Research Paper

Evaluating Control and Adjustment of Check Gates and Off-Takes in Water Conveyance Canals Proportional to Crop Water Requirement and Daily Delivery

Javad Asadi[1], Hesam Ghodousi[2*], Kazem Shahverdi[3]

[1] M. Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[2] Assistant professor, Department of Water Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran
[3] Assistant professor, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

10.22125/IWE.2022.337022.1618

Received:
April 10, 2022
Accepted:
July 8, 2022
Available online:
August 23, 2023

Keywords:
night -time closure irrigation, optimum operation, Performance assessment, simulation

Abstract

Water conveyance and distribution networks are the main factors that directly affect water and irrigation management. Therefore, proper management, operation, water delivery, and water distribution are necessary. Although most of the irrigation networks are operated traditionally, farmers have little interest to irrigate at night due to the water scarcity and increasing the level of social welfare. In this research, daily water delivery and distribution were evaluated and compared to the traditional one. To this end, 12-hours irrigation (assuming the length of day and night are equal) and 6-hours (proportional to crop water requirement as much as possible) were investigated with increasing the volume flow rate and consequently decreasing irrigation duration, without changing the volume of water delivered. To simulate the canal irrigation canal system simulation (ICSS) was used. The results revealed that daily operation is possible with reasonable accuracy.

* **Corresponding Author:** Hesam Ghodousi
Address: Department of water engineering, University of Zanjan, Iran,
Email: Ghodousi@znu.ac.ir
Tel: 09122005221

1. Introduction

Water efficiency increase is one of the main tasks that should be done in areas suffering water scarcity. To manage water consumption successfully, two aspects of management, including canal level and farm level, should be considered. To this end, research has been done. In Shahverdi and Monem (2012), the automation of canals was studied. In Shahverdi and Monem (2015), the application of artificial intelligence was investigated, showing high performance. There are many other types of research done to improve water efficiency. However, tending to night-time closure among farmers has been increasing due to water scarcity. In this research, night-time closure irrigation was studied in the east Aghii canal by defining different scenarios in the ICSS simulation model.

2. Materials and Methods

The East Aghili canal, with 20 turnouts and 11 check structures, located in Khuzestan province in southwest Iran, was used as a case study. The check structures and turnouts use rectangular sluice gates. The canal length, Manning's roughness coefficient,

and trapezoidal cross-section side slopes are 16.215 km, 0.017, and 1:1, respectively. The base width of the canal is 1.5 and 1 m from stations 0–9.485 and 9.485–16.215 km, respectively. The bed slope varies along the canal between 0.0001 and 0.0004.

The ICSS model, a hydrodynamic simulation model, can simulate steady or unsteady flow and operation of hydraulic structures in irrigation canals. Also, the ICSS model can simulate different hydrology and hydraulic conditions, different boundary conditions, and different operational strategies. The ICSS model has been validated using

laboratory data, with an error of 0.68%. It was used to simulate the canal in this research. Three different scenarios were defined: Scenario 1 is a 24-hours delivery case in which inflow is increased from 1320 m^3/s to 1470 m^3/s causing the increase in off-takes flows; Scenario 2 is a 12-hours delivery case in which inflow is increased from 1470 m^3/s to 2940 m^3/s causing the increase in off-takes flow; and Scenario 3 is a 6-hours delivery case in which inflow is increased from 1470 m^3/s to 5880 m^3/s causing the increase in off-takes flows.

Water depth introduced in (Clemmens et al., 1998) and delivery introduced in (Molden and Gates, 1990) performance indicators were used to evaluate the results and compare them.

3. Results

Water delivery performance of MAE and IAE in Scenario1 falls in good and acceptable ranges while increasing with volume flow rate increase. However, the results are comparable with literature, e.g, Savari et al. (2016). The water delivery scenarios show reasonable performance. But some water shortages are shown at off-takes located downstream of the canal. Overall, the results reveal that 12-hours and –hours scenarios show better performance than 24-hours one. Therefore, night-time closure is recommended to be applied practically.

4. Discussion and Conclusion

According to the results, all performance indicators in the defined scenarios fall in their desired ranges with good accuracy in the east Aghili network. Decreasing water delivery duration with increasing volume flow rate for constant and assigned water volume can successfully be performed in the considered canal. Similar research is recommended to be doe and evaluated in other conentioal canal operated manually.

5. Six important references

1) Clemmens A.J. 1998. Improving irrigated agriculture performance through an understanding of the water delivery process. J. Irrig. Drain. Eng, 55: 223-234.7.
2) Molden, D.J.; Gates, T.K. Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. J. Irrig. Drain. Eng. 1990, 116, 804–823.

3) Montazar Manager, A.A. and Pashazadeh, N. 2011. Performance Assessment of West Main Canal of Dez in the Different Water Operational Scenarios Using CANALMAN Model, Journal of water and soil, 25(1), 125.
4) Savari, H., Monem, M., and Shahverdi, K. 2016. Comparing the Performance of FSL and Traditional Operation Methods for On-Request Water Delivery in the Aghili Network, Iran. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(11), 04016055.
5) Shahverdi, K., and Monem, M. J. 2012. Construction and evaluation of the bival automatic control system for irrigation canals in a laboratory flume. Irrigation and drainage, 61(2), 201-207.
6) Shahverdi, K., and Monem, M. J. 2015. Application of reinforcement learning algorithm for automation of canal structures. Irrigation and drainage, 64(1), 77-84.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال سیزدهم. ویژه نامه تابستان ۱۴۰۲

ارزیابی کنترل و تنظیم سازه‌های آب‌بند و آبگیر در کانال‌های انتقال آب متناسب با نیاز آبی و تحویل روزانه

جواد اسدی[۱]، حسام قدوسی[۲]، کاظم شاهوردی[۳]

تاریخ ارسال:۱۴۰۱/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۰۴/۱۷

مقاله برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

چکیده

شبکه‌های انتقال و توزیع آب از مهم‌ترین عواملی هستند که عملکرد آنها مستقیماً بر مدیریت آب و آبیاری تأثیرگذار است. لذا مدیریت، کنترل بهره‌برداری و توزیع و تحویل آب در این شبکه‌ها امری کاملاً ضروری می‌باشد. در حال حاضر با توجه به محدودیت منابع آب و افزایش نسبی سطح رفاه اجتماعی، کشاورزان تمایل کمتری به آبیاری شبانه دارند. این در حالی است که در عمده شبکه‌های آبیاری کشور، بهره‌برداری از کانال‌ها بصورت مرسوم (۲۴ ساعته) است. در این تحقیق، تحویل و توزیع آب بصورت شب خاموشی در کانال عقیلی شرقی، واقع در شبکه آبیاری گتوند در استان خوزستان (ایران)، ارزیابی و با روش مرسوم مقایسه شد. برای این منظور، تحویل ۱۲ ساعته (با فرض برابر بودن طول شب و روز) و تحویل ۶ ساعته (متناسب با نیاز آبی در حد امکان) بررسی شد. لازم به ذکر است که سناریوهای بهره‌برداری منطبق و سازگار با کانال و سازه‌های موجود در آن تعریف می‌باشند. با کاهش مدت زمان آبیاری و به همان نسبت افزایش دبی تحویلی، برنامه‌ریزی به گونه‌ای انجام شد که در حجم آب تحویلی تغییری بوجود نیاید. به عنوان نمونه، در تحویل ۱۲ ساعته که مدت زمان آبیاری به نصف کاهش می‌یابد، دبی تحویلی طی ۱۲ ساعت نسبت به حالت مرسوم به دو برابر افزایش یافت. به منظور شبیه‌سازی کانال از مدل هیدرودینامیک ICSS و جهت ارزیابی و مقایسه نتایج از شاخص‌های ارزیابی عملکرد استاندارد استفاده شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های راندمان و کفایت در حالت شب‌خاموشی به ترتیب برابر با ۰/۹۷۲ و ۰/۹۱۸ و شاخص‌های پایداری و عدالت به ترتیب برابر با ۰/۰۴۷ و ۰/۰۱۲ می‌باشند. در نتیجه، می‌توان ضمن اطمینان از داشتن راندمان و کفایت مطلوب، مدت زمان آبیاری را کاهش داد و بصورت شب‌خاموشی آبیاری را انجام داد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری شب خاموشی، ارزیابی عملکرد، مدت زمان بهره‌برداری، ICSS.

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. Javad_asadi3700@yahoo.com
[۲] استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. Ghodousi@znu.ac.ir
[۳] استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. k.shahverdi@basu.ac.ir

مقدمه

در کشورهایی که پتانسیل منابع آب در آنها محدود می‌باشد، افزایش بهره‌برداری تابع میزان آب در دسترس بوده و به منظور بهره‌وری حداکثر از آب موجود، نیاز به ارتقاء و بهبود مدیریت عرضه و تقاضا می‌باشد. با بهبود روش‌های تحویل و توزیع آب، امکان مدیریت صحیح آب موجود فراهم خواهد شد (Bhadra et al., 2010). در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی بر روی بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری با استفاده از روش‌های مختلف از جمله بهینه‌سازی، شبکه‌های عصبی و غیره انجام شده است و با توجه به اهمیت مدیریت آب و بهبود روش‌های تحویل و توزیع آن، مطالعات در این زمینه و ارائه روش‌های مؤثرتر، همچنان در حال انجام می‌باشد.

مدیریت موفق مصرف آب، نیازمند دو نوع مدیریت در دو سطح مختلف مزرعه و توزیع و تحویل آب می‌باشد (Smith et al., 1997). در اکثر موارد، آب به صورت چرخشی و با یک برنامه از پیش تعیین شده و عموماً با محدودیت‌های مختلف، به مزارع تحویل داده می‌شود، در نتیجه زارعین مدیریت کافی بر روی آب دریافتی نداشته و بهره‌وری مصرف آب کاهش می‌یابد. مدیریت مناسب آب درون مزرعه نیازمند اینست که، آبی که به مزارع تحویل داده می‌شود قابل مدیریت باشد و این بدین معنی است که اطمینان و انعطاف‌پذیری کافی در تحویل و توزیع آب وجود داشته باشد. تا زمانی که آب تحویلی به زارعین قابل اعتماد و مدیریت نباشد و زارعین نقشی در تعیین دور آبیاری، نرخ و مدت آبیاری نداشته باشند، سرمایه‌گذاری انجام شده در سطح کانال‌ها، در بهبود آبیاری داخل مزرعه اثرات مثبت قابل توجهی نخواهد داشت (Burt, 2011).

در تحقیقی که توسط (Shahverdi and Monem 2012) انجام شد، خودکارسازی سازه‌های کنترل و تنظیم بررسی شده و روش کنترلی Bival بصورت ریاضی و مدل آن توسعه یافت و سپس در مقیاس آزمایشگاهی اجرا شد. نتایج این تحقیق نشانگر توانایی بالای روش‌های کنترل خودکار در کنترل و تنظیم سطح آب می‌باشد.

در تحقیق Shahverdi and Monem (2015)، نیز استفاده از روش‌های هوش مصنوعی جهت بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری و بررسی توانایی آنها مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج نشانگر پتانسیل بالای این روش‌ها در کنترل شرایط جریان در کانال‌ها می باشد.

در تحقیق (Shahverdi et al. 2016)، روش یادگیری تقویتی در کانال‌های آبیاری توسعه یافته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده، بیانگر توانایی این روش در کنترل و تنظیم سازه‌های آبگیر و آب‌بندها می‌باشد به طوری که تغییرات عمق در بالادست آب‌بندها کمتر از ۱۰ درصد و شاخص‌های تحویل دبی آب نیز بسیار نزدیک به مقادیر بهینه می‌باشد.

در تحقیق Savari et al. (2016) ، عملکرد روش‌های دستی و هوشمند در کانال عقیلی شرقی، واقع در شبکه آبیاری گتوند در استان خوزستان (ایران)، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشانگر این است که در شرایط بحرانی بهره‌برداری که در آنها کمبود آب وجود دارد، استفاده از روش‌های هوشمند اکیداً مورد نیاز می‌باشد اما در شرایط عادی بهره‌برداری که کمبود قابل توجهی در آب ورودی به کانال وجود ندارد، استفاده از روش‌های دستی بهره‌برداری می‌تواند مفید باشد و نیاز به سیستم‌های کنترلی پیشرفته نمی‌باشد. این نتیجه در تحقیق Karimi et al. (2018) که در آن شبکه‌های آبیاری بر اساس مسائل مختلف سازه‌های تنظیم و تحویل مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای مشترک بهبود عملکرد آنها ارائه شده است، به شکل دیگری حاصل شده است و آن، بهبود بهره‌برداری از کانال‌ها با استفاده از بهره‌بردارهای با تجربه کافی می‌باشد.

در تحقیق Omidzade et al. (2020)، روش بهینه‌سازی الگوریتم جامعه مورچگان برای بهره‌برداری در شبکه عقیلی شرقی استفاده شده است و الگوهای بهره‌برداری با استفاده از آن برای سناریوهای مختلف بهره‌برداری استخراج شده و با استفاده از شاخص‌های استاندارد مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقدار شاخص عدالت در شرایط کمبود آب ۱۰ درصد برابر با ۰/۹ بدست

آمد. در پژوهش (Shahverdi et al. 2020)، نیز روشی برای تعمیم نتایج روش یادگیری تقویتی از یک حالت به سایر حالت‌ها بررسی شده و الگوریتمی توسعه داده شده است که یک بهره‌بردار به راحتی بتواند بر اساس دستورالعملی که حاصل نتایج مدل می‌باشد با سهولت بهره‌برداری از سازه‌ها را بصورت دستی و بدون نیاز به روش-های پیشرفته، انجام دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود روش‌های مختلفی برای بهره‌برداری از سازه‌های کنترل و تنظیم در کانال‌های آبیاری ارائه شده و نتایج عملکرد آنها گزارش شده است. با این حال، اکثر آنها بر مبنای تحویل مرسوم ۲۴ ساعته می‌باشند (یعنی در هر بار تنظیم سازه‌ها، آب به مدت ۲۴ ساعت تحویل آبگیرها می‌شود) و کمتر به مدت زمان تحویل آب با مدت زمان کمتر، توجه شده است. در تحقیق Savari and Monem (2021) روش‌های مختلف تحویل و توزیع آب در شبکه‌های آبیاری، با بررسی شبکه‌های آبیاری داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفته و دسته‌بندی‌های مختلفی برای پارامترهای مختلف، از جمله مدت زمان بهره‌برداری، ارائه شده است که نشان می‌دهد بهره‌برداری‌های ۲۴ ساعته، ۱۲ ساعته و ۶ ساعته در دنیا اجرا می‌شود.

منتظر و پاشازاده (۱۳۹۰) عملکرد توزیع آب در کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز با گزینه‌های مختلف بهره‌برداری، از جمله شب خاموشی را مورد ارزیابی قرار دادند. شرایط واقعی بهره برداری کانال در طول پنج ماه از اردیبهشت الی شهریور ۱۳۸۵ با استفاده از مدل واسنجی شده، شبیه‌سازی گردید. ارزیابی عملکرد گزینه‌های بهره‌برداری شب خاموشی نشان داد که انجام عملیات شب خاموشی نه تنها باعث کاهش عملکرد توزیع آب نشده بلکه در بسیاری از بازه‌های کانال موجب بهبود مقدار کمی شاخص‌های ارزیابی عملکرد توزیع آب می‌گردد. بررسی نتایج دو گزینه شب خاموشی مورد مطالعه در طول یک دوره ۱۵ روزه نشان داد با اجرای عملیات شب خاموشی، ۲۳/۱۱ درصد از تلفات آب در بازه‌های کانال کاهش می‌یابد. این در حالی است که با آبیاری شبانه، به دلیل عدم بهره‌برداری مناسب توسط کشاورزان، مقدار مذکور در طول شب هدر رفته و به زهکش‌های انتهای شبکه انتقال می‌یابد.

یافته‌های تحقیق مذکور نشان داد که کانال مورد مطالعه از پتانسیل بالایی در اجرای عملیات شب‌خاموشی آبگیرهای مزارع و کانال‌های فرعی برخوردار می‌باشد. از این رو پیشنهاد شد که تغییر رویکرد آبیاری روزانه و اجرای عملیات شب‌خاموشی در کانال‌ها، مورد توجه قرار گرفته و ارزیابی شود.

همانطور که اشاره شد، برای دست‌یابی به بهبود بهره‌وری، ارتقاء روش‌های تحویل آب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد و برنامه‌ریزی آب در سطح مزرعه نیازمند یک سامانه تحویل مناسب در کانال‌های آبیاری می‌باشد بطوریکه آب مورد نیاز را در زمان مورد نیاز و به مقدار مورد نیاز در طی مدت مشخص تحویل زارعین دهد. در بهره‌برداری مرسوم که در اکثر شبکه های آبیاری انجام می‌شود و به طور معمول آب بصورت ۲۴ ساعته تحویل داده می‌شود، تلفات آب زیاد است و راندمان آبیاری پائین می‌باشد. لذا آبیاری شب‌خاموشی در این تحقیق در کانال عقیلی شرقی مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور دو گزینه شامل آبیاری ۱۲ ساعته روزانه و آبیاری ۶ ساعته (آبیاری متناسب با نیاز آبی) بررسی و با بهره‌برداری مرسوم مقایسه شده است. دلیل بررسی آبیاری ۶ ساعته، متناسب‌سازی زمان تحویل آب با نیاز آبی در حد امکان می‌باشد. برای این منظور، مدل ریاضی کانال مذکور در محیط مدل هیدرودینامیک ICSS تهیه شد و با اعمال سناریوهای مورد اشاره، شبیه‌سازی انجام شد و سپس نتایج با سناریوی شبیه‌سازی مرسوم مورد مقایسه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

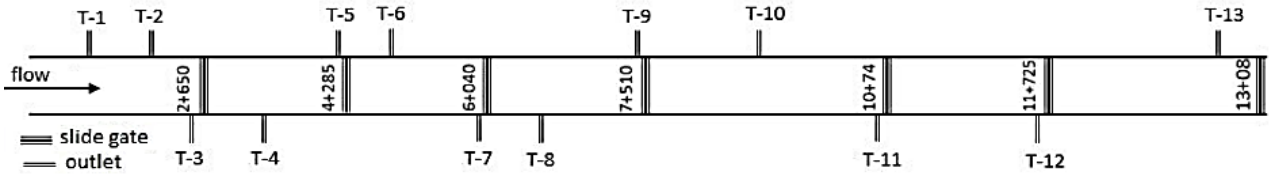
معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه عقیلی به مساحت حدود ۲۹۴ کیلومتر مربع در شمال استان خوزستان واقع شده است. این منطقه از شمال به رشته کوه‌های زاگرس جنوبی و رودخانه کارون و از مشرق به شهرستان مسجد سلیمان، از جنوب به رودخانه کارون و شهرستان شوشتر و از غرب به روخانه کارون و شهرستان گتوند محدود شده است. بخش عقیلی از لحاظ طبیعی به دو منطقه مشخص و متمایز تقسیم گردیده است، یکی منطقه کوهستانی و دیگری منطقه هموار و دشت. این

منطقه در مختصات جغرافیایی مابین ۴۸ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد.

شبکه آبیاری و زهکشی عقیلی که در این منطقه واقع شده است، متشکل از کانال اصلی عقیلی و دو کانال درجه یک به نام‌های کانال عقیلی شرقی و کانال عقیلی غربی می‌باشد. کانال اصلی با ظرفیت ۱۲ متر مکعب در ثانیه از سد تنظیمی انحرافی گتوند آبگیری نموده و در کیلومتر ۱+۹۰۰ دو کانال عقیلی شرقی و عقیلی غربی به ترتیب با حداکثر ظرفیت ۵ و ۷ متر مکعب در ثانیه از آن منشعب می‌شوند. سازه‌های آب‌بند عموماً به صورت دریچه‌های قطاعی و سازه‌های آبگیر به صورت دریچه‌های کشوئی می‌باشند. کلیه آبگیرها و تنظیم کننده‌ها در این شبکه به صورت دستی بهره‌برداری می‌شوند. وضعیت بهره‌برداری و توزیع کنونی آب در این کانال به این صورت است که بهره‌برداری تحویل آب بر اساس درخواست مصرف‌کنندگان زیردست هر دریچه که بایستی حداکثر تا ۲۴ ساعت قبل اعلام شده باشد، روزانه و معمولاً ساعت ۸ صبح انجام می‌گیرد. برای تحویل دبی و انجام عملیات بهره‌برداری، میراب کانال عقیلی شرقی ساعت ۸ صبح، در حضور مأمور اداره آب، دبی ورودی از کانال اصلی عقیلی به کانال عقیلی شرقی را تنظیم می‌کند. سپس میراب با در دست داشتن مقدار دبی‌های درخواستی در طول کانال حرکت می‌کند و عملیات تنظیم سازه‌ها را برای تحویل دبی درخواستی انجام می‌دهد. زمان تنظیم و میزان تنظیم بازشدگی سازه‌ها صرفاً برمبنای تجربه میراب و بر اساس جریان ماندگار ثانویه که در کانال بوجود می‌آید، انجام می‌شود. تنظیم سازه‌ها به ترتیب از بالادست به پایین دست انجام می‌شود و با تغییر دبی ورودی به کانال، همه آب‌بندهای کانال برای تنظیم سطح آب بالادست خود تنظیم می‌شوند. آبگیرهایی که درخواست جدید نداشته باشند، تنظیم نمی‌شوند.

کانال عقیلی شرقی بصورت بتنی با سطح مقطع ذوزنقه‌ای و شیب جانبی ۱:۱ ساخته شده است. طول این کانال در حدود ۱۶ کیلومتر بوده که تا حدود ۹ کیلومتری آن، عرض کف ۱/۵ متر و در ادامه ۱ متر می‌باشد. این کانال، ۲۰ سازه آبگیر، ۱۱ سازه تنظیم کننده و ۴ سیفون دارد. شکل شماتیک بخشی از کانال در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) شماتیک کانال عقیلی شرقی (حرف T نشانگر آبگیر می‌باشد)

مدل هیدرودینامیکICSS

هسته اصلی مدل ICSS که یک مدل هیدرودینامیک یک بعدی است به منظور شبیه‌سازی هیدرولیک، هیدرولوژی و بهره‌برداری از سیستم‌های انتقال توزیع آب آبیاری طراحی شده است. این مدل توسط محققین مختلف از جمله منعم (Monem, 1996) به منظور ارزیابی شبکه‌های آبیاری و روش‌های بهره‌برداری بهینه از آن توسعه یافت. مدل ICSS قادر است جریان ماندگار و غیرماندگار را برای شرایط مختلف بهره‌برداری از کانال‌های آبیاری با انواع شکل مقطع کانال همراه طیف قابل توجهی از سازه‌ها توام با جریان‌های گسترده ورودی و خروجی شبیه‌سازی کند. برای آنکه یک مدل بتواند رفتار هیدرولیکی جریان در کانال را بطور کامل شبیه‌سازی کند بایستی قادر باشد شرایط جریان را در هر دو حالت ماندگار و غیرماندگار محاسبه کند. در ارزیابی دقت مدل، اطلاعات خروجی مدل و روش بکار برده شده توسط کمیته کاری مدل‌های ریاضی جامعه مهندسین عمران کانادا در برنامه ارزیابی مدل‌های ریاضی-هیدرولیکی بطور دقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی بررسی گردیده و نتایج آن نشان داده است که عمق آب را حداکثر ۰/۶۸ درصد و حداکثر دبی جریان را ۱/۹ درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند.

سناریوهای بهره‌برداری

به منظور بررسی رفتار جریان در شرایط تغییرات نیاز، از نمونه‌ای از برنامه درخواست‌های دبی در کانال عقیلی شرقی (تحویل ۲۴ ساعته) به عنوان سناریوی ۱ استفاده شد. در سناریوی ۱۲ ساعته (سناریوی ۲)، چون زمان تحویل به نصف تقلیل می‌یابد، دبی تحویلی ۲ برابر می‌شود و در سناریوی ۶ ساعته (سناریوی ۳)، دبی ۴ برابر می‌شود زیرا زمان تحویل به یک چهارم تقلیل می‌یابد. در صورت استفاده از عمق آزاد کانال می‌توان مقدار دبی در کانال را افزایش داد. در مدل ریاضی نیز به راحتی با افزایش ارتفاع کانال، دبی مورد نظر را می‌توان ایجاد کرد. در جدول (۱) خلاصه اطلاعات سناریوها ارائه شده است. در این جدول ستون دوم دبی مربوط به شرایط ماندگار اولیه است که تمام سناریوها، از این شرط اولیه شروع می‌شود.

جدول (۱) مقادیر دبی‌های اولیه و دبی‌های مورد نیاز آبگیرهای کانال عقیلی شرقی در سناریوهای مختلف بهره‌برداری

بازه	آبگیر	دبی (متر مکعب در ثانیه)			
		شرایط اولیه	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
	ورودی	۱۳۲۰	۱۴۷۰	۲۹۴۰	۵۸۸۰
۱	آبگیر ۱	۸۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰
	آبگیر ۲	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰
۲	آبگیر ۳	۷۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
	آبگیر ۴	۸۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
	آبگیر ۵	۷۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
۳	آبگیر ۶	۶۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
	آبگیر ۷	۷۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
۴	آبگیر ۸	۸۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
	آبگیر ۹	۷۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
۵	آبگیر ۱۰	۶۰	۸۰	۱۶۰	۳۲۰
۶	آبگیر ۱۱	۶۰	۷۰	۱۴۰	۲۸۰
۷	آبگیر ۱۲	۶۰	۷۰	۱۴۰	۲۸۰
۸	آبگیر ۱۳	۶۰	۷۰	۱۴۰	۲۸۰
	آبگیر ۱۴	۷۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰
۹	آبگیر ۱۵	۶۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰
	آبگیر ۱۶	۶۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰
۱۰	آبگیر ۱۷	۶۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰
	آبگیر ۱۸	۵۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰
۱۱	آبگیر ۱۹	۵۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰
	آبگیر ۲۰	۵۰	۶۰	۱۲۰	۲۴۰

سناریوی ۱: در این سناریو تحویل ۲۴ ساعته است و طی آن دبی ورودی کانال از ۱۳۲۰ به ۱۴۷۰ متر مکعب در ثانیه افزایش می‌یابد.

سناریوی ۲: در این سناریو تحویل ۱۲ ساعته است و طی آن دبی ورودی کانال از ۱۴۷۰ به ۲۹۴۰ متر مکعب در ثانیه افزایش می‌یابد.

سناریوی ۳: در این سناریو تحویل ۶ ساعته است و طی آن دبی ورودی کانال از ۱۴۷۰ به ۵۸۸۰ متر مکعب در ثانیه افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که ظرفیت کانال عقیلی شرقی برابر با ۵ متر مکعب در ثانیه است. در نتیجه، جهت شبیه‌سازی دبی سناریوی سوم، مقدار ارتفاع کانال در مدل تهیه شده اندکی بیشتر از شرایط واقعی در نظر گرفته شد تا بتوان، شبیه‌سازی را انجام داد.

لازم به ذکر است که کانال عقیلی شرقی بصورت دستی بهره‌برداری می‌شود و در آن میراب با استفاده از یک موتورسیکلت شروع به حرکت کرده و در طول کانال از بالادست به پائین‌دست پیش می‌رود و به محض رسیدن به هر سازه آن را تنظیم می‌کند. فاصله زمانی بین تنظیم دو سازه متوالی در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲) فاصله زمانی بهره‌برداری بین دو آبگیر متوالی

شماره آبگیر	آبگیر ۱	آبگیر ۲	آبگیر ۳	آبگیر ۴	آبگیر ۵	آبگیر ۶	آبگیر ۷	آبگیر ۸	آبگیر ۹	آبگیر ۱۰
زمان (دقیقه)	۶/۷	۱۶/۹	۶/۷	۱۵/۸	۷/۴	۱۱/۰	۷/۴	۱۵/۸	۷/۳	۱/۷
شماره آبگیر	آبگیر ۱۱	آبگیر ۱۲	آبگیر ۱۳	آبگیر ۱۴	آبگیر ۱۵	آبگیر ۱۶	آبگیر ۱۷	آبگیر ۱۸	آبگیر ۱۹	آبگیر ۲۰
زمان (دقیقه)	۶/۵	۱۱/۹	۱۴/۲	۱۲/۷	۶/۵	۱۲/۰	۵/۰	۱۳/۱	۵/۱	۱۲/۱

شاخص‌های ارزیابی

در این تحقیق، برای ارزیابی عملکرد توزیع و تحویل آب از شاخص‌های کفایت[1] و راندمان[2] در تحویل آب (Molden and Gates, 1990) استفاده شد که به ترتیب عبارتند از:

$$MPA = \frac{1}{N}\sum_{N}\frac{1}{M}\sum_{M}(PA), \quad \begin{cases} PA = \dfrac{QD}{QR} & IF \quad QR > QD \\ PA = 1 & IF \quad 1 < \dfrac{QD}{QR} \end{cases} \qquad (۱)$$

$$MPF = \frac{1}{N}\sum_{N}\frac{1}{M}\sum_{M}(PE), \quad \begin{cases} PE = \dfrac{QR}{QD} & IF \quad QR < QD \\ PE = 1 & IF \quad \dfrac{QR}{QD} > 1 \end{cases} \qquad (۲)$$

$$MPD = \frac{1}{R}\sum_{R} CV_T\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \qquad (۳)$$

$$MPE = \frac{1}{T}\sum_{T} CV_R\left(\frac{Q_D}{Q_R}\right) \qquad (۴)$$

در روابط فوق MPA و MPF، به ترتیب شاخص‌های کفایت تحویل و راندمان تحویل می‌باشند. M تعداد آبگیرها، Q_R دبی مورد نیاز یا دبی درخواست شده در آبگیر M، QD دبی واقعی تحویل شده به آبگیر M و N تعداد گام‌های زمانی مناسب در یک دوره‌یِ تحویل است. همچنین MPD و MPE به ترتیب شاخص‌های پایداری تحویل و عدالت در تحویل می‌باشند. R تعداد آبگیرها، T تعداد گام‌های زمانی و CV ضریب تغییرات می‌باشد.

برای ارزیابی کنترل سطح آب نیز شاخص‌های خطای حداکثر مطلق[3] (MAE) و خطای مطلق تجمعی[4] (IAE) ارائه شده توسط ASCE (Clemmens et al., 1998) استفاده شد. شاخص خطای حداکثر مطلق برای اندازه‌گیری حداکثر انحراف سطح آب از عمق هدف ارائه شده است که به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$MAE = \frac{\max(|y_{t\arg et} - y|)}{y_{t\arg et}} \qquad (۵)$$

که در آن y سطح آب مشاهده شده یا محاسبه شده توسط مدل در گام زمانی محاسباتی T و $y_{t\arg et}$ عمق هدف می‌باشد. این شاخص منعکس‌کننده حداکثر انحرافی است که مدل در ثابت نگه‌داشتن سطح آب در عمق هدف داشته است و هرچه مقدار آن کمتر باشد نشان‌دهندهٔ عملکرد مطمئن‌تر سیستم در کنترل سطح آب است. شاخص خطای مطلق تجمعی نیز نشان‌دهنده میانگین انحرافات عمق آب از عمق هدف در طول دوره بهره‌برداری می‌باشد و به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$IAE = \frac{\frac{T}{D}\sum_{T=0}^{D}(|y_{t\arg et} - y|)}{y_{t\arg et}} \qquad (۶)$$

که در آن D طول دوره بهره‌برداری می‌باشد. برای محاسبه این شاخص باید گام زمانی محاسبات در طول دوره بهره‌برداری ثابت باشد. هرچه مقدار این شاخص کمتر باشد نشان‌دهندهٔ عملکرد مطمئن‌تر سیستم در کنترل سطح آب است.

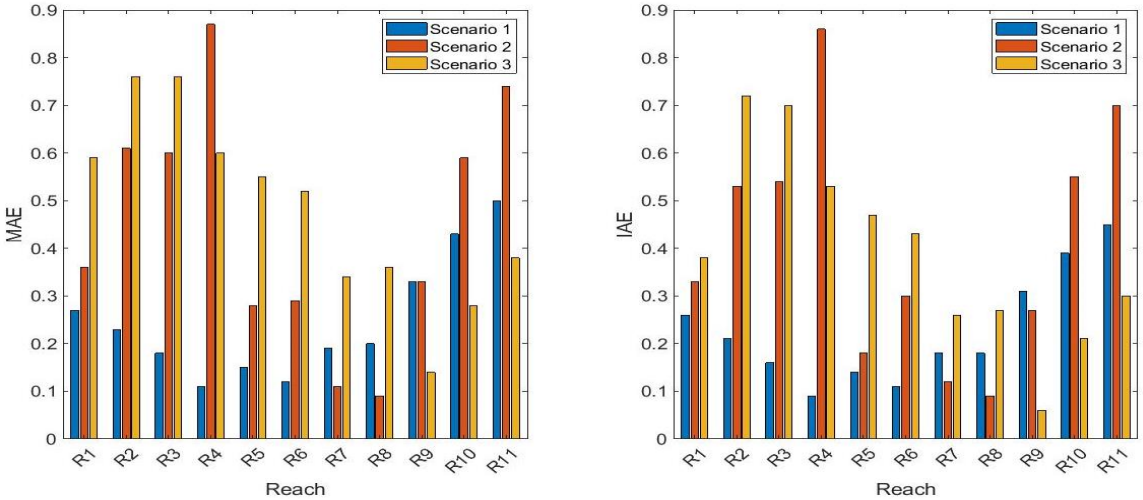
نتایج و بحث

در این تحقیق، سه سناریو جهت ارزیابی شب خاموشی در آبیاری و آبیاری متناسب با نیاز آبی مورد بررسی قرار

[1] Adequancy
[2] Efficiency
[3] Maximum Absolute Error
[4] Integral of Absolute Magnitude of Error

گرفت و با استفاده از شاخص‌های مختلف ارزیابی شد. لازم به ذکر است که در این تحقیق شبیه‌سازی سناریوهای مختلف با استفاده از مدل هیدرودینامیک ICSS انجام شد و از برنامه‌های بهینه‌ساز یا هوشمند جهت استخراج الگوهای بهره‌برداری استفاده نشده است. این در عمل مشابه حالتی است که یک بهره‌بردار با استفاده از تجربیات خود از بهره‌برداری، تنظیمات سازه‌ها را انجام دهد. یعنی برای دبی‌های مختلف مورد نیاز، حدود تنظیم سازه‌ها را بر اساس تجربه پیدا کرده است. در مدل شبیه‌ساز نیز این مقادیر با این تفاوت که کاربر ICSS بر اساس شبیه‌سازی گزینه‌های مختلف، تجربیات یک بهره‌بردار واقعی را بدست آورده است، مورد استفاده قرار گرفته است. در ارائه نتایج تحقیق با توجه به تعداد زیاد تنظیم سازه‌ها، از ارائه جداول مقدار بازشدگی سازه‌ها خودداری شده است و نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد بصورت نمودارهایی ارائه شده‌اند.

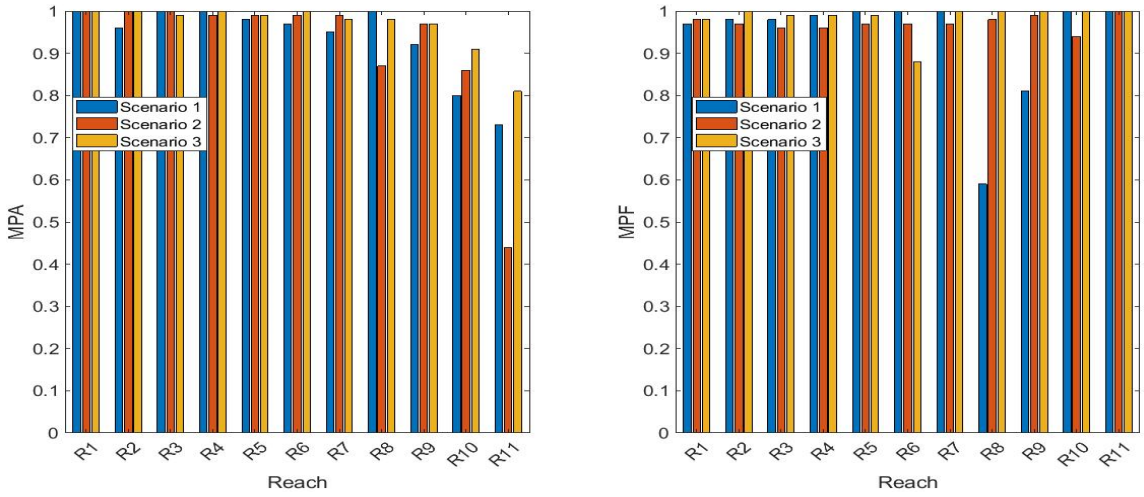
نتایج مقادیر شاخص‌های MAE و IAE برای سناریوهای مختلف شبیه‌سازی در شکل (۲) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر این شاخص‌ها در اکثر بازه‌ها با کاهش مدت زمان آبیاری و در نتیجه افزایش دبی، افزایش یافته و در سناریوی سه نسبت به سناریوی یک بیشتر شده است به‌طوریکه حدکثر مقدار MAE از ۰/۵ در سناریوی یک به ۰/۷۶ در سناریوی سه افزایش یافته است. این مقدار افزایش، قابل قبول قبول می‌باشد زیرا در شبکه‌های آبیاری، مقادیری بالاتر نیز مشاهده شده است که از تحقیق Savari et al. (2016) به عنوان نمونه می‌توان نام برد که در آن مقدار افزایش MAE تا ۲۰ درصد مشاهده شده است. دلیل تفاوت روند تغییرات در برخی بازه‌ها اینست که محدوده مناسب برای تغییرات عمق در بازه‌های مختلف برابر با ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است بدین معنی که اگر خطای حداکثر عمق کمتر از ۱۰ درصد باشد قابل قبول بوده و کنترل لازم صورت گرفته است و اینکه چقدر به صفر یا ۱۰ نزدیک‌تر باشد اهمیتی ندارد. لازم به توضیح است که مقدار دبی در سناریوی سه نسبت به سناریوی یک، به اندازه چهار برابر بیشتر است. در نتیجه، ناپایداری‌ها در آن بیشتر بوده و متعاقباً شاخص‌های عمق افزایش خواهد یافت. البته، با استفاده از مدل‌های بهینه‌ساز می‌توان مقدار تغییرات را کاهش داد که در تحقیقات بعدی، بررسی خواهد شد.



شکل (۲) مقادیر شاخص های عمق: خطای حداکثر مطلق (MAE) و میانگین خطا (IAE)

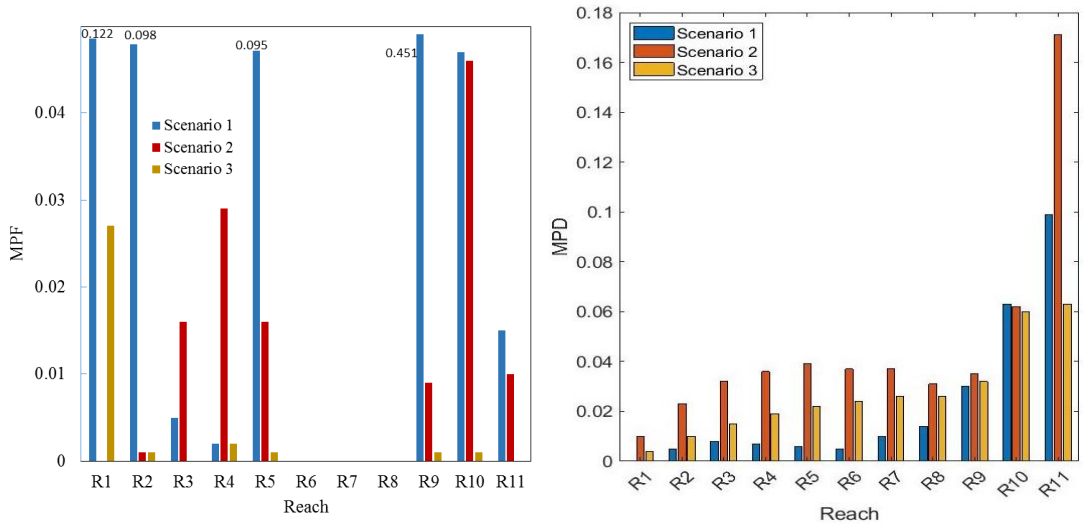
مقدار مطلوب شاخص‌های کفایت و راندمان برابر با ۱ می‌باشند و در شکل ۳، مقادیر این شاخص‌ها برای سناریوهای مورد مطالعه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود جز در یک مورد خاص در بازه شماره ۸ برای شاخص راندمان و در بازه شماره ۱۱ برای شاخص کفایت، در بقیه بازه‌ها مقادیر نزدیک به یک می‌باشد. مشاهده روند کلی شاخص کفایت نشان می‌دهد که کمبودها در همه سناریوها در بازه‌های پائین‌تر کانال اتفاق می‌افتد و در بازه‌های بالاتر، کمبود قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود که این یکی از ویژگی‌های سیستم‌های کنترل از

بالادست می‌باشد. امروزه با استفاده از روش‌های مدرن کنترلی و هوشمند می‌توان مقادیر کمبود آب را بصورت مساوی بین همه بازه‌ها تقسیم نمود. با این حال و با ملاحظه نتایج تحقیق مشاهده می‌شود که روش‌های تحویل ۱۲ ساعته و ۶ ساعته عملکرد بهتری نسبت به روش مرسوم تحویل دارند و لذا می‌توان برنامه شب‌خاموشی و برنامه متناسب با نیاز آبی را در کانال عقیلی شرقی توصیه نمود.



شکل (۳) مقادیر شاخص‌های دبی: راندمان (MPF) و کفایت (MPA)

مقدار شاخص‌های عدالت و پایداری در بازه‌های مختلف در شکل (۴) و در کل کانال در جدول (۳) نشان داده شده است. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود عدالت در سناریوهای ۲۴، ۱۲ و ۶ ساعته به ترتیب برابر با ۰/۰۲۴، ۰/۰۱۲ و ۰/۰۰۳ بدست آمده است و نشان می‌دهد که سناریوی ۱۲ و ۶ ساعته بهتر از ۲۴ ساعته است. در مورد پایداری نیز مقادیر شاخص‌ها نزدیک به صفر می‌باشند. هر چقدر مقادیر شاخص‌های عدالت و پایداری به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد سیستم بهتر خواهد بود.



شکل (۴) مقادیر شاخص‌های دبی: پایداری (MPD) و عدالت (MPE) در بازه‌های مختلف

جدول (۳) مقادیر شاخص‌های دبی: پایداری (MPD) و عدالت (MPE) در کل کانال

	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
شاخص پایداری	۰/۰۲۲	۰/۰۴۷	۰/۰۲۷
شاخص عدالت	۰/۰۲۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۳

در جدولی که توسط Molden and Gates (1990) ارائه شده است، مقادیر عملکرد بر اساس مقدار شاخص‌های کفایت و راندمان به عملکرد "خوب، مناسب و ضعیف" تقسیم‌بندی شده‌اند. لذا بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، مقدار شاخص کفایت در بازه‌های ۱ تا ۷، در محدوده عملکردی خوب قرار دارد زیرا در تمام سناریوها مقدار این شاخص بزرگتر از ۰/۹ می‌باشد و فقط در بازه‌های ۱۰ و ۱۱، کفایت تحویل ضعیف می‌باشد زیرا مقدار شاخص کمتر از ۰/۸ می باشد. در نتیجه به طور کلی می‌توان گفت که سناریوهای ۱۲ و ۶ ساعته دارای عملکرد خوبی می‌باشند. در مورد شاخص راندمان، در همه بازه‌ها غیر از بازه‌های ۸ و ۹، مقدار راندمان بالای ۰/۸۵ تا ۱ می‌باشد که نشانگر عملکرد خوب از نظر شاخص راندمان می‌باشد.

نکته مهمی که در اینجا باید به آن اشاره نمود اینست که تنظیم سازه‌ها نقش مهمی در مقدار این شاخص‌ها دارند. به عنوان مثال در منحنی راندمان، در بازه شماره ۸ مقدار راندمان در سناریوی مرسوم کمتر از دو سناریوی دیگر می‌باشد که شاید در نگاه اول، غیرطبیعی به نظر برسد، اما با توجه به دلیل فوق این مطلب توجیه می‌گردد و در کلیات و نتایج تحقیق تاثیرگذار نمی‌باشد. زیرا هدف از این تحقیق، ارزیابی سناریوهای شب‌خاموشی و متناسب با نیاز آبی است که نتیجه ارزیابی ها نیز مثبت می‌باشد و می‌توان پیاده‌سازی آن را در کانال عقیلی شرقی از نظر فنی پیشنهاد داد. هر چند که سایر عوامل دخیل از جمله مسائل اجتماعی و ... نیز در این خصوص باید مورد توجه قرار گیرد.

در تحقیق منتظر و پاشازاده (۱۳۹۰) که مشابه با تحقیق حاضر بوده و عملیات بهره‌برداری بصورت ۱۲ ساعته (شب‌خاموشی) در کانال دز انجام گرفته و با نتایج ۲۴ ساعته مقایسه شده است مقدار شاخص‌های راندمان، کفایت، پایداری و عدالت در شرایط مرسوم (۲۴ ساعته) به ترتیب ۰/۶۹۲، ۰/۹۸۱، ۰/۰۰۶ و ۰/۰۲۸ بوده که در حالت استفاده از روش شب‌خاموشی به ترتیب ۰/۷۲۱، ۰/۹۸۵، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۳ بدست آمده است که نشانگر بهبود راندمان، کفایت و پایداری می‌باشد هر چند که مقدار شاخص عدالت حدود ۷ درصد افزایش یافته است و از مقدار مطلوب دور شده است. در این تحقیق نیز، مقدار شاخص راندمان از ۰/۹۳۸ در شرایط ۲۴ ساعته به ۰/۹۷۲ در بهره‌برداری ۱۲ ساعته؛ شاخص کفایت از ۰/۹۳۷ به ۰/۹۱۸، شاخص پایداری از ۰/۰۲۲ به ۰/۰۴۷ و شاخص عدالت از ۰/۰۲۴ به ۰/۰۱۲ رسیده است. همانطور که مشاهده می‌شود شاخص‌های راندمان و عدالت بهبود یافته ولی در شاخص‌های کفایت و پایداری بهبودی مشاهده نمی‌شود. بنابراین، نتایج حاصل با نتایج منتظر و پاشازاده (۱۳۹۰) دارای رفتارهای تقریبا مشابهی هستند و در برخی شاخص‌ها بهبود حاصل شده است.

لازم به ذکر است که نتیجه‌گیری بیان شده از این تحقیق قابل تعمیم به سایر کانال‌ها نمی باشد زیرا هر کانال دارای شرایط متفاوتی بوده و می‌بایست بصورت مجزا مورد ارزیابی و شبیه‌سازی قرار گیرد. یکی از مهمترین محدودیت‌هایی که وجود دارد اینست که ظرفیت سازه‌ها جهت افزایش دبی، که با کاهش مدت زمان آبیاری حادث می‌شود، ممکن است محدود باشد و نتوان از یک حد مشخصی مقدار دبی را در کانال و سازه‌ها، افزایش داد که البته این موضوع باید در زمان طراحی سناریوها پیش از ارزیابی مورد بررسی قرار بگیرند. لازم به ذکر است که در این تحقیق، نکته فق مورد توجه قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سناریوی شب‌خاموشی آبیاری متناسب با نیز آبی با توجه به محدودیت‌های منابع آبی بوجود آمده و رفاه‌طلبی کشاورزان که باعث شده است تمایل چندانی به آبیاری شبانه نداشته باشند، مورد بررسی قرار گرفت و با سناریوی مرسوم مقایسه شد. عملیات تنظیم سازه‌ها در مدل هیدرودینامیکی ICSS مورد استفاده، بصورت دستی انجام شد. نتایج ارزیابی نشان داد که با وجود کاهش مدت زمان آبیاری و افزایش دبی‌ها، مقدار

شاخص‌های عمق شامل MAE و IAE قابل قبول می‌باشند و در مورد شاخص‌های راندمان و کفایت نیز، در اکثر بازه‌ها مقدار این شاخص‌ها بزرگتر از ۰/۹ است که نزدیک به مقدار مطلوب، یعنی یک، می‌باشد. هر چند که مقادیر کمتر نیز در این تحقیق مشاهده شد که در واقعیت نیز وجود دارد. با این حال، به علت افزایش دبی با کاهش مدت زمان آبیاری، مقدار شاخص‌های عمق افزایش می‌یابد که در مورد MAE و IAE کاملا مشخص است که در سناریوهای ۱۲ و ۶ ساعته، نسبت به سناریوی مرسوم تغییرات محسوسی دارند. در مورد شاخص‌های MPE و MPD مقادیر نزدیک به مقدار مطلوب یعنی صفر می‌باشد که بیانگر توزیع آب با عدالت و پایداری بسیار خوب در کانال می‌باشد. به‌طوریکه مقدار شاخص عدالت به ۰/۰۰۳ نیز رسیده است. در یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج ارزیابی آبیاری شب‌خاموشی در کانال عقیلی شرقی مثبت می‌باشد بدین معنی که می‌توان آن را توصیه و اجرا نمود. هر چند که ملاحظات فیزیکی و هیدرولیکی باید مورد توجه قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود که این رویکرد با استفاده از یک مدل بهینه‌ساز نیز مطالعه شود تا نتایج آن در حالت بهینه مشخص شود که قطعا دید بهتری را پیش روی محققین و مهندسین ایجاد خواهد کرد.

منابع

منتظر، ع. ا و پاشازاده، . (۱۳۹۰). ارزیابی عملکرد توزیع آب در شرایط مختلف بهره برداری کانال اصلی غرب شبکه آبیاری دز با استفاده از مدل هیدرولیکCANALMAN ، مجله آب و خاک، ۲۵(۱): ۱۲۵-۱۳۹.

Bhadra, A., Bandyopadhyay, A., Singh R. and Raghuwanshi, N.S. 2009. Integrated Reservoir-Based Canal Irrigation Model I: Description. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135(2):149–157.

Burt, C. M. 2011. "The Irrigation Sector Shift from Construction to Modernization: What is required for Success?" 8th N.D. Gulhati Memorial Lecture for International Cooperation in Irrigation and Drainage. pp. 7-22.

Clemmens A.J. 1998. Improving irrigated agriculture performance through an understanding of the water delivery process. J. Irrig. Drain. Eng, 55: 223-234.

Fatemeh, O., Hesam, G., and Shahverdi, K. 2020. Comparing Fuzzy SARSA Learning (FSL) and Ant Colony Optimization (ACO) Algorithms in Water Delivery Scheduling under Water Shortage Conditions. Irrigation and Drainage Engineering.

Molden, D.J.; Gates, T.K. Performance Measures for Evaluation of Irrigation-Water-Delivery Systems. J. Irrig. Drain. Eng. 1990, 116, 804–823.

Montazar Manager, A.A. and Pashazadeh, N. 2011. Performance Assessment of West Main Canal of Dez in the Different Water Operational Scenarios Using CANALMAN Model, Journal of water and soil, 25(1), 125.

Savari, H., Monem, M. 2021. Analysis and Classification of Arranged Delivery Methods in Irrigation Networks. *Water and Irrigation Management*, 11(2), 145-158. doi: 10.22059/jwim.2021.311437.828

Savari, H., Monem, M., and Shahverdi, K. 2016. Comparing the Performance of FSL and Traditional Operation Methods for On-Request Water Delivery in the Aghili Network, Iran. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 142(11), 04016055.

Karimi, F., Monem, M., Hashemy Shahdany, S. 2018. Classifying Iranian Irrigation Networks Based on Regulating Structures Problems and Proposing a Common Solution to Enhance Their Performance. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(5), 1292-1303.

Shahverdi, K., and Monem, M. J. 2012. Construction and evaluation of the bival automatic control system for irrigation canals in a laboratory flume. Irrigation and drainage, 61(2), 201-207.

Shahverdi, K., and Monem, M. J. 2015. Application of reinforcement learning algorithm for automation of canal structures. Irrigation and drainage, 64(1), 77-84.

Shahverdi, K., Monem, M. J., and Nili, M. 2016. Fuzzy SARSA learning of operational instructions to schedule water distribution and delivery. Irrigation and Drainage, 65(3), 276-284.

Shahverdi, K., Maestre, J., Alamiyan-Harandi, F., and Tian, X. 2020. Generalizing Fuzzy SARSA Learning for Real-Time Operation of Irrigation Canals. Water, 12(9), 2407.

Smith, M., L. S. Pereira, J. Berengena, B. Itier, J. Goussard, L. Tollefson and P. Van Hofwegen 1997. "Irrigation scheduling: From theory to Practice."