاه ۵ و ۷ تصویر روزانه (یک ساله) برای ایستگاه های ۱ تا ۴ باقی ماند. از ۷۰ درصد اطلاعات جهت ساخت و آموزش مدل شبکه عصبی، مدل رگرسیون استفاده گردید و ۳۰ درصد باقی مانده نیز جهت آزمون و صحت سنجی این مدل ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق باتوجه به اینکه باند مادون قرمز نزدیک بیش از باند قرمز توسط آب جذب می گردد؛ لذا آب در این تصویر تیره تر از سایر باندهای مرئی بوده است که این موضوع موجب تشخیص و تفکیک آب از اراضی اطراف آن می گردد. در پژوهش حاضر از باند مادون قرمز نزدیک جهت بررسی انعکاس طیفی آب در موقعیت های نمونه برداری استفاده شده است. تصاویر استفاده شده دارای فرمت Geo TIFF هستند که تصحیحات هندسی و اتمسفری روی آن ها از قبل اعمال شده است؛ بنابراین، نیازی به پیش پردازش اولیه ندارند. در این تحقیق، علاوه بر استخراج بازتاب باندها به تنهایی از نسبت گیری طیفی (b1/b2) نیز برای تخمین غلظت رسوب معلق استفاده شده است. در نسبت گیری طیفی مقادیر درجه روشنایی یک باند طیفی به باند طیفی قابل انطباق دیگر تقسیم می شود که باهدف متمایز ساختن تفاوت هایی که توسط تغییرات روشنایی در تک باندها ممکن نیست، به کار می رود

۵. مدل رگرسیونی

در تحقیق حاضر به منظور ایجاد مدل رگرسیونی مناسب و ارتباط بین دو متغیر، ابتدا موضوع نرمال بودن داده های غلظت رسوب معلق (متغیر وابسته) در نرم افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. سپس، داده های پرت شناسایی و از محاسبات حذف گردید و به جهت بررسی نرمال بودن داده ها از آزمون آماری شاپیرو-ویلک استفاده شده است. پس از بررسی نرمال بودن داده ها، با استفاده از آزمون همبستگی پیرسون، همبستگی بین انعکاس آب (متغیر مستقل) و غلظت رسوب معلق (متغیر وابسته) در طول دوره آماری تحقیق بررسی و معنی دار بودن آن مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور، در این پژوهش هم از مقادیر انعکاس باندها به تنهایی و هم مقادیر نسبت گیری طیفی به عنوان متغیر مستقل استفاده شد.

پس از آن که همبستگی معناداری بین متغیر وابسته با متغیر مستقل نشان داده شد، به جهت بیان نوع ارتباط بین متغیرها از معادله رگرسیونی ساده و چندمتغیره استفاده گردید. در برخی موارد همبستگی میان چند متغیر مستقل با متغیر وابسته برقرار بود که از رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است. در مرحله بعد، برای داده هایی که همبستگی میان یک متغیر مستقل با متغیر وابسته برقرار بود، از رگرسیون ساده استفاده گردیده است. از این رو، برای تعیین نوع مدل رگرسیون (خطی یا غیرخطی بودن) و تعیین معنی داری ضرایب به کاررفته در آن، از دستور Curve Estimation در نرم افزار SPSS استفاده شده است. در این رابطه با بررسی و مقایسه پارامترهای آماری نظیر ضریب تعیین (R^2)، آماره فیشر (F)، سطح معنی داری (Sig.) و غیره، بهترین الگوی رگرسیونی انتخاب شده است.

یافته های پژوهش

۱. بررسی نرمال بودن داده های غلظت رسوب معلق

باتوجه به اینکه در کلیه آزمون های آماری فرض نرمال بودن داده ها لازم است؛ لذا در تحقیق حاضر به منظور بررسی این موضوع از آزمون های کولموگروف-اسمیرنوف و شاپیرو-ویلک استفاده شده است. در جدول (۲) نتایج حاصل از بررسی نرمال بودن داده های غلظت رسوب معلق روزانه در ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ در بازه ده ساله و داده های غلظت رسوب معلق سالانه ایستگاه

هیدرومتری طره بخاخ به مدت چهارده سال و داده‌های غلظت رسوب معلق روزانه یک‌ساله (۹۶-۹۷) ایستگاه‌های یک تا پنج آورده شده است.

جدول ۲. نتایج بررسی نرمال بودن داده‌های مختلف غلظت بار معلق

	کولموگروف - اسمیرنوف			شاپیرو-ویلک		
	آماره	تعداد نمونه	معناداری	آماره	تعداد نمونه	معناداری
روزانه - ده‌ساله ایستگاه طره بخاخ	۰/۱۶۴	۷۲	۰/۰۰۰۵	۰/۸۷۷	۷۲	۰/۰۰۰۵
سالانه - چهارده ایستگاه طره بخاخ	۰/۱۹۹	۱۴	۰/۱۳۷	۰/۸۹۲	۱۴	۰/۰۸۷
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۱	۰/۳۷۰	۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۴۹۴	۱۲	۰/۰۰۰۵
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۲	۰/۳۷۱	۱۲	۰/۰۰۰۵	۰/۷۲۲	۱۲	۰/۰۰۱
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۳	۰/۳۴۰	۱۲	۰/۰۵۵	۰/۸۶۹	۱۲	۰/۰۶۶
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۴	۰/۳۱۷	۱۲	۰/۰۰۲	۰/۶۰۵	۱۲	۰/۰۰۰۵
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۵	۰/۳۲۶	۱۱	۰/۱۲۲	۰/۸۸۵	۱۱	۰/۱۲۰

باتوجه به اینکه در آزمون شاپیرو-ویلک نرمال‌سازی داده‌ها در سطح معناداری ۵ درصد قابل قبول است؛ لذا با بررسی نتایج به‌دست‌آمده می‌توان بیان نمود در ایستگاه طره بخاخ (داده‌های روزانه، ده‌ساله) و ایستگاه‌های ۱ و ۲ و ۴ (داده‌های روزانه، یک‌ساله) نرمال نبوده و لذا نرمال‌سازی در مورد آنها با استفاده از روش تبدیل لگاریتمی انجام شده است در جدول (۳) نتایج نرمال‌سازی داده‌ها آورده شده است.

جدول ۳. نتایج نرمال نمودن داده‌های مختلف غلظت بار معلق

	کولموگروف - اسمیرنوف			شاپیرو-ویلک		
	آماره	تعداد نمونه	معناداری	آماره	تعداد نمونه	معناداری
روزانه - ده‌ساله ایستگاه طره بخاخ	۰/۰۸۲	۷۲	۰/۲۰۰	۰/۹۶۷	۷۲	۰/۰۵۵
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۱	۰/۲۴۵	۱۲	۰/۰۵۱	۰/۸۳۱	۱۲	۰/۱۲۱
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۲	۰/۲۳۷	۱۲	۰/۰۶۲	۰/۹۱۷	۱۲	۰/۲۶۰
روزانه - یک‌ساله ایستگاه ۴	۰/۱۴۱	۱۲	۰/۲۰۰	۰/۹۶۵	۱۲	۰/۸۵۵

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۳) نشان می‌دهد بر اساس شاخص پیشین بیان شده (سطح معنی‌داری ۵ درصد) داده‌ها نرمال شده اند.

۲. بررسی همبستگی بین داده‌ها

به‌منظور بررسی همبستگی داده‌ها و معنادار بودن آن‌ها، میان انعکاس آب (متغیر مستقل) و غلظت رسوب معلق (متغیر وابسته) از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شده است همچنین علاوه بر مقادیر بازتاب باند قرمز و مادون قرمز نزدیک از نسبت باندی (b1/b2) نیز به‌عنوان متغیر مستقل استفاده و برای هر مورد میزان همبستگی رابطه به‌دست‌آمده مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۴) نتایج حاصل از بررسی همبستگی میان داده‌ها بر اساس روش پیرسون آورده شده است.

جدول ۴. تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون برای داده های دوره های مختلف آماری

b1/b2	b2	b1	SSC		
-۰/۱۱۰	۰/۳۳۳*	۰/۲۹۷*	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۳۵۸	۰/۰۰۴	۰/۰۱۱		ضریب معناداری (دو دنباله)	ده ساله - ایستگاه
۷۲	۷۲	۷۲	۷۲	تعداد نمونه	طره بخاخ
۰/۸۳۴**	۰/۷۴۸**	۰/۸۷۷**	۱	ضریب همبستگی پیرسون	داده های سالانه
۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۰۵		ضریب معناداری (دو دنباله)	چهارده ساله -
۱۴	۱۴	۱۴	۱۴	تعداد نمونه	ایستگاه طره بخاخ
-۰/۵۰۵	۰/۱۵۹	-۰/۱۹۳	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۰۹۴	۰/۶۲۱	۰/۵۴۹		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۱
۰/۴۸۰	-۰/۰۱۶	۰/۳۵۶	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۱۱۴	۰/۹۶۱	۰/۲۵۷		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۲
-۰/۶۶۸*	۰/۴۲۱	۰/۰۷۴	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۰۹۴	۰/۶۲۱	۰/۵۴۹		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۳
۰/۰۹۵	۰/۰۰۶	۰/۰۴۲	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۷۶۸	۰/۹۸۶	۰/۸۹۸		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۲	۱۲	۱۲	۱۲	تعداد نمونه	ایستگاه ۴
-۰/۵۶۲	۰/۵۲۰	۰/۱۶۷	۱	ضریب همبستگی پیرسون	کل دوره آماری
۰/۰۷۲	۰/۱۰۱	۰/۶۲۳		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله -
۱۱	۱۱	۱۱	۱۱	تعداد نمونه	ایستگاه ۵

بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد همبستگی پائینی بین غلظت رسوب معلق و بازتاب باند یک و دو و نسبت بازتاب در سطح معناداری یک درصد برای ایستگاه طره بخاخ وجود دارد این در حالی است که بررسی های به عمل آمده برای داده های سالانه - چهارده ساله ایستگاه طره بخاخ همبستگی نسبتاً بالایی بین غلظت رسوب معلق و باند یک در سطح معنی داری یک درصد را نشان می دهد. در این ارتباط غلظت رسوبات معلق از مقدار حدوداً ۳۰۰ میلی گرم در لیتر تا حدود ۱۳۰۰ میلی گرم در لیتر متغیر بوده و ضریب همبستگی آن بالغ بر ۸۷ درصد است. برای باند دو و نسبت باندی به ترتیب ۷۴ و ۸۳ درصد نشان داده شده است که در سطح معنی داری یک درصد ضریب همبستگی نسبتاً خوبی است. در همین راستا، باتوجه به بررسی های صورت گرفته محققین نشان دادند با افزایش SSC از ۱۶ تا ۱۳۳۸ میلی گرم بر لیتر بازتاب در باند قرمز افزایش می یابد، می توان گفت همبستگی بیشتر تحت تأثیر غلظت بالای رسوب است. باتوجه به نتایج به دست آمده و با توجه مشاهده عدم همبستگی داده بین تصاویر روزانه و داده های روزانه غلظت رسوب معلق مربوط به کل دوره آماری سال (۹۶-۹۷) ایستگاه های ۱ تا ۵، باتوجه به برخی مطالعات قبلی مانند طباطبایی و سلیمانی (۱۳۹۳) و کاظمزاده و همکاران^۱ (۲۰۱۳) که فصل مرطوب را به عنوان دوره آماری مناسب برای تحقیق خود انتخاب کردند، در این تحقیق هفت ماه سال (مهر، آبان، آذر، دی، بهمن، اسفند، فروردین) به عنوان دوره مرطوب و پنج ماه سال (اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور) به عنوان دوره خشک در نظر گرفته شد. در جدول (۵) نتایج حاصل از در نظر گرفتن داده های فصل مرطوب و سپس تجزیه و تحلیل های مربوطه آورده شده است.

^۱ Kazemzadeh et al

جدول ۵. تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون برای دوره مرطوب

b1/b2	b2	b1	SSC		
-۰/۱۴۶	۰/۶۹۲**	۰/۷۲۴**	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۳۷۴	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵		ضریب معناداری (دو دنباله)	ده ساله - ایستگاه
۳۹	۳۹	۳۹	۳۹	تعداد نمونه	طره بخاخ
-۰/۵۶۲	۰/۳۹۱	-۰/۰۹۰	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۱۸۹	۰/۳۸۶	۰/۸۴۸		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۱
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
۰/۸۴۸*	-۰/۱۱۳	۰/۶۳۸	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۰۱۶	۰/۸۰۹	۰/۱۲۳		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۲
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
-۰/۵۲۳	۰/۴۳۳	۰/۲۶۱	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۲۲۸	۰/۳۳۲	۰/۵۷۳		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۳
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
-۰/۰۹۳	۰/۳۱۵	۰/۳۴۷	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۸۴۲	۰/۴۹۱	۰/۴۴۶		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۴
۷	۷	۷	۷	تعداد نمونه	
-۰/۶۹۲	۰/۹۳۴**	۰/۷۲۷	۱	ضریب همبستگی پیرسون	دوره مرطوب
۰/۱۲۸	۰/۰۰۶	۰/۱۰۲		ضریب معناداری (دو دنباله)	یک ساله - ایستگاه ۵
۶	۶	۶	۶	تعداد نمونه	

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۵)، در ایستگاه طره بخاخ برای دوره مرطوب (ده ساله) میان غلظت رسوب معلق با باند یک و دو همبستگی نسبتاً خوبی در سطح معنی داری یک درصد برقرار است. که ضریب همبستگی باند یک ۷۲ درصد و باند دو ۶۹ درصد است، همچنین برای دوره مرطوب (یک ساله) در ایستگاه‌های ۱، ۳ و ۴ همبستگی پایینی میان غلظت رسوب معلق و باند یک و دو و نسبت باندی نشان داده شده است که علت آن را می توان جزرومدی بودن رودخانه دانست. در این مورد می توان به دو نکته اشاره کرد. اول آن که، چنانچه عرض رودخانه کوچک تر از اندازه پیکسل تصویر موردنظر باشد انعکاس پیکسل تصویر، مخلوطی از انعکاس آب و اراضی حاشیه رودخانه بوده. بنابراین، نمیتواند انعکاس خالص آب باشد. دوم آنکه، عمق رودخانه در محل نمونه برداری از تصویر بایستی به قدر کافی عمیق باشد تا انعکاس کف رودخانه به حداقل برسد (طباطبایی و سلیمانی، ۱۳۹۳). نتایج به دست آمده برای دوره مرطوب (یک ساله) ایستگاه ۲، همبستگی نسبتاً بالایی میان غلظت رسوب معلق با نسبت بازتاب در سطح معنی داری پنج درصد نشان می دهد همچنین برای دوره مرطوب (یک ساله) ایستگاه ۵، میان غلظت رسوب معلق و باند دو همبستگی بالایی در سطح معنی داری یک درصد برقرار است. در نهایت برای تحلیل مناسب تر داده ها برای مواردی که همبستگی معناداری پیدا نشد این موارد از محاسبات کنار گذاشته شدند.

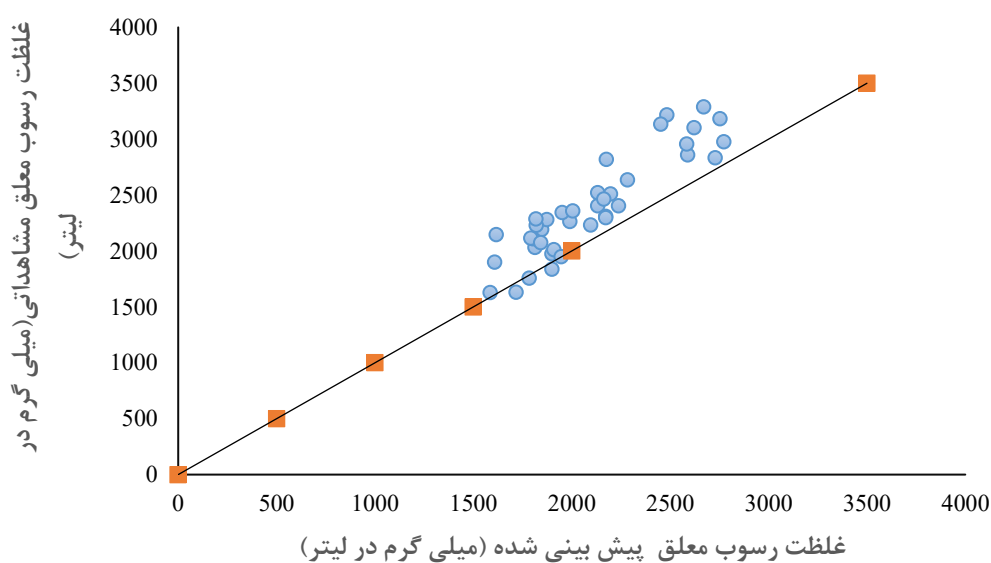
۳. تعیین مدل رگرسیونی

در این بخش به توسعه الگوریتمی پرداخته می شود که میزان غلظت رسوب معلق با استفاده از بازتاب طیفی آب را پیش بینی کند. به همین منظور، از تجزیه و تحلیل رگرسیون استفاده می شود، برای ایستگاه هیدرومتری طره بخاخ در بازه ده ساله (دوره مرطوب) غلظت رسوب معلق به عنوان متغیر وابسته و باند یک و دو به عنوان متغیر مستقل، در بازه زمانی چهارده ساله (طبقه بندی شده)، غلظت رسوب معلق به عنوان متغیر وابسته و باند یک، دو و نسبت بازتاب به عنوان متغیر مستقل، از آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) به عنوان آماره ای جهت تعیین معنادار بودن روابط رگرسیونی استفاده شد. همچنین برای دو ایستگاه ۲ و ۵ به دلیل آن که تنها یک متغیر مستقل (بازتاب طیفی) با متغیر وابسته (غلظت رسوب معلق) همبستگی داشت از رگرسیون ساده

(تک متغیره) در نظر گرفته شد. در جدول های (۶)، (۷)، (۸) و (۹) تجزیه واریانس رگرسیون ایستگاه های مختلف و همچنین نمودارهای (۳)، (۴)، (۵) و (۶) نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی و اندازه گیری شده غلظت رسوبات معلق برای ایستگاه های مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۶. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب طره بخاخ (ده ساله- دوره مرطوب)

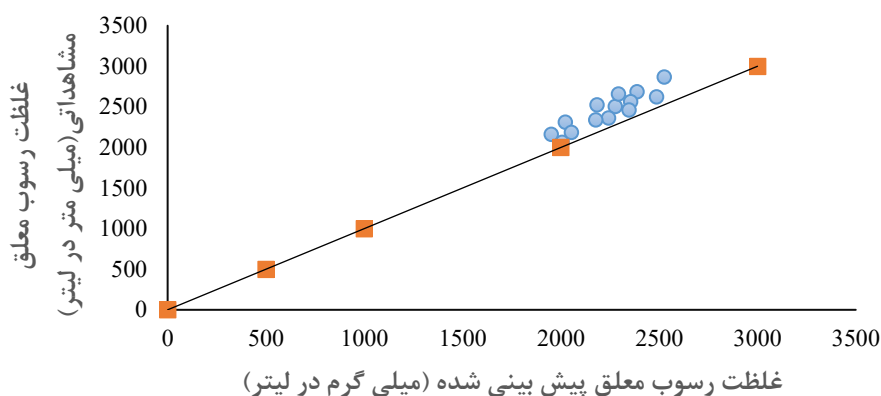
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R ²	RMSE	MAPE
رگرسیون	۱۶۴۳۱۴۲	۱	۱۶۴۳۱۴۲	۱۰/۳۱	۰/۰۰۵	۰/۸۲	۳۵۱/۳۹	۱۱/۹۶
باقیمانده	۱۲۲۲۸۹۹۱	۷۶	۱۶۰۹۰۷/۸					
کل	۱۳۸۷۲۱۳۳	۷۷						



شکل ۳. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های مورد نظر ایستگاه طره بخاخ (ده ساله- دوره مرطوب)

جدول ۷. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب ایستگاه طره بخاخ (چهارده ساله طبقه بندی شده)

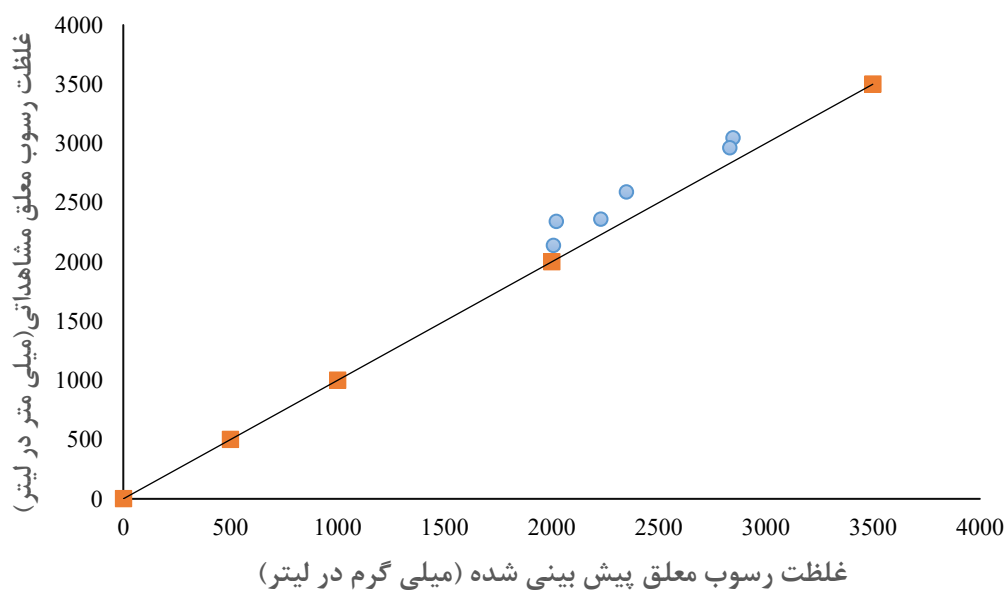
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R ²	RMSE	MAPE
رگرسیون	۶۳۰۰۰۰	۱	۶۳۰۰۰۰	۱۹/۵۳	۰/۰۰۵	۰/۸۲	۲۳۶/۴۰	۸/۶۷
باقیمانده	۸۳۸۶۰۵/۳	۲۶	۳۲۲۵۴/۰۵					
کل	۱۴۶۸۶۰۵	۲۷						



شکل ۴. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های موردنظر ایستگاه طره بخاخ (چهارده ساله طبقه بندی شده)

جدول ۸. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب ایستگاه ۲

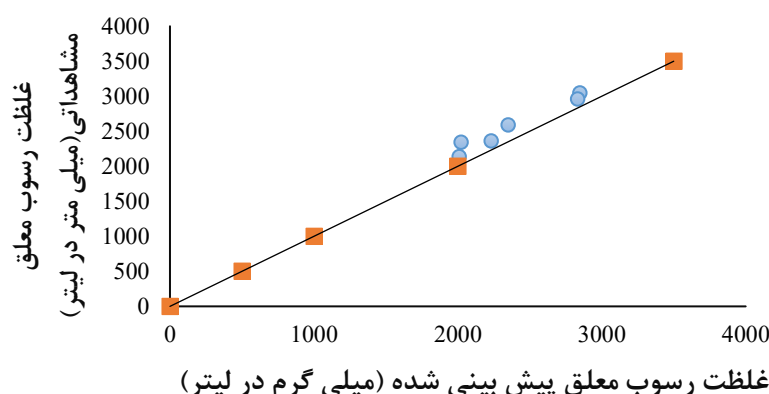
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R^2	RMSE	MAPE
رگرسیون	۶۵۹۹۲۵۹	۱	۶۵۹۹۲۵۹	۵۱/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۶۴	۱۰۹۴/۰۵	۴۱/۰۳
باقیمانده	۲۸۳۷۵۰۲	۲۲	۱۲۸۹۷۷۱۳					
کل	۹۴۳۶۷۶۱۲۳	۲۳						



شکل ۵. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های موردنظر ایستگاه ۲

جدول ۹. تجزیه واریانس رگرسیون برای دوره مرطوب ایستگاه ۵

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات	آماره F	ضریب معناداری	R^2	RMSE	MAPE
رگرسیون	۲۶۷۵۲۱/۶	۱	۲۶۷۵۲۱/۶	۲/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۸	۳۱۰/۴۸	۹/۶۶
باقیمانده	۳۴۷۹۲۱۷	۲۰	۱۷۳۹۶۰/۸					
کل	۲۷۴۶۷۳۸	۲۱						



شکل ۶. نمودار پراکنش مشاهدات و نمودار رگرسیون های موردنظر ایستگاه ۵

بحث

همانگونه که پیش از این بیان گردید در تحقیق حاضر هدف تخمین میزان غلظت رسوبات معلق رودخانه بهمنشیر با استفاده از روش سنجش ازدور بوده است. نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج طباطبایی و سلیمانی (۱۳۹۳) و کاظم زاده و همکاران (۲۰۱۳) که نشان دادند فصل مرطوب را می توان به عنوان دوره آماری مناسبی در نظر گرفت، مطابقت دارد. همینطور نتایج پائولستا و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد باند قرمز بهترین باند برای تخمین غلظت رسوبات معلق است که با نتایج بدست آمده در این مطالعه یکسان است. از طرف دیگر، نتایج مطالعه کاظم زاده و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر سنجنده مادیس جهت نظارت بر رسوب معلق مناسب است که با نتایج بدست آمده در این مطالعه مطابقت دارد.

نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

✓ مقدار سطح معنی داری در هر دو آزمون در ایستگاه طره بخاخ (داده های سالانه) و ایستگاه های ۳ و ۵ (داده های روزانه، یک ساله) بیشتر از ۰/۰۵ و در ایستگاه طره بخاخ (داده های روزانه، ده ساله) و ایستگاه های ۱ و ۲ و ۴ (داده های روزانه، یک ساله) کمتر از ۰/۰۵ است.

✓ جهت تخمین غلظت رسوبات معلق بهینه ترین پارامتر باند قرمز و مادون قرمز است.

✓ سنجش ازدور نسبت به روش های سنتی از سرعت عمل و دقت بالاتری برخوردار است.

✓ نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می دهد که تصاویر ماهواره ای سنجنده مادیس به دلیل توان تفکیک زمانی بالا (تصویربرداری روزانه) می تواند نقش مهمی در برآورد رسوب معلق رودخانه ای ایفا نماید.

همبستگی معنی داری میان داده ها، برای تمامی فصول سال وجود نداشته ولی با محدود کردن آن ها به یک دوره مرطوب همبستگی بالاتری میان داده ها وجود خواهد داشت.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر و سازمان آب و برق خوزستان به جهت ایجاد شرایط تحقیق حاضر کمال قدردانی را دارند.

منابع

- حیات زاده، مهدی، چزگی، جواد، دستورانی، محمدتقی. (۱۳۹۴). ارزیابی برآورد رسوب با استفاده از روش های منحنی سنج و شبکه عصبی با تلفیق پارامترهای مورفولوژیکی حوزه (مطالعه موردی حوزه باغ عباس). نشریه علوم آب و خاک، ۱۹(۷۲)، ۲۱۷-۲۲۸. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3076-fa.html>
- زبیری، محمود، و مجد، علیرضا. (۱۳۹۲). آشنایی با فن سنجش از دور و کاربرد در منابع طبیعی. مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران. <https://www.gisoom.com/book/1969329>
- صدری نسب، مسعود، فیاض محمدی، محمد، چگینی، وحید، و اشتیری لرکی، امیر. (۱۳۹۸). تأثیر پیچان رودها بر غلظت بار معلق و دامنه نوسانات سطح آب-مطالعه موردی رودخانه اروند. مجله علوم و فنون دریایی، ۱۸(۲)، ۷۶-۸۹. <https://doi.org/10.22113/jmst.2017.45982>
- طباطبایی، محمودرضا، سلیمانی، کریم، حبیب نژاد روشن، محمود، کاویان، عطاله. (۱۳۹۳). برآورد غلظت رسوب معلق روزانه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و خوشه بندی داده ها به روش نگاشت خود سازمان ده (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری سیرا - رودخانه کرج). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۵(۱۰)، ۹۸-۱۱۶. <https://jwmr.anru.ac.ir/article-1-416-fa.html>
- علوی پناه، سید کاظم. (۱۳۹۵). کاربرد سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، تهران، ایران. <https://www.gisoom.com/book/11279221>
- میرزاخانی، گلناز، قنبری عدیوی، الهام، و فتاحی، روح اله. (۱۴۰۰). تأثیر پوشش گیاهی صلب بر نرخ انتقال رسوب در سواحل. نشریه تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۲(۸)، ۲۱۵۵-۲۱۶۸. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.325233.668994>

References

- Ahadiyan, J., Abbasi Chenari, S., Azizi Nadian, H., Katopodis, C., Valipour, M., Sajjadi, S. M., & Omidvarinia, M. (2024). Sustainable systems engineering by CFD modeling of lateral intake flow with flexible gate operations to improve efficient water supply. *International Journal of Sediment Research*, 39(4), 629-642. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.003>
- Ahadiyan, J., Adeli, A., Bahmanpouri, F., & Gualtieri, C. (2018). Numerical Simulation of Flow and Scour in a Laboratory Junction. *Journal of Geosciences*, 8(5), 162. <https://doi.org/10.3390/geosciences8050162>
- Alavipanah, Seyed Kazem. (2016). Application of remote sensing in earth sciences (soil science). *University of Tehran Press*, Tehran, Iran. <https://www.gisoom.com/book/11279221/> [In Persian]
- Chelotti, G. B., Martinez, J. M., Roig, H. L., & Olivietti, D. (2019). Space-Temporal Analysis of Suspended Sediment in Low Concentration Reservoir by Remote Sensing. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180061>
- Ghafari, H., & Amerikhah, H. (2023). Simulation of daily suspended sediment of Roud-Zard River using different machine learning techniques. *Agricultural Engineering*, 46(1), 101-119. <https://doi.org/10.22055/AGEN.2023.44206.1677>
- Gupta, D., Hazarika, B. B., Berlin, M., Sharma, U.M. & Mishra, K. (2021). Artificial intelligence for suspended sediment load prediction: a review. *Environmental earth sciences*, 80(9), 346. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09625-3>
- Hayatzadeh, M., Chezgi, J., & Dastorani, M. (2015). Evaluation of Sediments Using Rating Curve and Artificial Neural Network Methods by Combining Morphological Parameters of Basin (Case Study: Bagh Abbas Basin). *J Water Soil Sci*. 19 (72), 217-228 <https://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3076-fa.html> [In Persian]
- Kang, W., Lee, K., & Kim, J. (2022). Prediction of Suspended Sediment Concentration Based on the Turbidity– Concentration Relationship Determined via Underwater Image Analysis. *Applied Sciences*, 12(12), 6125. <https://doi.org/10.3390/app12126125>
- Kazemzadeh, M. B., Ayyoubzadeh, S. A., & Moridnezhad, A. (2013). Remote sensing of temporal and spatial variations of suspended sediment concentration in Bahmanshir Estuary, Iran. *Indian J. Sci. Technol*, 6(8), 1-10. <https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2013/v6i8.10>
- Maciel, D., Novo, E., Sander, De Carvalho, L., Barbosa, C., Flores Júnior, R., & de Lucia Lobo F. (2019). Retrieving total and inorganic suspended sediments in Amazon floodplain lakes: A multisensor approach. *Remote Sensing*, 11(15), 1744 . <https://doi.org/10.3390/rs11151744>
- Maleki, P., Ahadiyan, J., Aleixo, R., Azizi Nadian, H., Tamoradi, Z., Kashefipour, S. M., Schleiss, A. J., & Fathi Moghadam, M. (2025). Scour Control in a 90° Bend by Means of an Air Bubble Screen. *Water*, 17(18), 2693. <https://doi.org/10.3390/w17182693>
- Mirzakhani, G., Ghanbariadi, E., & Fattahinafchi, R. (2021). The Effect of Rigid Vegetation on the Sediment Transport Rate on the Coast. *Iranian Journal of Soil and water Research*. 52(8), 2155-2168. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.325233.668994> [In Persian]
- Parnak, F., Rahimpour, M. & Qaderi, K. (2018). Experimental Investigation of the Effect of Rigid and Flexible Vegetation on Sediment Transport in Open Channels. *Journal of Water and Soil*, 32(2), 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.031>
- Paulista, R.S.D., De Almeida, F.T., De Souza, A.P., Hoshide, A.K., De Abreu, D.C., Da Silva Araujo, J.W., & Martim, C.C. (2023). Estimating Suspended Sediment Concentration Using Remote Sensing for the Teles Pires River, Brazil. *Sustainability*. 15(9), 7049. <https://doi.org/10.3390/su15097049>

- Reungoat, D., Leng, X., & Chanson, H. (2016). Hydrodynamic and sedimentary processes of tidal bores: Arcins Channel, Garonne River in August-September-October 2015. Hydraulic Model Report CH102/16, School of Civil Engineering, *The University of Queensland*, Brisbane, Australia. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133414358>
- Sadrinasab, M., Fayaz Mohammadi, M., Chegini, V., & Ashtari larki, A. (2019). The impact of river meandering on water level fluctuation and suspended sediment concentration-Arvanrood case study. *Journal of Marine Science and Technology*, 18(2), 76-89. <https://doi.org/10.22113/jmst.2017.45982> [In Persian]
- Tabatabaei, M.R., Soleimani, K., Habibnejad Roshan, M., & Kavian, A. (2014). Estimation of daily suspended sediment concentration using artificial neural networks and data clustering by self-organizing map (case study: Sira hydrometric station—Karaj River). *Watershed Management Research*, 5(10), 98–116. <https://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-416-fa.html> [In Persian]
- U.S. Environmental Protection Agency. (2003). *Developing water quality criteria for suspended and bedded sediments (SABS): Potential approaches*. Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, DC, United States. <https://coast.noaa.gov/data/czm/pollutioncontrol/media/Guidance/B5%20-%20EPA%202003%20Developing%20water%20quality%20criteria.pdf?>
- Vastila, K., Jarvela, J., & Koivusalo, H. (2016). Flow vegetation sediment interaction in a cohesive compound channel. *Journal Hydraul Engineering*, 142(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001058](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001058)
- Zhang, Y., Laib, X., Zhanga, L., Songc, K., Yaoa, X., Gub, L., & Pangd, C. (2020). The influence of aquatic vegetation on flow structure and sediment deposition: A field study in Dongting Lake, China. *Journal of Hydrology*, 584. 124644. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124644>
- Zobeiri, M., & Majd, A. (2013). Introduction to remote sensing techniques and applications in natural resources. *University of Tehran Press*, Tehran, Iran. <https://www.gisoom.com/book/1969329/> [In Persian]

An integrated framework for real-time river sediment monitoring: fusing low-cost hydrometry with a comparison of LSTM and N-BEATS models and uncertainty analysis

Mohammad Reza Masoudi Moghaddam ^{1✉}, Mohammad Saeed Zarkhan ², and Jafar Yazdi ³

1. Corresponding author, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_masoudimoghaddam@sbu.ac.ir
2. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_zarkhan@sbu.ac.ir
3. Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: j_yazdi@sbu.ac.ir

Article Info.	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 12 July 2025 Received in revised form 27 November 2025 Accepted 02 February 2026 Available online 23 september 2026 Keywords: D50 prediction, deep learning, low-cost ultrasonic sensor, uncertainty analysis, N-BEATS model.	Objective: The objective of this study was to develop an integrated framework for real-time monitoring and prediction of the median bed-sediment diameter (D50) in rivers and to compare the performance of two deep learning architectures, Long Short-Term Memory (LSTM) and Neural Basis Expansion Analysis for Time Series (N-BEATS), in predicting sediment size. An additional objective was to quantify the uncertainty of LSTM predictions using Monte Carlo (MC) dropout. Method: High-frequency water-level time-series data were collected from the Roudak River in Tehran using a custom-designed, low-cost ultrasonic stage sensor. The water-level data were integrated with grain-size analysis results obtained from bed-sediment samples collected during multiple field campaigns. Two deep learning models, LSTM and N-BEATS, were developed and evaluated for predicting D50. In addition, Monte Carlo dropout was applied to the LSTM model to assess the uncertainty and confidence of its predictions. Results: Both deep learning models demonstrated a strong capability to learn the complex relationships between river hydraulic conditions and bed-sediment characteristics. However, the N-BEATS model achieved superior predictive performance, with an R^2 of 0.871 and an RMSE of 0.054, compared with an R^2 of 0.861 and an RMSE of 0.056 for the LSTM model. These results indicate that N-BEATS provided more accurate and robust predictions of D50. Conclusions: The study demonstrated that integrating low-cost real-time water-level monitoring with advanced deep learning techniques provides a practical and cost-effective approach for river sediment monitoring. The superior performance of N-BEATS compared with LSTM highlights the potential of modern time-series architectures for improving computational hydrology and supporting more effective sediment and water-resources management.
Cite this article: Masoudi Moghaddam, M.R., Zarkhan, M.S., & Yazdi, J. (2026). An integrated framework for real-time river sediment monitoring: fusing low-cost hydrometry with a comparison of LSTM and N-BEATS models and uncertainty analysis. <i>Advanced Technologies in Water Efficiency</i>, 6(3), 117-132. https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12623.1185	



Introduction

The prohibitive cost and sparse deployment of traditional hydrological monitoring systems present a significant barrier to effective water-resource management. To address this persistent data gap, this study introduces and validates a comprehensive framework that integrates a custom-developed, low-cost ultrasonic sensor (Masoudimoghaddam et al., 2025) with advanced deep learning architectures for predicting a key hydromorphological parameter: the median bed sediment diameter (D50). While deep learning, particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, has become a mainstay in hydrology, the performance of modern, non-recurrent architectures such as N-BEATS on real-world, noisy data from low-cost sensors remains underexplored. This research addresses this gap through three contributions: (1) the validation of a complete "sensor-to-simulation" workflow, (2) the first direct comparison of LSTM and N-BEATS for D50 prediction using field data, and (3) the inclusion of uncertainty analysis to assess prediction reliability.

Method

The study was conducted on a reach of the Roudak River in Tehran, Iran. High-frequency (15-minute interval) water-level data were collected using the custom-built ultrasonic sensor, while ground-truth D50 values were obtained from physical sediment samples analyzed via standard sieve analysis at Shahid Beheshti University. The raw water-level time series was preprocessed to remove outliers using the interquartile range (IQR) method, followed by Min-Max normalization of all variables. Two deep-learning models were developed: a stacked, bidirectional LSTM with Monte Carlo (MC) Dropout for uncertainty quantification, and a custom-implemented, non-recurrent N-BEATS model with stacked residual blocks. Both models were trained using a 24-hour look-back window (96-time steps) to predict the subsequent D50 value. Model performance was evaluated on a chronological holdout test set (20% of data) using the coefficient of determination (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Absolute Error (MAE).

Results

The quantitative evaluation revealed a clear, though modest, performance advantage for the N-BEATS model. It achieved a higher R^2 of 0.871 and a lower RMSE of 0.054 mm, compared to the LSTM model's R^2 of 0.861 and RMSE of 0.056 mm. This consistent superiority across the reported metrics underscores its robustness for D50 prediction.

Qualitative analysis provided deeper insights into the performance difference. The N-BEATS model demonstrated a superior ability to track abrupt peaks and rapid fluctuations in the D50 time series, indicating higher fidelity in capturing the system's complex, nonlinear dynamics. This likely reflects its residual decomposition architecture, which hierarchically decomposes the input signal. In contrast, the LSTM model's predictions were comparatively smoother, though its primary strength emerged in uncertainty quantification. The LSTM model adaptively widened its 95% confidence interval during periods of high hydrologic volatility, correctly signaling lower confidence when the system was least predictable.

This highlights a crucial strategic trade-off for practical applications: N-BEATS delivers superior point-prediction accuracy, making it the preferred tool for tasks requiring the most

accurate numerical estimate. Conversely, the LSTM framework offers a robust system for risk-aware decision-making by communicating predictive uncertainty. The choice between them is therefore not merely technical but strategic, depending on the specific operational goal.

In conclusion, this research validated an integrated, low-cost framework for the real-time prediction of a complex sedimentological parameter (D50). By demonstrating the superior accuracy of the modern N-BEATS architecture while also showcasing the invaluable risk-assessment value of an uncertainty-aware LSTM model, this study provides a comprehensive guide for future developments in computational hydrology. It demonstrates the feasibility of creating affordable, intelligent, and scalable monitoring systems, establishing a new benchmark for data-driven environmental management.

Conclusions

This research developed and validated an integrated framework for the real-time prediction of median bed-sediment diameter (D50), addressing the critical challenge of data scarcity in hydromorphological monitoring. By integrating a custom-built, low-cost ultrasonic sensor with a comparative analysis of advanced deep learning models, this study identified three key findings. First, the modern, non-recurrent N-BEATS architecture demonstrated superior predictive accuracy ($R^2=0.871$) compared to the standard recurrent LSTM model ($R^2=0.861$), proving its robustness in capturing the complex, nonlinear dynamics of sediment transport. Second, the study highlighted a crucial strategic trade-off: while N-BEATS delivered superior point-prediction accuracy, the LSTM model provided valuable uncertainty quantification, enabling a framework for risk-aware decision-making. Third, and most significantly, this work validated an end-to-end "sensor-to-simulation" pipeline, proving the feasibility of developing affordable, intelligent, and scalable monitoring systems. In conclusion, this research not only provides a practical and scalable solution for a persistent engineering problem but also establishes modern deep learning architectures as powerful tools that can redefine the future of computational hydrology and environmental management.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

The datasets generated and analyzed during the current study are not publicly but are available from the corresponding author on reasonable request.

Acknowledgements

The authors would like to thank the staff of the Hydraulics and Soil Mechanics laboratories at Shahid Beheshti University for their technical support during the experimental phase of this research.

Ethical Considerations

The study was approved by the Ethics Committee of Shahid Beheshti University. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



چارچوبی یکپارچه برای پایش بلادرنگ رسوبات رودخانه: تلفیق هیدرومتری کم‌هزینه با مقایسه

مدل‌های LSTM و N-BEATS و تحلیل عدم قطعیت

محمدرضا مسعودی مقدم^۱✉، محمدسعید زرخوان^۲، و جعفر یزدی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه:

m_masoudimoghaddam@sbu.ac.ir

۲. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zarkhan@sbu.ac.ir

۳. گروه مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: j_yazdi@sbu.ac.ir

چکیده	درباره مقاله
هدف: هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب یکپارچه برای پیش‌بینی قطر متوسط رسوبات بستر رودخانه (D50) و مقایسه عملکرد دو معماری پیشرو در یادگیری عمیق، شامل شبکه حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) و مدل تحلیل انبساط پایه عصبی (N-BEATS)، در پیش‌بینی D50 بود. همچنین، تحلیل عدم قطعیت با استفاده از تکنیک Monte Carlo Dropout به منظور ارزیابی میزان اطمینان پیش‌بینی‌های مدل LSTM انجام شد. روش پژوهش: داده‌های سری زمانی تراز آب با فرکانس بالا که با استفاده از یک سنسور اولتراسونیک کم‌هزینه ثبت شده بودند، به عنوان ورودی مدل‌ها مورداستفاده قرار گرفتند. برای ایجاد یک سری زمانی پیوسته از D50، داده‌های حاصل از نمونه‌های فیزیکی رسوبات بستر با استفاده از مدل فرایند گوسی (GP) بازسازی شدند. سپس مدل‌های LSTM و N-BEATS برای پیش‌بینی D50 توسعه و ارزیابی شدند. همچنین، تکنیک Monte Carlo Dropout برای تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی میزان اطمینان پیش‌بینی‌های مدل LSTM به کار گرفته شد. یافته‌ها: هر دو مدل LSTM و N-BEATS توانایی بالایی در یادگیری الگوهای پیچیده و پیش‌بینی D50 نشان دادند. با این حال، مدل N-BEATS با دستیابی به ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰.۸۷۱، عملکرد دقیق‌تری نسبت به مدل LSTM با R^2 برابر با ۰.۸۶۱ داشت. این نتایج نشان‌دهنده برتری N-BEATS در دقت پیش‌بینی نقطه‌ای قطر متوسط رسوبات بستر است. نتیجه‌گیری: درجه‌های سالونی مستطیلی چندگانه دارای تبدیل تدریجی، با بهبود عملکرد هیدرولیکی، می‌توانند به عنوان ابزاری قابل اعتماد برای اندازه‌گیری و کنترل جریان در کانال‌های روباز مورداستفاده قرار گیرند.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۳ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: پیش‌بینی D50، یادگیری عمیق، سنسور اولتراسونیک، تحلیل عدم قطعیت، N-BEATS

استناد: مسعودی مقدم، محمد رضا؛ زرخوان، محمد سعید؛ و جعفر، یزدی. (۱۴۰۵). چارچوبی یکپارچه برای پایش بلادرنگ رسوبات رودخانه: تلفیق هیدرومتری

کم‌هزینه با مقایسه مدل‌های LSTM و N-BEATS و تحلیل عدم قطعیت. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۳)، ۱۱۷-۱۳۲.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12623.1185>



مقدمه

پایش فرایندهای هیدرو مورفولوژیکی، به ویژه دینامیک رسوبات بستر، برای مدیریت پایدار منابع آب و سازه های هیدرولیکی از اهمیت راهبردی برخوردار است. قطر متوسط ذرات بستر (D50) یک شاخص فیزیکی کلیدی است که مستقیماً بر ظرفیت انتقال رسوب تأثیر می گذارد. با این حال، چالش اصلی در این حوزه، کمبود داده های میدانی با وضوح زمانی بالا به دلیل هزینه های گزاف و محدودیت های لجستیکی تجهیزات پایش استاندارد است. برای غلبه بر این مانع، رویکردهای نوین مبتنی بر سنسورهای کم هزینه، مانند نمونه های اولتراسونیک (ساهو و ادگاتا^۱، ۲۰۱۹) یا سیستم های مبتنی بر تحلیل تصویر (جی و همکاران^۲، ۲۰۲۰) به عنوان راهکاری امیدبخش مطرح شده اند. این پژوهش نیز بر پایه داده های حاصل از یک سنسور اولتراسونیک سفارشی و کم هزینه استوار است. با این وجود، داده های حاصل از این سنسورها اغلب با چالش هایی نظیر نویز و وجود داده های پرت همراه هستند (دی کامارگو و همکاران^۳، ۲۰۲۳) که نیازمند به کارگیری روش های پیش پردازش هوشمند برای شناسایی و اصلاح خطاها هستند. پس از جمع آوری و پاک سازی داده، چالش بعدی، تبدیل این داده ها به مدل های پیش بین کارآمد است.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه پژوهش حاضر به انجام رسیده است که به صورت مختصر در دو طبقه بندی مطالعات داخل و خارج از کشور ارائه می گردد.

۱. مطالعات داخل کشور

ادیب راد و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهش خود به بررسی کاربرد فناوری های نوین در هیدرومتری و پایش متغیرهای هیدرولیکی پرداختند و بر اهمیت استفاده از فناوری های اندازه گیری نوین برای دستیابی به داده های پیوسته و دقیق تأکید کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که توسعه سامانه های نوین اندازه گیری می تواند زمینه مناسبی برای بهبود پایش و مدیریت فرایندهای هیدرولوژیکی فراهم کند.

ازسوی دیگر، اکبری و همکاران (۱۴۰۳) بر اهمیت تحلیل عدم قطعیت در مدل های پیش بینی تأکید کردند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که ارزیابی صرف دقت پیش بینی برای استفاده از مدل های داده محور در تصمیم گیری های مدیریتی کافی نیست و بررسی میزان عدم قطعیت و قابلیت اعتماد خروجی مدل نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

۲. مطالعات خارج از کشور

بویتن^۴ (۲۰۰۵) در مطالعات خود بر کاربرد روش های اندازه گیری هیدرولیکی و فناوری های مرتبط با پایش جریان های رودخانه ای تمرکز کرد و نشان داد که استفاده از روش های نوین اندازه گیری می تواند دقت و کارایی پایش متغیرهای هیدرولیکی را افزایش دهد.

بولر و همکاران^۵ (۲۰۲۲) در مطالعات خود به بررسی کاربرد سنجش اولتراسونیک و فناوری های نوین پایش رودخانه پرداختند. یافته های آنان نشان داد که ترکیب حسگرهای اولتراسونیک با روش های پردازش و تحلیل داده می تواند امکان پایش پیوسته و هوشمند متغیرهای هیدرولیکی را فراهم کرده و محدودیت های برخی روش های سنتی پایش را کاهش دهد.

¹ Sahoo & Udgata

² Ji et al

³ De Camargo et al

⁴ Boiten

⁵ Bowler et al

وانگ و همکاران^۱ (۲۰۲۵) با توسعه یک مدل یادگیری عمیق چندمقیاسی، به پیش‌بینی بلندمدت جریان رودخانه پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از معماری‌های چندمقیاسی می‌تواند توانایی مدل‌های یادگیری عمیق را در استخراج وابستگی‌های زمانی پیچیده و پیش‌بینی رفتار جریان در افق‌های زمانی بلندمدت افزایش دهد.

هوانگ و همکاران^۲ (۲۰۲۱) نیز با بهره‌گیری از چندین مدل یادگیری و تلفیق نتایج آن‌ها، به پیش‌بینی رسوبات معلق پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که استفاده از رویکردهای ترکیبی و تلفیقی می‌تواند قابلیت مدل‌سازی روابط پیچیده میان متغیرهای مؤثر بر انتقال رسوبات را بهبود بخشد و دقت پیش‌بینی رسوبات معلق را افزایش دهد.

صابریان و همکاران^۳ (۲۰۲۴) در پژوهش خود از شبکه‌های عصبی کانولوشنی زمانی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی استفاده کردند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که معماری‌های کانولوشنی زمانی قادرند الگوها و وابستگی‌های زمانی موجود در داده‌های هیدرولوژیکی را استخراج کرده و به‌عنوان رویکردی مناسب برای پیش‌بینی فرایندهای پیچیده زمانی مورد استفاده قرار گیرند.

در مجموع، مطالعات پیشین نشان می‌دهند که یادگیری عمیق، پایش اولتراسونیک و تحلیل عدم قطعیت هر یک به‌صورت مستقل در مطالعات هیدرولوژیکی و رسوبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ با این حال، مقایسه مستقیم عملکرد معماری‌های LSTM و N-BEATS در پیش‌بینی قطر متوسط رسوبات بستر (D50) با استفاده از داده‌های حاصل از یک سامانه پایش اولتراسونیک کم‌هزینه، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، ترکیب ارزیابی دقت پیش‌بینی با تحلیل عدم قطعیت می‌تواند دید جامع‌تری نسبت به قابلیت اعتماد مدل‌ها برای کاربردهای مدیریتی فراهم کند.

روش پژوهش

این پژوهش بر پایه یک چارچوب یکپارچه استوار است که شامل سه بخش اصلی است: (۱) برداشت داده‌های میدانی و آزمایشگاهی، (۲) پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها، و (۳) توسعه، آموزش و ارزیابی مدل‌های یادگیری عمیق

۱. منطقه مورد مطالعه و جمع‌آوری داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بخشی از رودخانه رودک واقع در شمال شرق تهران، ایران است. این رودخانه، به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های رودخانه جاجرود، دارای رژیم هیدرولوژیکی سیلابی بوده و به دلیل عبور از مناطق شهری و نیمه‌شهری، دینامیک جریان و رسوب آن تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد. انتخاب این منطقه به دلیل دسترسی مناسب برای انجام عملیات میدانی و اهمیت آن در هیدرولوژی شهری تهران صورت گرفته است. شکل (۱) دستگاه التراسونیک نصب شده در ایستگاه رودک را نشان می‌دهد.

¹ Wang et al

² Huang et al

³ Saberian et al



شکل ۱. دستگاه التراسونیک موجود در ایستگاه رودک

۲. چارچوب برداشت داده

مجموعه داده مورد استفاده در این تحقیق، حاصل تلفیق دو جریان داده مجزا اما هم زمان است: داده های هیدرومتری و داده های رسوب شناسی.

- داده های هیدرومتری (تراز آب): برای پایش پیوسته و با فرکانس بالای تراز آب، از یک سنسور اولتراسونیک کم هزینه و سفارشی که پیش تر توسط تیم تحقیقاتی ما در دانشگاه شهید بهشتی طراحی و ساخته شده است، استفاده گردید (مسعودی مقدم و همکاران^۱، ۲۰۲۵). این سنسور در یک مقطع مشخص از رودخانه نصب و داده های تراز آب را در بازه های زمانی ۱۵ دقیقه ای ثبت نمود. مزیت اصلی این رویکرد، فراهم آوردن یک سری زمانی بلندمدت و متراکم با هزینه ای به مراتب کمتر از تجهیزات تجاری مرسوم است. سنسور اولتراسونیک سفارشی توسعه یافته در این پژوهش، در حال حاضر حدود دو سال است که به طور پیوسته در ایستگاه رودک فعال بوده و داده های سطح آب را هر ۱۵ دقیقه یکبار پایش می کند که منجر به ایجاد یک پایگاه داده بلندمدت و غنی شده است. برای پژوهش حاضر، یک دوره زمانی چند روزه که نمایانگر دینامیک های هیدرولوژیکی مشخصی بود، از این مجموعه داده استخراج و به عنوان مبنای آموزش و ارزیابی مدل های یادگیری عمیق استفاده گردید.

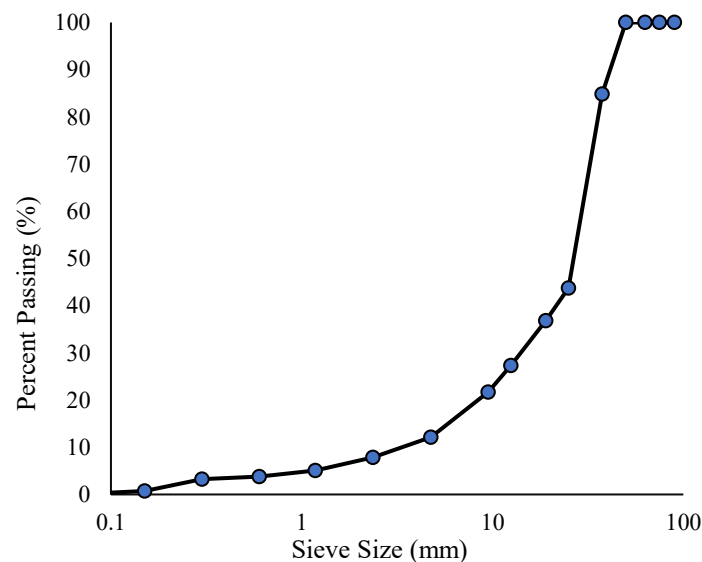
- داده های رسوب شناسی (D50): باتوجه به چالش های عملیاتی و هزینه بالای نمونه برداری پیوسته از رسوبات بستر، در این پژوهش از یک رویکرد دومارحله ای برای تولید مجموعه داده D50 استفاده گردید: در مرحله اول، برای دستیابی به نقاط حقیقت زمینی^۲، چندین نوبت عملیات میدانی در طول دوره پایش انجام شد. در هر نوبت، با استفاده از روش نمونه برداری ترکیبی^۳، چندین نمونه کوچک تر از لایه سطحی بستر در نقاط مختلف عرض رودخانه (مانند کناره راست، مرکز و کناره چپ) برداشت و با یکدیگر مخلوط می شدند تا یک نمونه نهایی و معرف به دست آید. در این فرایند، ذرات بسیار درشت (تخته سنگ ها) به صورت هدفمند حذف می شدند، زیرا تمرکز تحقیق بر روی دینامیک بخش متحرک بستر

¹ Masoudimoghaddam et al

² Ground Truth

³ Composite Sampling

بود. این نمونه‌ها سپس در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهید بهشتی با روش استاندارد دانه‌بندی الک^۱ تحلیل شده و مقدار دقیق D50 برای هر کدام تعیین گردید. مرحله دوم، تولید سری زمانی پیوسته با استفاده از فرایند گوسی (GP) است و از آنجایی که مدل‌های یادگیری عمیق به یک سری زمانی پیوسته و متراکم برای آموزش نیاز دارند، از مقادیر واقعی اما پراکنده به‌دست‌آمده در مرحله قبل، برای آموزش یک مدل رگرسیون فرایند گوسی^۲ استفاده شد. این روش آماری پیشرفته، با یادگیری الگوهای آماری و همبستگی زمانی بین نقاط واقعی، یک سری زمانی پیوسته و واقع‌گرایانه از D50 برای کل دوره زمانی مورد مطالعه تولید کرد که در ادامه جزئیات بیشتری از آن توضیح داده خواهد شد؛ بنابراین، سری زمانی "Actual D50" که در ادامه این پژوهش برای آموزش و ارزیابی مدل‌های یادگیری عمیق به کار رفت، یک سری زمانی سنتز شده^۳ و باکیفیت است که بر اساس داده‌های واقعی میدانی تولید شده است. شکل (۲) نمونه‌ای از منحنی‌های دانه‌بندی به‌دست‌آمده از نمونه‌های فیزیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمونه ای از منحنی دانه برداشت شده از ایستگاه رودک

۳. پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های خام حاصل از سنسورهای میدانی، به‌ویژه سنسورهای کم‌هزینه، به طور طبیعی مستعد نویز و وجود مقادیر پرت^۴ هستند. این خطاها می‌توانند ناشی از عوامل محیطی (مانند عبور حیوانات یا سقوط اجسام) یا خطاهای لحظه‌ای الکترونیکی باشند. نادیده گرفتن این داده‌های پرت می‌تواند به شدت بر کیفیت و قابلیت اطمینان مدل‌های یادگیری عمیق تأثیر منفی بگذارد. از این رو، در اولین گام پیش‌پردازش، یک الگوریتم تشخیص داده پرت مبتنی بر دامنه میان‌چارکی^۵ (IQR) بر روی سری زمانی تراز آب اعمال گردید. در این روش، هر داده‌ای که خارج از محدوده $[Q1 - 1.5 \times IQR, Q3 + 1.5 \times IQR]$ قرار می‌گرفت، به عنوان داده پرت

¹ Sieve Analysis

² Gaussian Process Regression

³ Synthesized

⁴ Outliers

⁵ Interquartile Range

شناسایی و با استفاده از روش درون یابی خطی^۱ با مقادیر همسایه جایگزین شد. این تکنیک، ضمن حفظ ساختار کلی سری زمانی، اثر مخرب نوسانات شدید و غیر واقعی را حذف می کند. پس از پاک سازی، تمامی داده های ورودی و خروجی با استفاده از تابع نرمال سازی Min-Max به بازه [۰, ۱] مقیاس بندی شدند تا فرایند آموزش مدل پایدارتر گردد. شایان ذکر است که در این پژوهش، تمرکز اصلی بر اعتبارسنجی چارچوب کم هزینه با استفاده از یک رویکرد حداقلی بود؛ بنابراین، تنها از متغیر تراز آب به عنوان ورودی استفاده شد تا پتانسیل استخراج الگوهای پیچیده رسوب از این تک متغیر به سادگی قابل اندازه گیری، ارزیابی گردد.

۴. توسعه مدل های یادگیری عمیق

برای دستیابی به هدف اصلی تحقیق، دو معماری متفاوت از شبکه های عصبی عمیق توسعه و مقایسه شدند.

مدل حافظه طولانی کوتاه مدت (LSTM)

به عنوان مدل پایه و نماینده معماری های بازگشتی، یک شبکه LSTM دوطرفه^۲ و انباشته^۳ طراحی گردید. ساختار دوطرفه به مدل اجازه می دهد تا توالی ورودی را هم از جهت گذشته به آینده و هم از آینده به گذشته تحلیل کند و در نتیجه به درک عمیق تری از زمینه^۴ دست یابد. برای جلوگیری از بیش برآزش^۵، لایه های Dropout با نرخ ۰.۳ پس از هر لایه LSTM اضافه شدند.

علاوه بر این، برای ارزیابی عدم قطعیت مدل، از تکنیک Monte Carlo (MC) Dropout استفاده شد. در این روش، لایه های Dropout در زمان پیش بینی^۶ نیز فعال نگه داشته می شوند و با اجرای مدل به تعداد ۱۰۰۰ مرتبه، یک توزیع از نتایج احتمالی به دست می آید. میانگین این توزیع به عنوان پیش بینی نهایی و انحراف معیار آن به عنوان شاخصی از میزان اطمینان مدل به پیش بینی خود در نظر گرفته شد.

مدل تحلیل انبساط پایه عصبی (N-BEATS)

به عنوان نماینده معماری های مدرن و غیر بازگشتی، یک مدل N-BEATS به صورت سفارشی پیاده سازی شد. برخلاف LSTM که اطلاعات را به صورت ترتیبی پردازش می کند، N-BEATS مبتنی بر یک ساختار کاملاً متصل^۷ و پشته ای از بلوک های باقی مانده^۸ است. هر بلوک در این معماری، سیگنال ورودی را به دو بخش تجزیه می کند: یک بخش پیش بینی آینده^۹ که به خروجی نهایی کمک می کند و یک بخش پیش بینی گذشته^{۱۰} که از سیگنال ورودی کسر شده و باقی مانده آن به عنوان ورودی برای بلوک بعدی عمل می کند. این رویکرد تجزیه سلسله مراتبی، به مدل اجازه می دهد تا الگوهای مختلفی مانند روند^{۱۱} و فصلی بودن^{۱۲} را در مقیاس های زمانی متفاوت بیاموزد.

مدل رگرسیون فرایند گوسی

^۱ Linear Interpolation

^۲ Bidirectional

^۳ Stacked

^۴ context

^۵ Overfitting

^۶ inference

^۷ Fully-connected

^۸ Residual Blocks

^۹ Forecast

^{۱۰} Backcast

^{۱۱} Trend

^{۱۲} Seasonality

همان‌طور که در بخش ۲.۱.۲ اشاره شد، یکی از چالش‌های اصلی این پژوهش، نیاز به یک سری زمانی متراکم از D50 برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق بود، درحالی‌که داده‌های میدانی به‌صورت پراکنده در دسترس بودند. برای غلبه بر این چالش و ایجاد یک سری زمانی هدف واقع‌گرایانه و پیوسته، از مدل رگرسیون فرایند گوسی (GP) استفاده گردید.

فرایند گوسی یک روش مدل‌سازی غیرپارامتری و مبتنی بر احتمالات بیزی است که به‌جای تخمین پارامترهای یک تابع مشخص، یک توزیع احتمالاتی بر روی مجموعه نامتناهی از توابع تعریف می‌کند. یک فرایند گوسی به‌طور کامل توسط دو مؤلفه مشخص می‌شود: یک تابع میانگین^۱ که روند کلی داده‌ها را مدل می‌کند و یک تابع کوواریانس یا هسته^۲ که مهم‌ترین بخش مدل است.

هسته، میزان شباهت یا همبستگی بین نقاط مختلف داده را بر اساس فاصله آن‌ها از یکدیگر تعریف می‌کند. این ویژگی به مدل GP اجازه می‌دهد تا ساختارهای پیچیده و غیرخطی داده‌ها، مانند نرمی، نوسانات و دوره‌ای بودن را بیاموزد. در این پژوهش، از هسته محبوب تابع پایه شعاعی^۳ (RBF) استفاده شد که برای مدل‌سازی فرایندهای طبیعی و پیوسته؛ مانند پارامترهای هیدرولوژیکی، گزینه‌ای بسیار مناسب و انعطاف‌پذیر است.

در فرایند رگرسیون، مدل GP با مشاهده داده‌های آموزشی (در این مورد، نمونه‌های D50 واقعی و پراکنده) و با استفاده از اصول احتمال بیزی، توزیع پیشین^۴ خود را به‌روزرسانی کرده و یک توزیع پسین^۵ بر روی توابع ممکن ایجاد می‌کند. میانگین این توزیع پسین، به‌عنوان محتمل‌ترین و بهینه‌ترین تابع برای توصیف داده‌ها در نظر گرفته می‌شود و به‌عنوان خروجی نهایی مدل (سری زمانی پیوسته D50) مورد استفاده قرار گرفت. مزیت اصلی این روش، توانایی آن در ارائه یک درون‌یابی هوشمند و قابل‌اتکا، حتی با تعداد محدودی از نقاط داده واقعی است که آن را به ابزاری ایده‌آل برای آماده‌سازی مجموعه‌داده در این پژوهش تبدیل کرد.

۵. آموزش و ارزیابی مدل

هر دو مدل برای پیش‌بینی مقادیر D10، D50 و D90 بر اساس یک پنجره زمانی ورودی^۶ از ۹۶ نقطه داده پیشین (معادل ۲۴ ساعت) از سری زمانی تراز آب آموزش داده شدند. مجموعه‌داده به دو بخش آموزش (۸۰٪) و آزمون (۲۰٪) بدون به‌هم‌ریختن ترتیب زمانی تقسیم شد. برای جلوگیری از آموزش بیش از حد و یافتن بهینه‌ترین حالت مدل، از راهکار توقف زودهنگام^۷ با نظارت بر خطای اعتبارسنجی^۸ و صبر^۹ ۱۵ دوره استفاده گردید.

عملکرد نهایی مدل‌ها بر روی مجموعه‌داده آزمون با استفاده از سه معیار آماری استاندارد ارزیابی و مقایسه شد.

- ضریب تعیین (R^2): نشان‌دهنده میزان واریانس از داده‌های واقعی است که توسط مدل توصیف می‌شود.

¹ Mean Function

² Covariance Function or Kernel

³ Radial Basis Function

⁴ prior distribution

⁵ posterior distribution

⁶ look-back window

⁷ Early Stopping

⁸ Validation Loss

⁹ patience

- ریشه میانگین مربعات خطا^۱ (RMSE): خطای متوسط مدل را با واحد یکسان با متغیر هدف نشان می دهد و به خطاهای بزرگ وزن بیشتری می دهد.
- میانگین قدرمطلق خطا^۲ (MAE): خطای متوسط مدل را به صورت قدرمطلق و با درک شهودی آسان تر نمایش می دهد.

یافته های پژوهشی

در این بخش، نتایج حاصل از ارزیابی های کمی و کیفی دو معماری یادگیری عمیق (LSTM و N-BEATS) ارائه و تحلیل می گردد. هدف این بخش، نه تنها گزارش اعداد و ارقام، بلکه کالبدشکافی رفتار هر مدل در مواجهه با داده های واقعی و درک نقاط قوت و ضعف هر یک از این رویکردهاست.

۱. ارزیابی عملکرد

برای ارزیابی عینی عملکرد مدل ها، سه معیار آماری استاندارد شامل ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) محاسبه گردید. جدول (۱)، نتایج این ارزیابی را بر روی مجموعه داده آزمون به تفکیک هر پارامتر خروجی (D10, D50, D90) نمایش می دهد.

جدول ۱. نتایج آماره های ریاضی برای مدل های دیپ لرنینگ مورد استفاده

مدل	پارامتر	R^2 (R-squared)	RMSE	MAE
LSTM	D10	0.849	0.043	0.033
LSTM	D50	0.861	0.056	0.045
LSTM	D90	0.881	0.07	0.041
N-BEATS	D10	0.845	0.043	0.034
N-BEATS	D50	0.871	0.054	0.043
N-BEATS	D90	0.883	0.073	0.042

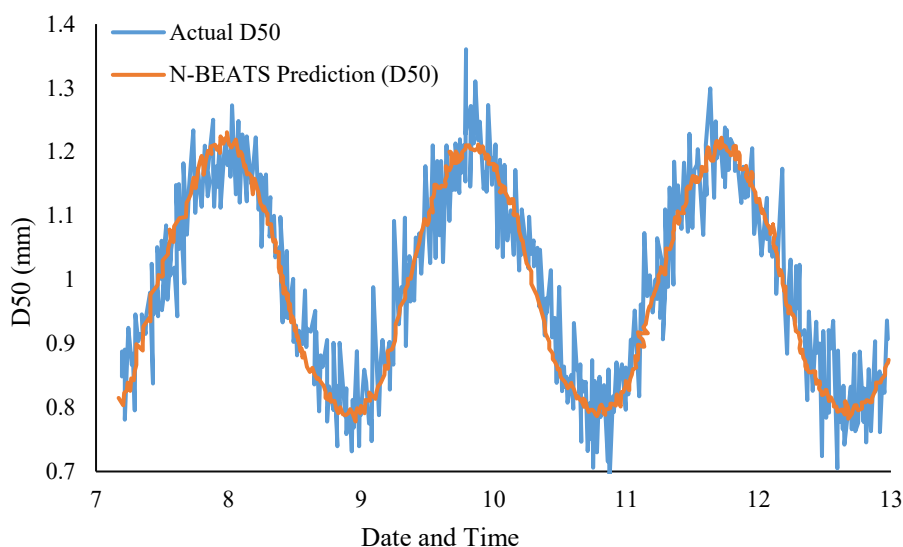
جدول (۱)، به ویژه برای پارامتر D50، نتایج قابل توجهی را آشکار می سازد. مدل N-BEATS با دستیابی به $R^2=0.871$ ، نشان داد که قادر است ۸۷.۱ درصد از واریانس داده های واقعی D50 را تبیین کند. این مقدار، نشان دهنده یک بهبود مشخص نسبت به مدل LSTM است که این میزان برای آن ۸۶ درصد بود. مهم تر از آن، مقادیر RMSE و MAE برای مدل N-BEATS (به ترتیب ۰.۰۴۳ و ۰.۰۵۴) به طور مداوم کمتر از مدل LSTM (به ترتیب ۰.۰۵۶ و ۰.۰۴۵) است. این کاهش در خطای متوسط، هرچند ممکن است در نگاه اول اندک به نظر برسد، اما در کاربردهای مهندسی که به دقت بالا نیاز دارند، بسیار حائز اهمیت است و نشان می دهد که پیش بینی های N-BEATS به طور متوسط به مقادیر واقعی نزدیک تر هستند. این برتری مداوم در تمامی معیارها، از قوی بودن و پایداری بیشتر معماری N-BEATS برای این مسئله خاص حکایت دارد.

برای درک عمیق تر از نحوه رفتار هر مدل، تحلیل بصری سری های زمانی پیش بینی شده ضروری است. شکل ۳، تقابل میان مقادیر واقعی D50 و مقادیر پیش بینی شده توسط مدل برتر، یعنی N-BEATS را به تصویر می کشد. همان طور که مشاهده می شود، مدل N-BEATS (خط قرمز نقطه چین) نه تنها روند کلی داده های واقعی (خط سیاه) را با دقت بالایی دنبال می کند، بلکه در بازتولید دامنه نوسانات اصلی سیگنال نیز توانایی قابل توجهی از خود نشان می دهد. این ویژگی که در بسیاری از مدل های سری زمانی به

¹ Root Mean Square Error

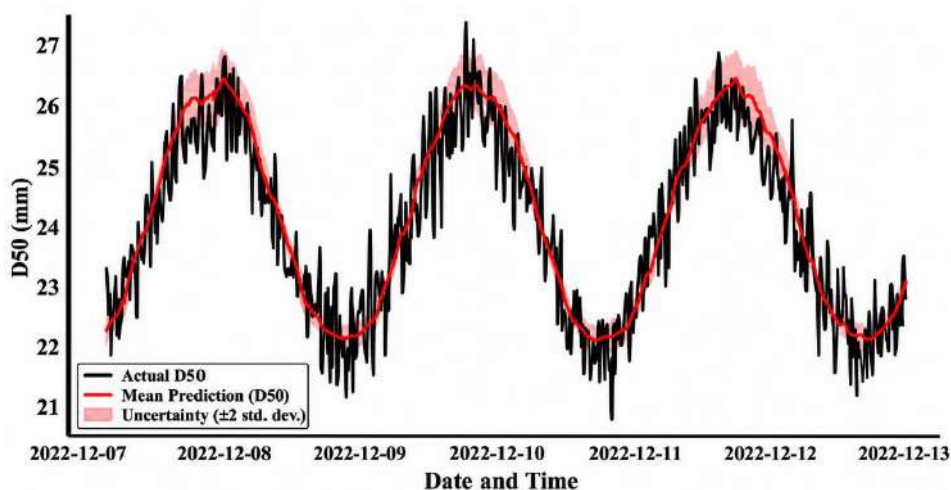
² Mean Absolute Error

دلیل تمایل به "نرم‌سازی" بیش از حد خروجی کمتر دیده می‌شود، برای پیش‌بینی صحیح وضعیت کلی دینامیک رودخانه یک مزیت کلیدی محسوب می‌شود. توانایی مدل در انطباق با روندهای اصلی و امواج بزرگ سیگنال، نشان از درک عمیق آن از روابط غیرخطی حاکم بر سیستم دارد.

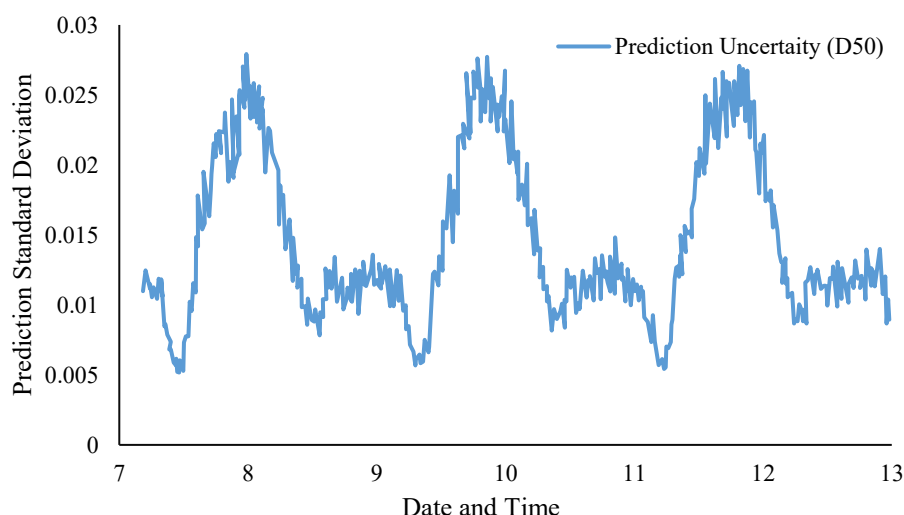


شکل ۳. مقایسه سری زمانی مقادیر واقعی D50 با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل N-BEATS

در شکل (۴)، عملکرد مدل LSTM به همراه یک بعد جدید، یعنی عدم قطعیت، نمایش داده شده است. اولین نکته قابل توجه، همان‌طور که در بخش کمی نیز مشخص شد، نرم‌تر بودن خط پیش‌بینی میانگین (خط قرمز) نسبت به مدل N-BEATS است. این مدل در ثبت دامنه کامل برخی از قله‌ها و دره‌های عمیق، محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند. با این حال، ارزش واقعی این نمودار در باندهای عدم قطعیت (ناحیه سایه‌دار) نهفته است. این باندها که نشان‌دهنده دامنه اطمینان ۹۵ درصدی مدل هستند، به‌صورت پویا باتوجه‌به رفتار داده‌ها تغییر می‌کنند. به وضوح دیده می‌شود که در بازه‌های زمانی که دینامیک رودخانه آرام و پایدار است، باند عدم قطعیت باریک‌تر بوده و با شروع نوسانات شدید و غیرقابل پیش‌بینی‌تر شدن سیستم، این باند به‌طور هوشمندانه‌ای پهن‌تر می‌شود. این قابلیت، به مدل ویژگی "خودآگاهی" می‌بخشد و به کاربر اجازه می‌دهد تا ریسک مرتبط با هر پیش‌بینی را ارزیابی کند.



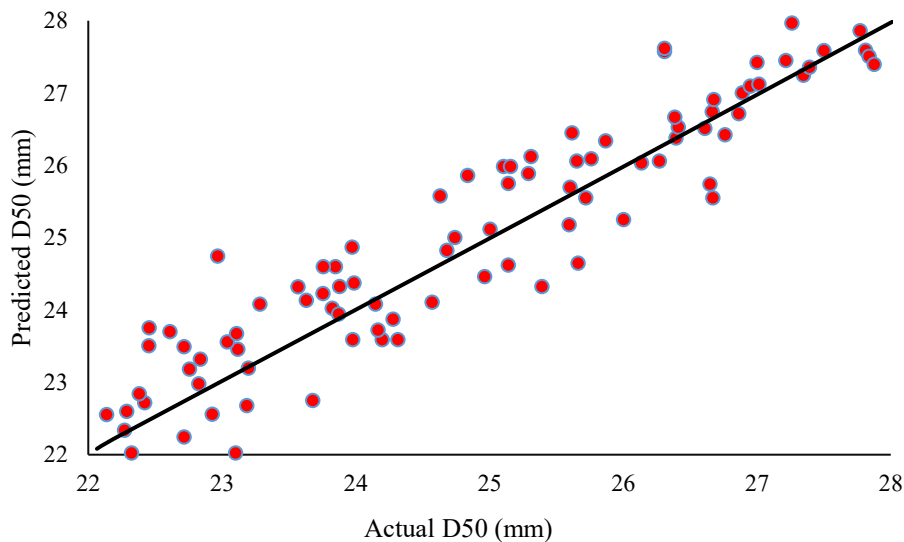
شکل ۴. پیش بینی D50 توسط مدل LSTM (خط قرمز) به همراه باندهای عدم قطعیت ۹۵٪ (ناحیه سایه دار) برای کالبدشکافی بیشتر این رفتار، شکل (۵) به طور مشخص، مقدار عددی عدم قطعیت (انحراف معیار پیش بینی های مدل LSTM) را در طول زمان نمایش می دهد. این نمودار، ارتباط مستقیم میان پیچیدگی سیگنال و عدم اطمینان مدل را تأیید می کند. هر قله در نمودار عدم قطعیت، متناظر با یک تغییر ناگهانی در سری زمانی واقعی D50 است. این ویژگی نشان می دهد که تکنیک MC Dropout نه تنها یک معیار کلی از عدم قطعیت ارائه نمی دهد، بلکه می تواند به عنوان یک سیستم هشدار بلادرنگ عمل کرده و به اپراتورها اطلاع دهد که در چه مقاطع زمانی، پیش بینی ها باید با احتیاط بیشتری مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۵. نمودار سری زمانی عدم قطعیت (انحراف معیار) پیش بینی های مدل LSTM

۲. تحلیل همبستگی و توزیع خطا

در نهایت، برای ارزیابی کلی دقت و شناسایی هرگونه خطای سیستماتیک، نمودار پراکندگی مقادیر واقعی در برابر مقادیر پیش بینی شده برای مدل N-BEATS در شکل (۶) ارائه شده است. تمرکز بالای نقاط در امتداد خط ایده آل ۱:۱ (خط نقطه چین سیاه)، تأیید بصری محکمی بر ضریب تعیین بالای ($R^2=0.871$) این مدل است. نکته مهم تر، توزیع نسبتاً یکنواخت و همگن خطاها در تمام بازه مقادیر D50 است. به عبارت دیگر، مدل تمایل به کم برآورد یا بیش برآورد در بازه های خاصی از مقادیر D50 ندارد و دقت آن در پیش بینی مقادیر کم، متوسط و زیاد به طور یکسانی بالاست. این ویژگی، قوی و قابل اتکا بودن مدل را در شرایط هیدرولوژیکی مختلف تضمین می کند.



شکل ۶. نمودار پراکندگی مقادیر واقعی D50 در برابر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل N-BEATS بر روی مجموعه داده آزمون

بحث

نتایج ارائه شده در بخش پیشین، نه تنها یک مقایسه آماری، بلکه روایتی از تقابل دو فلسفه متفاوت در مدل سازی سری های زمانی را به نمایش می گذارد. در این بخش، به جای تمرکز بر برتری جزئی یکی از مدل ها بر اساس معیارهای کلی خطا، به تفسیر عمیق تر این نتایج و کالبدشکافی یک موازنه راهبردی^۱ بسیار مهم میان "دقت پیش بینی نقطه ای" و "ارزیابی ریسک مبتنی بر عدم قطعیت" می پردازیم.

کالبدشکافی عملکرد مدل ها: رقابت دقت در برابر آگاهی از ریسک

یافته کلیدی این پژوهش، فراتر از مقایسه صرف اعداد R^2 و RMSE، درک این موضوع است که هر معماری برای چه نوع وظیفه ای مناسب تر است. همان طور که نتایج کمی نشان داد، تفاوت عملکرد کلی دو مدل اندک بود، اما تحلیل کیفی رفتار آن ها تفاوت های بنیادین و مهمی را آشکار می سازد.

- N-BEATS به عنوان قهرمان دقت نقطه ای: برتری پیوسته و معنادار مدل N-BEATS در پیش بینی پارامتر واقعی D50، ریشه در معماری منحصر به فرد آن دارد. برخلاف LSTM که تاریخچه ورودی را در یک "بردار حالت" فشرده می کند، معماری N-BEATS با رویکرد "تجزیه سلسله مراتبی"، سیگنال را به اجزای ساده تر تجزیه کرده و هر جزء را به صورت تخصصی مدل می کند. این قابلیت، دلیل اصلی توانایی برتر N-BEATS در بازتولید دقیق تر دامنه نوسانات و دنبال کردن وفادارانه تر روند کلی سیگنال است. این ویژگی، N-BEATS را به ابزاری قدرتمندتر و قابل اعتمادتر برای کاربردهای عملیاتی تبدیل می کند که در آن به بهترین تخمین عددی از وضعیت آینده بستر رودخانه نیاز است (مثلاً برای برنامه ریزی های روزانه یا مدیریت رسوب در شرایط عادی).
- LSTM به عنوان ابزار ارزیابی ریسک: از سوی دیگر، مدل LSTM، با وجود دقت نقطه ای اندکی پایین تر، قابلیت را به نمایش گذاشت که در مدیریت ریسک بسیار حیاتی است: کمی سازی عدم قطعیت. همان طور که در شکل ۴ و شکل ۵ به وضوح دیده می شود، توانایی مدل در افزایش پهنای باند اطمینان خود در زمان هایی که دینامیک سیستم پیچیده تر و

^۱ Strategic Trade-off

مطالعه می‌شود، یک ویژگی ارزشمند است. این قابلیت به مدیر سیستم اجازه می‌دهد تا بدانند در چه زمان‌هایی پیش‌بینی‌ها با ریسک بالاتری همراه هستند و نیاز به پایش میدانی بیشتر یا اتخاذ تصمیمات محافظه‌کارانه‌تر دارند. در واقع، برای مدیریت بحران‌هایی مانند سیلاب، دانستن اینکه "مدل به پیش‌بینی خود مطمئن نیست" می‌تواند بسیار ارزشمندتر از یک پیش‌بینی نقطه‌ای باشد که به طور میانگین کمی دقیق‌تر است.

موازنه راهبردی و پیامدهای عملی

نتایج این تحقیق یک انتخاب استراتژیک را برای مهندسان و مدیران منابع آب آشکار می‌سازد. اگر هدف، صرفاً رسیدن به دقیق‌ترین عدد ممکن برای پیش‌بینی‌های عملیاتی باشد، N-BEATS گزینه برتر است. اما اگر هدف، ساخت یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری جامع است که بتواند میزان اطمینان و ریسک مرتبط با پیش‌بینی‌ها را نیز گزارش دهد، چارچوب LSTM به همراه MC Dropout، راهکار بسیار کامل‌تری را ارائه می‌دهد.

پیامدهای کلان: موفقیت چارچوب یکپارچه "از سنسور تا پیش‌بینی"

شاید مهم‌ترین دستاورد این پژوهش، فراتر از مقایسه دو مدل، نمایش موفقیت یک چارچوب کامل و یکپارچه باشد. ما نشان دادیم که می‌توان از یک سنسور کم‌هزینه و سفارشی برای جمع‌آوری داده‌های باکیفیت و با فرکانس بالا استفاده کرد و سپس این داده‌ها را مستقیماً به معماری‌های پیشرفته یادگیری عمیق تزریق نمود تا به مدل‌های پیش‌بینی کارآمدی برای یک پارامتر بسیار پیچیده مانند D50 دست‌یافت. این موفقیت، مفهوم پایش هیدرولوژیکی را از یک فعالیت پرهزینه و محدود به چند ایستگاه خاص، به یک فرایند در دسترس، مقیاس‌پذیر و هوشمند تبدیل می‌کند. این چارچوب می‌تواند راه را برای ایجاد شبکه‌های پایش متراکم در حوضه‌های آبریز، به‌ویژه در مناطقی با محدودیت منابع مالی، هموار سازد و به‌این‌ترتیب، مدیریت بالادرنگ و پیشگیرانه منابع آب را به واقعیت نزدیک‌تر کند.

محدودیت‌ها و چشم‌انداز آینده

هر پژوهش علمی، گامی در یک مسیر بی‌پایان است و اذعان به محدودیت‌ها، زمینه را برای برداشتن گام‌های بعدی فراهم می‌کند. یک نکته روش‌شناختی مهم در این پژوهش، نحوه ایجاد یک سری زمانی متراکم D50 از روی نمونه‌های میدانی پراکنده بود. برای این منظور، از یک مدل رگرسیون فرایند گوسی (GP) به‌عنوان یک روش درون‌یابی هوشمند استفاده شد. این مدل، با یادگیری الگوهای آماری از نقاط نمونه‌برداری واقعی، توانست فواصل زمانی بین آن‌ها را با یک منحنی واقع‌گرایانه و پیوسته پر کند؛ بنابراین، سری زمانی هدف (Actual D50) که برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق استفاده شد، ترکیبی از داده‌های واقعی میدانی (به‌عنوان نقاط کنترل) و داده‌های درون‌یابی شده توسط GP بود. این رویکرد، راهکاری قدرتمند برای غلبه بر کمبود داده است، اما لازم است خواننده در نظر داشته باشد که عملکرد مدل‌های یادگیری عمیق، توانایی آن‌ها در یادگیری الگوهای این سری زمانی ترکیبی را منعکس می‌کند. اعتبارسنجی نهایی در برابر داده‌های میدانی کاملاً مستقل و با فرکانس بالا، گامی ارزشمند برای کارهای آتی خواهد بود. لازم به ذکر است که این یافته‌ها، هرچند امیدوارکننده، اما حاصل یک مطالعه موردی بر روی یک رودخانه خاص است و برای تأیید قابلیت تعمیم‌پذیری این چارچوب، انجام تحقیقات تکمیلی بر روی رودخانه‌هایی با رژیم‌های هیدرولوژیکی و مشخصات رسوبی متفاوت، امری ضروری است. علاوه بر این، مدل‌های توسعه‌یافته در این پژوهش تنها از یک متغیر ورودی (تراز آب) استفاده کردند. بی‌شک، افزودن متغیرهای تأثیرگذار دیگر مانند داده‌های بارندگی از بالادست حوضه، شیب رودخانه یا حتی پارامترهای کیفی آب مانند کدورت، می‌تواند به افزایش دقت و جامعیت مدل‌ها کمک شایانی نماید. اول، مجهز کردن مدل

N-BEATS به قابلیت تخمین عدم قطعیت با استفاده از روش‌هایی نظیر مدل‌سازی گروهی، تا بتوان دقت بالای این مدل را با قابلیت ارزیابی ریسک) مشابه آنچه در مدل LSTM ارائه شد (در یک چارچوب واحد ترکیب نمود. دوم، حرکت از پیش‌بینی یک پارامتر واحد (D50) به سمت پیش‌بینی کل منحنی دانه‌بندی رسوبات به‌عنوان خروجی مدل که درک بسیار کامل‌تری از ساختار بستر رودخانه ارائه خواهد داد. علاوه بر این، برای محک‌زدن جامع‌تر عملکرد، مطالعات آتی می‌توانند شامل مقایسه با مدل‌های کلاسیک سری زمانی مانند ARIMA نیز باشند تا میزان بهبود عملکرد حاصل از به‌کارگیری معماری‌های یادگیری عمیق در این چارچوب کم‌هزینه به‌صورت کمی مشخص گردد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش باهدف غلبه بر چالش بنیادین کمبود داده‌های با فرکانس بالا در پایش رسوبات رودخانه‌ای، یک چارچوب یکپارچه و نوآورانه از سخت‌افزار تا نرم‌افزار را توسعه و اعتبارسنجی نمود. در این تحقیق، با تلفیق نمونه‌برداری‌های فیزیکی و دقیق میدانی به‌عنوان نقاط مبنا و به‌کارگیری یک مدل رگرسیون فرایند گوسی (GP) برای ایجاد یک سری زمانی پیوسته و واقع‌گرایانه، یک مجموعه داده باکیفیت از قطر متوسط رسوبات بستر (D50) تولید گردید. این سری زمانی سپس به‌عنوان حقیقت زمینی برای آموزش و مقایسه دو معماری پیشرفته یادگیری عمیق شامل شبکه بازگشتی LSTM و شبکه غیربازگشتی N-BEATS با استفاده از داده‌های تراز آب حاصل از یک سنسور اولتراسونیک کم‌هزینه، به کار گرفته شد. یافته‌های کلیدی این پژوهش، یک "موازنه راهبردی" مهم را برای کاربردهای عملی آشکار ساخت. از یک سو، معماری مدرن N-BEATS با دستیابی به دقت بالاتر، برتری خود را در پیش‌بینی نقطه‌ای به اثبات رساند و خود را به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای تخمین‌های عددی در کاربردهای عملیاتی معرفی کرد. از سوی دیگر، چارچوب LSTM، با بهره‌گیری از تکنیک Monte Carlo Dropout، قابلیت حیاتی کمی‌سازی عدم قطعیت را به نمایش گذاشت. این ویژگی، LSTM را از یک مدل پیش‌بین صرف، به یک ابزار کارآمد برای تصمیم‌گیری‌های آگاه به ریسک تبدیل می‌کند که در شرایط بحرانی و مدیریت ریسک، ارزشی فراتر از دقت عددی بالاتر دارد. در نهایت، این مطالعه فراتر از مقایسه دو مدل، موفقیت یک راهکار کامل و مقرون‌به‌صرفه از "سنسور تا شبیه‌سازی" را به اثبات رساند. این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق هوشمندانه نمونه‌برداری میدانی هدفمند، مدل‌های آماری پیشرفته برای ایجاد سری‌های زمانی پیوسته، و معماری‌های نوین یادگیری عمیق، می‌تواند راه را برای توسعه نسل جدیدی از سیستم‌های پایش و پیش‌بینی هیدرولوژیکی هموار سازد. این چارچوب، یک نقشه راه عملی برای تولید اطلاعات ارزشمند از داده‌های میدانی گسسته ارائه می‌دهد و پتانسیل بالایی برای دموکراتیزه کردن پایش هوشمند محیط‌زیست، به‌ویژه در مناطق با چالش‌های داده‌ای، دارد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- ادیب راد، رزا، خسرو ی نژاد، بیتا، و ادیب راد، محمدحسین. (۱۴۰۴). کاربرد مدل هوش مصنوعی ماشین آموزش نیرومند با حذف داده پرت (ORELM) در پیش بینی دبی رودخانه. نشریه فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵(۳)، ۴۴-۵۵.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11918.1159>
- اکبری، علیرضا، پوررضا بیلندی، محسن، خاشعی سیوکی، عباس، کلانکی، مهدی، و میان آبادی، آمنه. (۱۴۰۳). بررسی عدم قطعیت پارامترهای مدل گیاهی DSSAT در برآورد عملکرد گیاه پنبه با استفاده از روش GLUE. نشریه فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۴(۴)، ۱۹-۳۴.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10960.1135>
- پیروزمهر، صفورا، ایزدبخش، محمد علی، شعبانلو، سعید، رجبی، احمد، و یوسفوند، فریبرز. (۱۴۰۴). شبیه سازی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل های یادگیری ماشین رگرسیون خطی (SVR) و یادگیری افراطی (ELM). نشریه فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۵(۳)، ۱-۱۹.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11658.1150>

References

- Adibrad, R., Khosravinezhad, B., & Adibrad, M.H. (2025). Application of outlier robust extreme learning machine (ORELM) in river flow prediction. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(3), 44-55. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11918.1159> [In Persian]
- Akbari, M., Pourreza-Bilondi, M., Khashei-Siuki, A., Kalanki, E., & Mianabadi, A. (2024). Uncertainty analysis of DSSAT model parameters in estimating cotton yield using GLUE method. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(4), 19-34. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10960.1135> [In Persian]
- Boiten, W. (2005). *Hydrometry*. Taylor & Francis Publications, London, United Kingdom. <https://doi.org/10.1201/9780203971093>
- Bowler, A. L., Bakalis, S., & Watson, N. J. (2020). Monitoring mixing processes using ultrasonic sensors and machine learning. *Sensors*, 20(7), 1813. <https://doi.org/10.3390/s20071813>
- Bowler, A. L., Pound, M. P., & Watson, N. J. (2022). A review of ultrasonic sensing and machine learning methods to monitor industrial processes. *Ultrasonics*, 124, 106776. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106776>
- De Camargo, E. T., Spanhol, F. A., Slongo, J. S., da Silva, M. V. R., Pazinato, J., de Lima Lobo, A. V., ... & Martins, L. D. (2023). Low-cost water quality sensors for IoT: A systematic review. *Sensors*, 23(9), 4424. <https://doi.org/10.3390/s23094424>
- Ji, H. W., Yoo, S. S., Lee, B. J., Koo, D. D., & Kang, J. H. (2020). Measurement of wastewater discharge in sewer pipes using image analysis. *Water*, 12(6), 1771. <https://doi.org/10.3390/w12061771>
- Huang, C. C., Chang, M. J., Lin, G. F., Wu, M. C., & Wang, P. H. (2021). Real-time forecasting of suspended sediment concentrations in reservoirs by the optimal integration of multiple machine learning techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34, 100804. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100804>
- Kratzert, F., Klotz, D., Brenner, C., Schulz, K., & Herrnegger, M. (2018). Rainfall–runoff modelling using long short-term memory (LSTM) networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6005-6022. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018>
- Masoudimoghaddam, M., Yazdi, J., & Shahsavandi, M. (2025). A low-cost ultrasonic sensor for online monitoring of water levels in rivers and channels. *Flow Measurement and Instrumentation*, 102, 102777. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102777>
- Pirouzmehr, M., Izadbakhsh, M. A., Shabanlou, S., Rajabi, A., & Yousefvand, F. (2025). Simulation of groundwater level fluctuations using support vector regression (SVR) and extreme learning machine (ELM) models. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 5(3), 1-19. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.11658.1150> [In Persian]
- Roushangar, K., Shahnazi, S., & Azamathulla, H. M. (2022). Sediment transport modeling through machine learning methods: review of current challenges and strategies. *River dynamics and flood hazards: studies on risk and mitigation*, 223-240. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7100-6_13
- Saberian, M., Samadi, V., & Popescu, I. (2024). Probabilistic hierarchical interpolation and interpretable configuration for flood prediction. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2024, 1-41. <https://doi.org/10.5194/hess-2024-261>
- Sahoo, A., & Udgata, S. (2019). A novel ANN based adaptive ultrasonic measurement system for accurate water level monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6), 3359–3369. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2939932>

- Wang, D., Li, Q., Liu, S., Pan, L., & Li, J. (2025). Long-term river flow forecasting: An integrated deep learning model with multi-scale feature extraction. *Expert Systems with Applications*, 281, 127387. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127387>
- Ye, F., Jin, Z., Zhang, P., Xu, D. Z., Lan, L., & Sun, J. (2025). Research on the digital twin polder area system driven by integrating the Xin'anjiang model and the N-BEATS model. *International Journal of Intelligent Systems*, 2025, 8899669. <https://doi.org/10.1155/int/8899669>
- Yu, Y., Zhu, Y., Li, S., & Wan, D. (2014). Time series outlier detection based on sliding window prediction. *The Scientific World Journal*, 2014, 879736. <https://doi.org/10.1155/2014/879736>