Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Scheduling and optimal delivery of water in irrigation networks by combining the AquaCrop model and genetic algorithm

Parisa Kahkhamoghaddam[1], Ali Naghi Ziaei[2*], Kamran Davary[3], Amin Kanooni[4], Sedigheh Sadeghi[5]

[1] Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[3] Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
[4] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
[5] Ph.D. Student, Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Extended Abstract

Introduction

Delivery discharge to each outlet, the number of outlets grouped in a block, and the sequence of water delivery to the outlets are the three main components of water delivery in irrigation networks. Therefore, scheduling the distribution and delivery of water in the network means a determination of these three components. In this research, an optimal water delivery model was developed. The proposed approach was applied to the M canal of the Moghan Irrigation Network of Iran. By choosing a certain number of blocks, the outlets located in the distribution canal are distributed inside each block in such a way that all the outlets are placed inside the blocks and no block is left without outlets. In the following, the way of scheduling water delivery to each of the outlets located in each block and the flow rate delivered to them is such that the flow rate of the canal, the time required to complete the irrigation scheduling, and also the difference in the volume of water delivered to each outlet are minimized. The limitations of the model are: a) the total flow entering the outlets that collect water at the same time should not exceed the capacity of the canal. b) the total water intake time of the outlets inside each block should not exceed the irrigation interval. In this research, the allocation of water and the cultivated area in the optimal water allocation model, which is linked to the crop model, were used to optimize water delivery.

Materials and Methods

Delivery discharge to each outlet, the number of outlets grouped in a block, and the sequence of water delivery to the outlets are the three main components of water delivery in irrigation networks. Therefore, scheduling the distribution and delivery of water in the network means the determination of these three components. In this research, an optimal water delivery model was developed. The proposed approach was applied to the Canal M of the Moghan Irrigation Network of Iran. By choosing a certain number of blocks, the outlets located in the distribution canal are distributed inside each block in such a way that all the outlets are placed inside the blocks and no block is left without outlets. In the following, the way of scheduling water delivery to each of the outlets located in each block and the flow rate delivered to them is such that the flow rate of the canal, the time required to complete the irrigation scheduling,g and also the difference in the volume of water delivered to each outlet are minimized. The limitations of the model are: a) the total flow entering the outlets that collect water at the same time should not exceed the capacity of the canal. b) the total water intake time of the outlets inside each block should not exceed the irrigation interval. In this research, the allocation of water and the cultivated area in the optimal water allocation model, which is linked to the crop model, were used to optimize water delivery.

Results and Discussion

By using the volume of water allocated to each crop and cultivated area, the water demand for each outlet in different time steps was obtained. Following determining the water demand of each outlet and also by knowing the physical characteristics of the canal, optimal water delivery modeling was done in the canal for each time step by using the optimal water delivery model and genetic algorithm. Water delivery factors are presented for the 17th

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

time step (peak demand period). The results show that the optimal flow does not exceed the minimum and maximum flow of each off-take. Also, the shorter total duration of the exploitation process than the irrigation interval indicates compliance with the relevant condition in the model. The hydrograph of the inflow into Canal M showed that the maximum flow of the inflow into the canal is less than the capacity of the canal, which indicates compliance with the relevant condition in the model. The hydrograph of the inflow to the canal provides the number of settings of the main off-take of the distribution canal. During the completion of the water delivery program, the main off-take of the distribution canal, which receives water from the main Canal A, is adjusted a total of 23 times by the network operator.

Conclusion

In this research, the optimization model of water distribution and delivery in distribution canals was developed using a genetic algorithm in MATLAB software. With the aim of optimal allocation and delivery of water at different levels of the irrigation network and by combining the crop model, the results and output of the models were combined with each other so that the results of optimal water scheduling are more appropriate with the real conditions and water requirements of the network. For the canal in the peak demand period, the maximum and minimum canal capacity were calculated to be 2.573 and 0.590 $m^3.s^{-1}$, respectively, the maximum time to complete the irrigation program was 232 h, and the number of settings of the main off-take was calculated as 23 settings. The obtained results indicate that the developed models are useful for scheduling the optimal allocation and delivery of water and with its help different goals can be optimized simultaneously.

Keywords: Blocking of outlets, Distribution canal, MATLAB software, Inflow hydrograph

Article Type: Research Article

Acknowledgment

This research has been done in the form of a doctoral thesis. The authors express their gratitude to the Ardabil Province Agricultural Jihad Organization and the Moghan Irrigation Network Operating Company for facilitating the conduct of this research.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Parisa Kahkhamoghaddam: Writing-original draft preparation; **Ali Naghi Ziaei**: Resources, software, manuscript editing; **Kamran Davary**: Formal analysis and investigation; **Amin Kanooni**: Visualization, supervision; **Sedigheh Sadeghi**: Conceptualization, methodology.

*Corresponding Author, E-mail: an-ziaei@um.ac.ir

Citation: Kahkhamoghadam, P., Naghi Ziaei, A., Davary, K., Kanooni, A., & Sadeghi, S. (2024). Scheduling and optimal delivery of water in irrigation networks by combining the AquaCrop model and genetic algorithm. *Water and Soil Management and Modeling, 4(4),* 255-268.
DOI: 10.22098/mmws.2023.14039.1382

Received: 14 November 2023., Received in revised form: 17 December 2023, Accepted: 17 December 2023., Published online: 17 December 2023
Water and Soil Management and Modeling, Year 2024, Vol. 4, No. 4, pp. 255-268
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

برنامه‌ریزی و تحویل بهینهٔ آب در شبکه‌های آبیاری با ترکیب مدل AquaCrop و الگوریتم ژنتیک

پریسا کهخامقدم[۱]، علی‌نقی ضیائی[۲*]، کامران داوری[۳]، امین کانونی[۴]، صدیقه صادقی[۵]

[۱] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۲] دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۳] استاد، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
[۴] دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
[۵] دانشجوی دکتری، گروه ریاضی کاربردی، دانشکدهٔ علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در کانال‌های توزیع می‌تواند تلفات ناشی از نشت آب در شبکه‌های آبیاری را کاهش داده و راندمان آبیاری را بهبود بخشد. مدل گیاهی AquaCrop به‌دلیل شناسایی پارامترهای محدودکنندهٔ تولید و ملحوظ نمودن فیزیولوژیک گیاهی جایگزینی مناسب برای توابع تولید تجربی در برنامه‌ریزی بهینهٔ آبیاری محسوب می‌شود. در این مطالعه، مدل برنامه‌ریزی تحویل آب در سطح کانال با مدل تخصیص بهینهٔ آب در سطح واحدهای زراعی که با مدل گیاهی پیوند زده شده، توسعه داده شد. در این مدل از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی توزیع و تحویل آب به‌گونه‌ای استفاده شد که دبی کانال، زمان مورد نیاز جهت تکمیل برنامهٔ آبیاری و اختلاف حجم آب تحویلی مورد نیاز به هر انشعاب حداقل شود. مدل تهیهٔ شده برای کانال توزیع M از شبکهٔ آبیاری مغان که دارای ۴۵ انشعاب است مورد استفاده قرار گرفت. نتایج توزیع و تحویل بهینهٔ آب نشان داد که انشعابات در ۳۳ بلوک مختلف توزیع شده است، هم‌چنین، زمان پایان عملیات بهره‌برداری ۲۳۲ ساعت از شروع برنامهٔ بهره‌برداری و حداکثر و حداقل دبی جریان ورودی به‌ترتیب ۲/۵۷۳ و ۰/۵۹۰ مترمکعب بر ثانیه است که نشان از رعایت قیود مربوطه در مدل تحویل بهینه است. لذا اجرای مدل‌های تهیه شده در ترکیب با مدل گیاهی قادر خواهد بود تا برنامهٔ عملیات بهره‌برداری کاملی را جهت تخصیص و تحویل آب در سطوح مختلف آبیاری در اختیار بهره‌برداران قرار داده و به‌عنوان ابزاری مفید در برنامه‌ریزی شبکه‌های آبیاری در تمام سطوح به‌کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: بلوک‌بندی انشعابات، کانال توزیع، نرم‌افزار متلب، هیدروگراف جریان ورودی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: an-ziaei@um.ac.ir

استناد: کهخامقدم، پریسا، نقی‌ضیایی، علی، داوری، کامران، کانونی، امین، و صادقی، صدیقه (۱۴۰۳). برنامه‌ریزی و تحویل بهینهٔ آب در شبکه‌های آبیاری با ترکیب مدل و الگوریتم ژنتیک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۴)، ۲۵۵-۲۶۸.
DOI: 10.22098/mmws.2023.14039.1382.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶، تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۲۶
مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۳، دوره ۴، شماره ۴، صفحه ۲۵۵ تا ۲۶۸
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

جمعیت جهان روز به روز در حال افزایش است و انتظار می‌رود در سال ۲۰۵۰ به ۹/۷ میلیارد و تا سال ۲۱۰۰ به ۱۱/۲ میلیارد نفر برسد (Liu et al., 2018). از طرفی کشاورزی فاریاب دارای سابقهٔ طولانی بوده و نقش مهمی در حفظ ثبات و امنیت غذایی در سطح جهان ایفا می‌کند (Edwards and Nehra, 2020). بنابراین، تخصیص معقول منابع آب برای برآوردن نیاز آبی محصولات کشاورزی با حداکثر بهره‌وری آب و در نظر گرفتن محدودیت منابع آب ضروری است (Miglietta et al., 2018). برای این‌که شبکهٔ آبیاری عملکرد صحیحی داشته باشد، باید تلفات انتقال و توزیع آب در کانال‌ها کاهش یابد. علاوه‌بر آن تخصیص آب به واحدهای زراعی نیز متناسب با نیاز آبی محصولات باشد، در غیر این صورت ممکن است باعث کاهش تولید در اثر کمبود آب شده و یا به‌دلیل عدم رعایت توزیع مناسب آب، نارضایتی بهره‌برداران را به‌دنبال داشته باشد. از سویی دیگر، برنامه‌ریزی توزیع آب در کانال‌های آبیاری اغلب مبتنی بر قضاوت کارشناسی بوده است. بنابراین، یکی از عوامل مؤثر بر عملکرد ضعیف کانال‌های آبیاری عدم برنامه‌ریزی مناسب تحویل آب در کانال‌های توزیع و ضعف روش‌های سنتی و تجربی است. از این رو، استفادهٔ بهینه از آب آبیاری برای تأمین امنیت غذایی بسیار مهم است و هم‌چنان نیز مهم باقی خواهد ماند (Bowmer and Meyer, 2014; Das et al., 2015).

از الگوریتم‌های مختلفی برای بهینه‌سازی موضوعات مرتبط در کشاورزی استفاده می‌شود (Osroosh et al., 2016)، که از این میان الگوریتم‌های قطعی و الگوریتم‌های احتمالی از دسته الگوریتم‌های مورد قبول در این‌گونه مسائل می‌باشند. الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک که فرآیندی مشابه موجودات زنده در طبیعت را شبیه‌سازی می‌کنند، راه‌حل‌های بهینهٔ مناسب‌تری را تولید می‌کنند (Villacampa et al., 2019). Khashei Siuki et al. (2024) از الگوریتم تفاضلی برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک استفاده نمودند و اظهار داشتند که الگوریتم‌های فرابتکاری می‌تواند یک گزینه مناسب در حل مدل‌های هیدرولیکی خاک باشد.

در مطالعات پیشین، محققان از الگوریتم ژنتیک برای یافتن کم‌ترین مقدار آب مورد نیاز گیاهان، برنامه‌ریزی آبیاری با در نظر گرفتن داده‌های بارندگی، طراحی مدل‌های تصمیم‌گیری تخصیص آب آبیاری و برنامه‌ریزی آب آبیاری استفاده و نتایج رضایت بخشی را نیز ارائه نموده‌اند (Kanooni and Monem, 2014; Chen et al., 2019; Polinova et al., 2019; Shen et al., 2021). Hosseinzade Kuhi et al. (2024) از الگوریتم ژنتیک نیز به‌عنوان ابزاری جهت بهینه کردن طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری استفاده نمودند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که بازطراحی بهینه می‌تواند علاوه‌بر رفع مشکلات شبکه در وضع موجود، توانایی سامانه را نیز در برابر تهدیدات تغییر اقلیم آینده بالا برد.

در سال‌های اخیر بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری با استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی مانند AquaCrop به‌جای استخراج توابع تولید تجربی توسعه یافته است (Kheir et al., 2021; Martínez-Romero et al., 2021). مدل‌های شبیه‌ساز مورد استفاده در برنامه‌های آبیاری، امکان بررسی و پیش‌بینی رفتار سامانه در مواجهه با انواع متغیرها را فراهم می‌کنند و با صرفه جویی در هزینه‌ها، تصمیمات مناسب‌تری را ارائه می‌دهند (Bastiaanssen et al., 2007).

در ادامه به شرح مختصری از مطالعات صورت گرفته در خصوص تخصیص بهینهٔ آب در سطح واحدهای زراعی و توزیع و تحویل بهینهٔ آب در سطح کانال‌های توزیع پرداخته می‌شود. در زمینهٔ تخصیص و توزیع آب مطالعات زیادی از دیدگاه‌های مختلف مانند تخصیص و توزیع بهینهٔ آب به یک یا چند محصول در طول یک فصل رشد، مساحت زیرکشت بهینهٔ هر محصول، تعیین الگوی کشت بهینه و غیره انجام پذیرفته است (Brown et al., 2010; Rabie et al., 2016; Rath et al., 2018). در این مطالعات از توابع تولید تجربی برای ارزیابی پاسخ عملکرد گیاه به آب استفاده شده است. هم‌چنین، از مدل AquaCrop برای استخراج توابع تولید محصولات استفاده شد و یا مدل مذکور برای بهینه‌سازی برنامهٔ آبیاری با مدل بهینه‌ساز پیوند داده شده است و به این طریق آب مصرفی محصولات بهینهٔ شد (García-Vilaa and Fereresa, 2012; Guo et al., 2021). بهینه‌سازی یکی از روش‌هایی است که در تعیین عوامل تحویل آب در شبکه‌های آبیاری نیز استفاده می‌شود. در این راستا، Wardlaw and Bhaktikul (2004) در هند از روش الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی عوامل تحویل آب در کانال توزیع استفاده کردند. در این مطالعه با هدف حداقل کردن ظرفیت کانال، رابطهٔ بیلان آب و خاک برای ایجاد تقاضای آب و برقراری عدالت در تحویل آب در انشعابات مختلف کانال توزیع استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک ابزاری مفید برای زمان‌بندی آب در سامانه‌های پیچیده است. هم‌چنین، این رویکرد با اعمال محدودیت‌های مربوط به ظرفیت کانال قادر به حل مشکلات مربوط به زمان‌بندی آبیاری تحت شرایط کمبود آب نیز است. در پژوهشی، Monem et al. (2007) با استفاده از الگوریتم ژنتیک به برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در کانال توزیع در شبکهٔ آبیاری فومنات پرداخته و برای گزینه‌های مختلف، برنامهٔ بهینهٔ آب را ارائه نمودند. ایشان اظهار داشتند که مدل توسعه یافته توانایی مناسبی در برنامه‌ریزی تحویل بهینه آب در شبکه‌های آبیاری دارد.

از سایر پژوهش‌ها، Oad et al. (2009) مدل سامانهٔ پشتیبان تصمیم‌گیر جهت برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب را توسعه دادند. به منظور بررسی عملکرد مدل در یک دوره سه ساله رطوبت خاک،

نوع محصول، سطح زیرکشت و نیاز آبی محاسبه و تعیین شد. در این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی خطی و با هدف به‌حداقل رساندن دبی جریان، برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در شبکهٔ آبیاری به نحو مطلوبی صورت پذیرفت. در پژوهش دیگری، Liu et al. (2018) یک مدل زمان‌بندی تحویل آب کانال بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[1] (PSO) را پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در سامانه‌های آبیاری را ارائه دهد. در مقایسه با روش‌های تجربی، الگوریتم پیشنهادی تلفات نشت آب تحویلی در دو کانال مورد پژوهش را کاهش داد. ایشان بیان داشتند که الگوریتم بهینه‌ساز پیشنهادی می‌تواند برنامه‌های عملی و کارآمد تحویل آب در سطح کانال توزیع را فراهم کند. هم‌چنین، Pardo et al. (2022) الگوریتم قطعی با زمان محاسباتی کم را برای شبکهٔ آبیاری تحت فشار دانشگاه آلیکانته اسپانیا توسعه دادند. با استفاده از الگوریتم پیشنهادی مدیران و بهره‌برداران شبکه قادر بودند تا زمان تحویل آب را به‌طور کامل با نیازهای خود تطبیق دهند. برنامهٔ ارائه شده قادر است تا راهبرد مناسبی جهت برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب با جریان ثابت را برای به حداقل رساندن مصرف انرژی ارائه دهد. این تکنیک ارائه شده رویکردهای قبلی را نیز بهبود بخشید. در در نهایت، Zhang et al. (2022) در چین مدل بهینه‌ساز را با هدف به‌حداقل رساندن تفاوت بین زمان تحویل آب و تقاضای آب و نوسانات تخلیهٔ کانال اصلی برای یک سامانهٔ کانال توسعه دادند. در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده شد. نتایج نشان داد که برنامه‌ریزی بهینه می‌تواند در تولید بیش‌تر، تلفات آب کم‌تر، راندمان مصرف آب بالاتر و بهره‌وری آب بیش تر مؤثر باشد. آن‌ها بیان کردند که مدل بهینه‌ساز پیشنهادی ابزاری ارزشمند جهت برنامه‌ریزی تحویل آب آبیاری در منطقهٔ مورد مطالعه بوده و باعث افزایش میزان بهره‌وری مصرف آب می‌شود.

تخصیص آب به گیاهان مختلف بایستی با توجه به محدودیت‌های کانال توزیع انجام شود. هم‌چنین، برنامه‌ریزی تحویل آب در کانال‌های توزیع نیز بایستی بر اساس خصوصیات محصولات کشت شده در واحدهای زراعی انجام پذیرد. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در برنامه‌ریزی بهینهٔ آب در شبکه‌های آبیاری که سامانهٔ متصل و مدام از کانال‌های آبیاری و اراضی زراعی می‌باشند ارتباطی بین آن‌ها وجود نداشته و در اکثر پژوهش‌ها موضوع تخصیص و تحویل آب به‌صورت جداگانه مورد بررسی و پژوهش قرار گرفته است. در اندک موارد که ارتباط بین این دو را مورد بررسی قرار داده‌اند از توابع تجربی جهت تعیین واکنش عملکرد محصولات مختلف به آب استفاده نموده‌اند (Kanooni and Monem, 2014). با توجه به این‌که شبکهٔ آبیاری شامل همهٔ موارد مذکور است لذا، هر دو عامل واحدهای زراعی و کانال‌های توزیع بایستی به‌صورت توأم در نظر گرفته شوند. هم‌چنین، جهت ارزیابی پاسخ عملکرد گیاه به آب به‌جای توابع تولید تجربی از مدل‌های گیاهی قدرتمند مانند AquaCrop استفاده شود. در این راستا، Kahkhamoghadam et al. (2023) تخصیص بهینهٔ آب و زمین بر مبنای الگوریتم ژنتیک و مدل گیاهی AquaCrop را مورد بررسی قرار دادند. این پژوهش برای پنج گیاه زراعی مهم دشت مغان و با هدف بیشینه‌سازی سود اقتصادی صورت پذیرفت و جهت اجراهای متوالی و پیوند مدل AquaCrop به برنامهٔ بهینه‌ساز، از برنامهٔ plug-in استفاده شد. در پژوهش مذکور مدیریت تخصیص آب و زمین در شبکهٔ مورد بررسی بهبود یافت اما به شکاف ارتباط بین مسئله تخصیص بهینهٔ آب به گیاهان و تحویل بهینهٔ آب در شبکهٔ کانال‌های توزیع پرداخته نشد. لذا، پر کردن این شکاف و رسیدن به برنامه‌ریزی بهینهٔ تخصیص و تحویل آب، مرتبط ساختن این دو در ترکیب با مدل گیاهی AquaCrop از اهداف مطالعه حاضر بوده است. این پژوهش با هدف برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در کانال‌های توزیع بر مبنای نیاز آبی واحدهای زراعی که خود مستخرج از مدل گیاهی AquaCrop است و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، انجام گرفته است. کارایی مدل‌های توسعه یافته، در اراضی تحت پوشش شبکهٔ آبیاری مغان مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

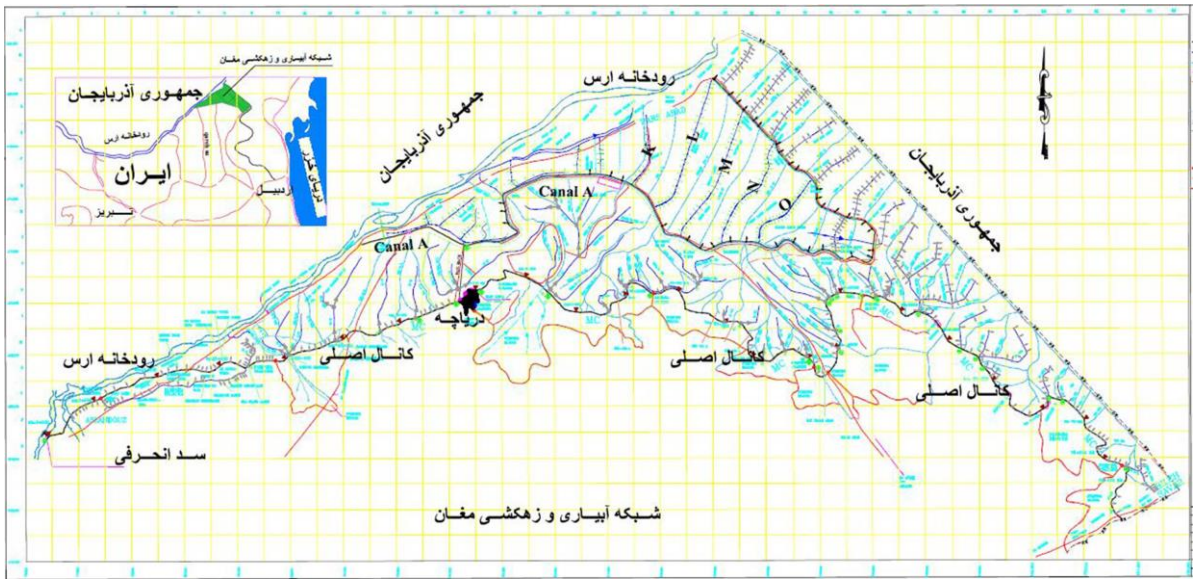
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

دشت مغان در حد فاصل طول جغرافیایی شرقی ۴۷ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض جغرافیایی شمالی ۳۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه واقع در شمال غرب ایران است. شبکهٔ آبیاری و زهکشی مغان با بهره‌برداری از منابع آب رودخانهٔ ارس و به‌منظور آبیاری ۷۲ هزار هکتار از اراضی دشت مغان احداث شده است. ناحیهٔ مورد مطالعه در این پژوهش، در منطقهٔ آبیاری پارس‌آباد قرار دارد. کانال A، کانال اصلی این منطقه است که ۲۱۸۴۰ هکتار از اراضی دشت مغان را شامل می‌شود. این کانال در محل سه‌پل با دبی ۲۴ مترمکعب در ثانیه تغذیه می‌شود و در امتداد غرب به شرق زمین‌های تحت پوشش خود را آبیاری می‌کند و بعد از طی مسافت ۳۹ کیلومتر، در جهت جنوب‌شرق به شمال‌غرب تغییر مسیر داده و با طول ۲۲ کیلومتر با نام کانال A برگشتی ادامه می‌یابد. کانال M که از کانال A

[1] Particle swarm optimization

منشعب می‌شود با سطح تحت پوشش حدود ۲۰۰۰ هکتار، ظرفیت حدود سه مترمکعب بر ثانیه و ۴۵ انشعاب در این پژوهش به‌عنوان واحد تحلیل آبیاری، در نظر گرفته شده است (شکل ۱). در سال زراعی ۹۹-۹۸ محصولات عمده کشت شده در کانال M، گندم، ذرت دانه‌ای (کشت اول و دوم)، سویا و یونجه بوده است. اطلاعات مربوط به محصولات کشت شده، خاک و سایر اطلاعات محلی از سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل دریافت شد (Kahkhamoghadam et al., 2023). مشخصات انشعابات کانال M شامل موقعیت، تعداد زارعین، مساحت تحت پوشش و ظرفیت هر کدام از شرکت بهره‌برداری شبکهٔ آبیاری و زهکشی مغان تهیه شد.



شکل ۱- موقعیت شبکهٔ آبیاری مغان

Figure 1- Location of Moghan irrigation network

۲-۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های فراکاوشی در مسائل بهینه‌سازی است که با تولید تصادفی جمعیت اولیه یا همان جمعیتی از جواب‌های ممکن آغاز می‌شود. تولید تصادفی جمعیت اولیه از طریق تشکیل ساختار کروموزومی که خود از یک‌سری ژن تشکیل شده است، انجام می‌شود. تعداد متغیرهای تصمیم و طریقه کدگذاری آن‌ها، عوامل تعیین‌کنندهٔ طول هر کروموزوم در مسائل بهینه‌سازی هستند. بعد از تولید تصادفی جمعیت اولیه و محاسبهٔ کیفیت پاسخ‌ها با استفاده از تابع ارزیابی، افراد (والد) مناسب جهت تشکیل نسل بعدی انتخاب می‌شود. با تغییر ساختار رشته‌ها توسط عملگرهای الگوریتم ژنتیک، کروموزوم‌ها یا همان جواب‌های جدید ایجاد می‌شوند و این روند تا جایی تکرار می‌شود که بهبود شایستگی جمعیت و همگرایی کامل ایجاد شود (Goldberg, 1989). مقادیر متغیرهای الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به بهترین جواب در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقادیر متغیرهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک برای مدل تحویل بهینهٔ آب در کانال توزیع

Table 1- Values of the parameters used in the genetic algorithm for the optimal water delivery model in the distribution canal

تعداد تکرار نسل	اندازهٔ جمعیت	احتمال جهش	احتمال تقاطع
800	300	0.25	0.8

۲-۳- مدل AquaCrop

مدل AquaCrop روند تغییرات تبخیر- تعرق را به خوبی پیش‌بینی می‌کند (Jorenush et al., 2024). مدل مذکور در این پژوهش ابتدا برای هر محصول و در حالت آبیاری خودکار[1] تهیه و اجرا شد. به‌منظور تخصیص آب به الگوی کشت، سال زراعی به ۳۶ دورهٔ ۱۰ روزه تقسیم شد. عملکرد پتانسیل و مقدار آب متناظر محاسبه شده از اجرای مدل نیز، به‌عنوان ورودی‌های مدل بهینه‌ساز تخصیص آب در نظر گرفته شدند. سپس در مدل تخصیص بهینه، برنامه‌ریزی آبیاری مدل AquaCrop plug-in، در حالت عمق و زمان تعیین شده با معیار مشخص[2] و با در نظر گرفتن معیار زمان آبیاری براساس دور آبیاری و معیار عمق آبیاری بر پایهٔ رطوبت در حد ظرفیت زراعی پیاده‌سازی شد (Kahkhamoghadam et al.,

[1] Net irrigation water requirement

[2] Generation of irrigation schedule

2023). به بیان دیگر نرم‌افزار AquaCrop برای تعیین توابع تولید در شرایط مختلف آبیاری به‌کار رفته است. در این پژوهش از نسخهٔ ۶/۰ مدل مذکور استفاده شده است.

۲-٤- مدل‌سازی تخصیص و توزیع آب در واحدهای زراعی

مدل‌های تخصیص بهینه از دو بخش تابع هدف و محدودیت‌ها تشکیل می‌شوند. تابع سود اقتصادی[1] (EB) به‌عنوان تابع هدف اصلی در بیش‌تر پژوهش‌های مربوط به برنامه‌ریزی آبیاری در نظر گرفته می‌شود (Rath et al., 2018; Kumar and Yadav, 2019). محدودیت زمین و منابع آب نیز از مواردی هستند که در مسائل تخصیص بهینهٔ آب حائز اهمیت هستند (Kuo et al., 2000)، لذا این دو عامل به‌عنوان محور تصمیم و برنامه‌ریزی قرار گرفتند. بنابراین، در مدل تخصیص بهینهٔ آب، ارتفاع آب آبیاری و سطح زیرکشت هر یک از گیاهان منتخب متغیرهای تصمیم هستند. در رابطهٔ (۱) تابع سود اقتصادی برای الگوی کشت منتخب نشان داده شده است (Ma and Zhao, 2019):

$$EB = \sum_{i=1}^{n} A_i \times (Y_i \times P_i - C_i - P_{wi} \times IR) \qquad (۱)$$

در رابطهٔ فوق، A_i سطح زیرکشت هر محصول، Y_i عملکرد هر محصول، P_i قیمت فروش هر محصول، C_i قیمت تولید هر محصول، P_{wi} آب‌بها برای هر محصول، IR ارتفاع آب آبیاری، n تعداد محصولات منتخب و i شمارهٔ هر محصول است.

۲-۵- تئوری و ساختار مدل توزیع و تحویل بهینهٔ آب در کانال توزیع

دبی، مدت زمان و دور تحویل آب به هر انشعاب در یک کانال توزیع، سه مؤلفه اصلی تحویل آب در شبکه‌های آبیاری محسوب می‌شوند. لذا برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در شبکه به معنی تعیین این سه مؤلفه است (Clemmens, 1987). اولین بار Suryavanshi and Reddy (1986) برنامه‌ریزی توزیع و تحویل آب در کانال‌ها را ارائه نمودند. سپس Wang et al. (1995) فرم اصلاح شدهٔ آن را پیشنهاد دادند. این پژوهش‌گران جهت تحویل آب به انشعابات واقع در کانال از مفهوم لوله‌های جریان استفاده کردند. اهداف مدل پیشنهادی حداقل ساختن هزینهٔ ساخت کانال (در صورتی که کانال در مرحلهٔ ساخت باشد) و یا حداقل کردن تلفات انتقال آب در حین بهره‌برداری بود. در این مدل ساده توزیع و تحویل آب، تنها گروه‌بندی انشعابات مدنظر بود و ظرفیت کانال و زمان کل بهره‌برداری به‌عنوان قیودات آن در نظر گرفته شده بود. در ادامه، پژوهش‌گران نگرش‌های مختلفی در خصوص مدل Wang et al. (1995) ارائه و نواقص آن را برطرف نمودند. یکی از این نگرش‌ها، مدل ارائه شده توسط Kanooni and Monem (2014) است که خود تکمیل و اصلاح شدهٔ مدل Monem and Namdariyan (2005) است. در پژوهش حاضر با اعمال اصلاحاتی، مدل ارائه شده توسط Kanooni and Monem (2014) توسعه داده شد و از آن استفاده شد. با انتخاب تعداد بلوک معین، انشعابات واقع در کانال توزیع به‌گونه‌ای داخل هر بلوک توزیع می‌شوند که همهٔ انشعابات داخل بلوک‌ها باشند و بلوکی بدون انشعاب باقی نماند. در ادامه، نحوهٔ نوبت‌بندی تحویل آب به هر کدام از انشعابات واقع در هر بلوک و دبی تحویلی به آن‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که دبی کانال، زمان مورد نیاز جهت تکمیل برنامهٔ آبیاری و اختلاف حجم آب تحویلی مورد نیاز به هر انشعاب حداقل شود. تابع هدف این مدل به‌صورت رابطهٔ (۲) است (Kanooni and Monem, 2014).

$$\text{Min: } F = Q_m + T_m + \Delta V \qquad (۲)$$

در رابطهٔ بالا، F تابع هدف، Q_m حداکثر مجموع دبی انشعاباتی که به‌طور هم‌زمان آبگیری می‌کنند، T_m حداکثر اختلاف دور آبیاری در یک بلوک از زمان شروع بهره‌برداری از انشعابات و ΔV نیز مجموع قد مطلق اختلاف حجم مورد نیاز و تحویلی به هر انشعاب است. قیود و محدودیت‌های مدل بهینه‌ساز توزیع و تحویل آب به شرح زیر است:

۱- جریمهٔ مربوط به قید ظرفیت کانال: مجموع جریان ورودی به انشعاباتی که هم‌زمان آبگیری می‌کنند نباید از ظرفیت کانال بیش‌تر باشد. چنان‌چه این محدودیت در فرآیند بهینه‌سازی برقرار نباشد تابع جریمهٔ زیر به تابع هدف اعمال می‌شود (Kanooni and Monem, 2014). در این رابطه، Q_{msi} مجموع دبی انشعاباتی که هم‌زمان آبگیری می‌شوند، Q_o ظرفیت طراحی کانال و PenQ نیز تابع مربوط به قید ظرفیت کانال است.

$$PenQ = \max[Q_{msi}/Q_0, 0] \qquad (۳)$$

۲- جریمهٔ مربوط به قید مدت زمان تکمیل آبیاری کانال: با توجه به این که انشعاباتی که در یک بلوک قرار دارند به‌صورت متوالی آبگیری می‌شوند، لذا مجموع زمان آبگیری انشعابات داخل هر بلوک نباید از دور آبیاری تجاوز نماید. چنان‌چه این محدودیت در فرآیند بهینه‌سازی برقرار نباشد تابع جریمهٔ زیر به تابع هدف اعمال می‌شود (Kanooni and Monem, 2014):

$$PenT = \max[T_{sbt}/f, 0] \qquad (۴)$$

در رابطهٔ (۴)، T_{sbt} مجموع زمان آبگیری انشعابات واقع در هر بلوک، f دور آبیاری و PenT نیز تابع جریمه مربوط به قید زمان تکمیل آبیاری کانال توزیع است. رابطهٔ (۲) که به‌عنوان تابع هدف مدل بهینه‌ساز توزیع و تحویل آب در نظر گرفته شده است،

[1] Economic benefit

یک تابع سه هدفه بوده که به‌صورت مجموع وزنی همگن ارائه شده است. اجزاء تابع هدف دارای واحد یکسانی نیستند. بنابراین، برای استفادهٔ صحیح از آن‌ها، با تقسیم هر جزء به مقدار بیشینه آن مقدار نرمال شده در تابع هدف قرار داده می‌شود (Kanooni and Monem, 2014). به‌دلیل پیچیده بودن فرآیند مدل‌سازی و وجود انواع متغیرهای پیوسته و عدد صحیح در مدل بهینه، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی استفاده شد و در محیط نرم‌افزار متلب (نسخهٔ 2018b) تهیه و اجرا شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تخصیص و توزیع بهینه آب در سطح واحد زراعی

آب بهینهٔ تخصیص یافته به هر گیاه و توزیع آن در دوره‌های ۱۰ روزه که با استفاده از مدل تخصیص بهینه به‌دست آمد جهت محاسبهٔ آب مورد تقاضای هر انشعاب واقع بر کانال توزیع M به‌کار برده شد. مطابق با توضیحات ارائه شده در قسمت مواد و روش‌ها، ابتدا مدل AquaCrop برای هر محصول، در حالت آبیاری خودکار اجرا شد. لذا، عملکرد پتانسیل و مقدار عمق آب محاسبه شده از اجرای آن به‌عنوان وضعیت نرمال در نظر گرفته شد. جدول ۲ مقایسهٔ عمق آب تخصیص یافته محصولات زراعی را در وضعیت نرمال و بهینه نشان می‌دهد (Kahkhamoghadam et al., 2023).

جدول ۲- مقایسهٔ عمق آب تخصیص یافتهٔ محصولات زراعی در وضعیت نرمال و بهینه

Table 2- Comparison of the crop's allocated water depth in normal and optimal conditions

محصول	عمق آب تخصیص یافتهٔ نرمال (میلی‌متر بر هکتار)	عمق آب تخصیص یافتهٔ بهینه (میلی‌متر بر هکتار)	درصد کاهش (درصد)
گندم	678	541	20
ذرت دانه‌ای کشت اول	1110	1004	10
ذرت دانه‌ای کشت دوم	900	794	12
سویا	926	790	15
یونجه	2047	1580	24
مجموع	5688	4709	17

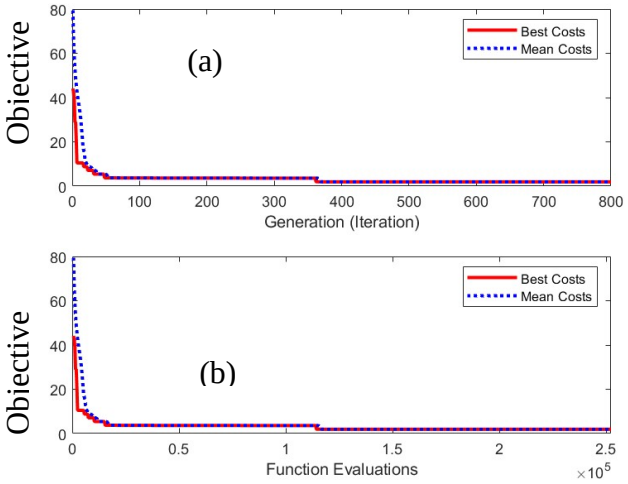
۳-۲- نتایج توزیع و تحویل بهینهٔ آب در سطح کانال‌های توزیع

با استفاده از حجم آب تخصیص یافته به هر گیاه و مساحت تحت کشت آن، آب مورد تقاضای هر انشعاب در گام‌های زمانی مختلف به‌دست آمد. به‌دنبال آن و با مشخص شدن آب مورد تقاضای هر انشعاب با معلوم بودن مشخصات فیزیکی کانال مورد مطالعه مانند ابعاد، ظرفیت کانال، نوع و ظرفیت دریچه‌های مربوط به هر انشعاب و سایر اطلاعات مورد نیاز، تحویل بهینهٔ آب در کانال برای هر گام زمانی با استفاده از مدل تحویل بهینهٔ آب انجام پذیرفت. لازم به ذکر است که تعداد انشعابات کانال M برابر ۴۵ انشعاب است که دو انشعاب آن (انشعاب ۱۲ و ۱۶) عملاً بهره‌برداری نمی‌شود. لذا، در مدل بهینه‌ساز تحویل آب دو انشعاب مذکور وارد محاسبات نشدند. دبی هر انشعاب به‌صورت تصادفی در محدوده‌ای مجاز بین دبی حداکثر و دبی حداقل انتخاب شد، سپس شمارهٔ بلوک هر انشعاب تعیین شد. شمارهٔ بلوک به‌صورتی اختصاص می‌یابد که هیچ بلوکی بدون انشعاب نماند و بدین‌ترتیب جواب‌های بهینه محاسبه می‌شوند. برای هر گام زمانی مؤلفه‌های توزیع و تحویل آب به‌صورت جداگانه محاسبه شد. لذا با توجه به برنامهٔ تحویل بهینه عملیات بهره‌برداری از کانال امکان‌پذیر خواهد بود. در ادامه، نمونه‌ای از فرآیند رسیدن به جواب بهینه در الگوریتم ژنتیک آورده شده است. شکل ۲-الف نشان‌دهندهٔ روند هم‌گرایی مدل بوده که بر اساس آن تقریباً از نسل ۴۰۰ نمودار پایدار شده و مقدار تابع هدف در عدد ۱/۹ هم‌گرا شده است. یکی دیگر از مؤلفه‌های تعیین‌کننده در توانایی مناسب الگوریتم جهت یافتن پاسخ بهینه، تعداد دفعاتی است که تابع هدف در طی فرآیند بهینه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لذا در شکل ۲-ب نمونهٔ مذکور آورده شده است. مطابق با این شکل تابع هدف تقریبا $۲/۵\times۱۰^{۵}$ بار فراخوانی و مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که مقادیر جریمهٔ مربوط به عبور از قیودات، در طی فرآیند بهینه‌سازی برابر با صفر شد.

۳-۲-۱- عوامل تحویل آب

عوامل تحویل آب برای گام زمانی هفدهم که بیش‌ترین نیاز آبی محصولات و در نتیجه بیش‌ترین حجم آب تخصیص یافته به هر انشعاب در آن صورت گرفته است (دورهٔ اوج تقاضا) به‌عنوان نمونه‌ای از نتایج در جدول ۳ آورده شده است. این جدول شامل دبی، مدت زمان تحویل آب و زمان‌بندی تحویل آب به هر آبگیر است. دبی بهینه از حداقل و حداکثر دبی هر آبگیر تجاوز ننموده است. هم‌چنین، زمان پایان عملیات بهره‌برداری ۲۳۲ ساعت از شروع برنامهٔ بهره‌برداری است که آخرین انشعابات در حال آبگیری شامل انشعابات ۱۵، ۲۱، ۲۷، ۲۹، ۳۸، ۴۰، ۴۱ و ۴۲ می‌باشند. کم‌تر بودن مدت کل فرآیند بهره‌برداری از دور آبیاری ۱۰ روزه (۲۴۰ ساعت)، نشان‌دهنده رعایت قید مربوطه در مدل

می‌باشند. از دیگر عوامل تحویل آب، بلوک‌بندی انشعابات است که در خلال آن انشعابات در حصار تعداد بلوک مشخصی گروه‌بندی می‌شوند. هرچه تعداد بلوک بیش‌تری انتخاب شود دبی ورودی به کانال افزایش یافته و مدت زمان تکمیل برنامهٔ آبیاری کاهش می‌یابد و هرچه تعداد بلوک کم‌تری انتخاب شود دبی ورودی و ظرفیت کانال کاهش یافته و لذا مدت زمان تکمیل برنامهٔ آبیاری افزایش می‌یابد. لذا، حداقل تعداد بلوک لازم برای گروه‌بندی آبگیرها به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که مدت زمان تکمیل برنامه آبیاری از دور آبیاری تجاوز ننماید. با توجه به آن‌چه شرح داده شد، بلوک‌بندی انشعابات برای گام زمانی هفدهم (دورهٔ اوج تقاضا) اجرا شد (شکل ۳). نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که انشعابات در ۳۳ بلوک مختلف توزیع شده است و انشعاباتی که به صورت متوالی آبگیری می‌کنند در یک بلوک قرار گرفته‌اند. در این شکل انشعابات ۳۷، ۹، ۳، ۲۶، ۸، ۶، ۲، ۷، ۴۴، ۲۴، ۱۹، ۱۱، ۴۵، ۳۹، ۲۵، ۳۰، ۲۱، ۲۲، ۱۸، ۱۰، ۲۷، ۱۷، ۱۳، ۵، ۱، ۳۸، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۱۴، ۳۵، ۲۸ و ۳۴ به‌طور هم‌زمان شروع به بهره‌برداری می‌کنند. این در حالی است که برای مثال انشعابات شش و ۳۶ به صورت متوالی آبگیری می‌نمایند، به این صورت که پس از اتمام بهره‌برداری انشعاب شش، انشعاب شمارهٔ ۳۶ باز شده و شروع به آبگیری می‌نماید.



شکل ۲- روند هم‌گرایی به جواب بهینه (a) و تعداد ارزیابی تابع هدف (b) در مدل بهینه‌ساز توزیع و تحویل آب در کانال

Figure 2- The process of convergence to the optimal solution (a), the number of evaluations of the objective function (b) in the optimizer model of water distribution and delivery in the canal

۳-۲-۲- هیدروگراف جریان ورودی به کانال توزیع

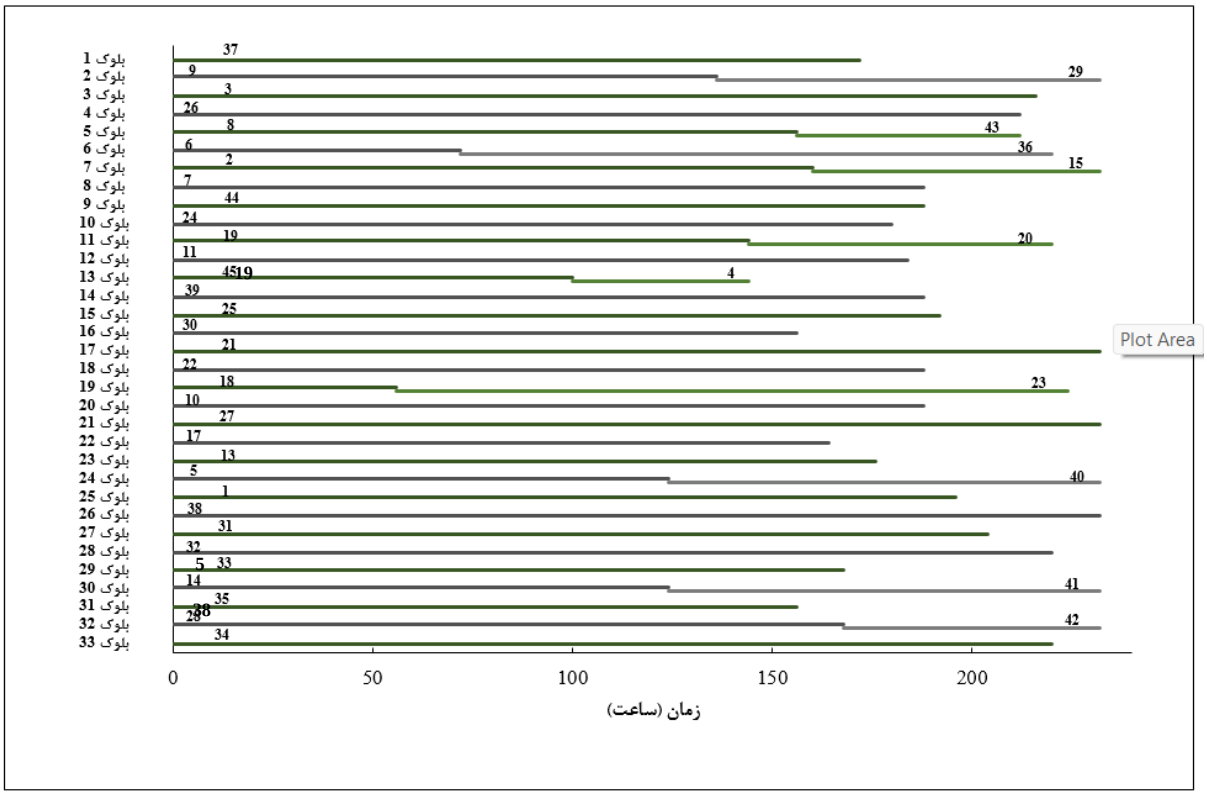
یکی از عوامل مهم در بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری در برنامه ریزی تحویل بهینهٔ آب، شیوهٔ آبگیری کانال‌های توزیع از کانال درجهٔ یک است. این مهم که با ترسیم هیدروگراف جریان ورودی محقق می‌شود که در شکل ۴ برای کانال مورد بررسی آورده شده است. هیدروگراف جریان ورودی به کانال M حاکی از این است که مدت زمان تکمیل برنامهٔ تحویل آب به آبگیرها ۲۳۲ ساعت است. حداکثر دبی جریان ورودی ۲/۵۷۳ مترمکعب بر ثانیه است که در زمان ۷۲ تا ۱۰۰ ساعت از شروع آبیاری صورت گرفته است، هم‌چنین، حداقل دبی جریان ورودی به کانال نیز برابر ۰/۵۹۰ مترمکعب بر ثانیه است که در زمان ۲۲۴ تا ۲۳۲ ساعت از شروع آبیاری اتفاق افتاده است. کم‌تر بودن حداکثر دبی جریان ورودی به کانال از ظرفیت کانال (۳ متر مکعب بر ثانیه) نشان از رعایت قید مربوطه در مدل است. هیدروگراف جریان ورودی به کانال تعداد تنظیمات آبگیر سراب کانال توزیع را ارائه می‌نماید. در طی زمان تکمیل برنامه تحویل آب، آبگیر اصلی کانال توزیع که خود از کانال درجهٔ یک A آب را دریافت می‌کند در مجموع ۲۳ مرتبه توسط مسئول بهره‌برداری از شبکه تنظیم می‌شود. زمان‌بندی تنظیمات آبگیر سراب خود به‌عنوان برنامهٔ عملیات بهره‌برداری محسوب می‌شود و می‌تواند به‌همراه سایر اطلاعات در دسترس متصدی شبکه قرار داده شود.

همان‌طورکه ملاحظه شد، نتایج برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب برای گام زمانی هفدهم ارائه شد. برای تمامی گام‌های زمانی ۱۰ روزه در طول سال زراعی مورد مطالعه نیز نتایج مشابهی انجام و استخراج شد. در پژوهشی، Kanooni and Monem (2016) با استفاده از الگوریتم ژنتیک متغیرهای بهینهٔ تحویل آب شامل دبی، مدت زمان تحویل آب به هر انشعاب و زمان‌بندی تحویل آب به انشعابات را برای کانال K شبکهٔ آبیاری زهکشی مغان که تعداد انشعابات کمی نیز داشت به‌دست آوردند. این پژوهش‌گران نشان دادند بیش‌ترین دبی جریان ورودی به کانال مذکور برای سناریوی ۲۵ درصد کمبود آب ۵۹۰ لیتر بر ثانیه و مدت کل زمان تحویل آب به انشعابات ۲۳۲ ساعت است. هم‌چنین، Qaderi Nasab et al. (2015) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی عوامل تحویل آب شامل نوبت‌بندی انشعابات در هر بلوک، حداقل ظرفیت کانال توزیع و حداقل زمان آبیاری را برای شبکهٔ آبیاری زیر سد جیرفت ارائه نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که حداکثر دبی ۱۳۸۱ لیتر در ثانیه و ماکزیمم زمان آبیاری ۲۳۶ ساعت است.

جدول ۳- دبی و زمان‌بندی تحویل آب به انشعابات کانال M در گام زمانی ۱۷

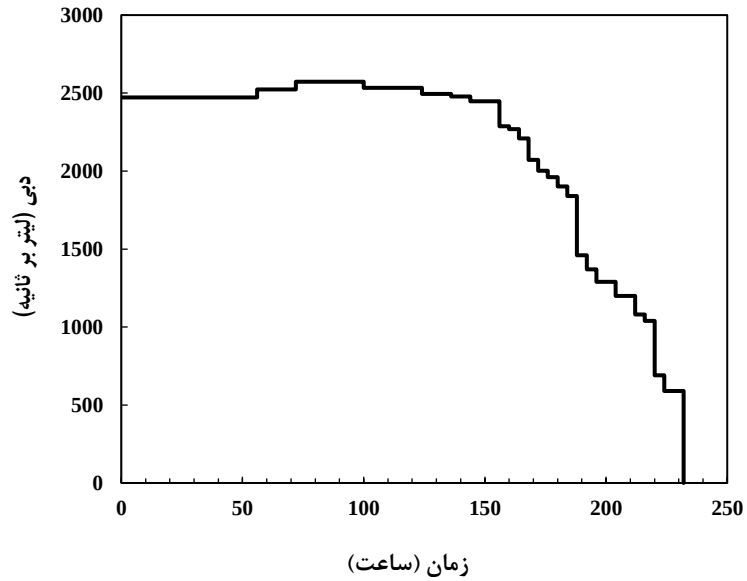
Table 3- Flow and schedule of water delivery to Canal M outlets in the 17th time step

شمارهٔ انشعاب	حداکثر دبی (لیتر بر ثانیه)	دبی بهینه (لیتر بر ثانیه)	مدت زمان آبگیری (ساعت)	زمان شروع (از ساعت)	زمان پایان (تا ساعت)
1	120	80	196	0	196
2	120	89	160	0	160
3	60	40	216	0	216
4	60	21	44	100	144
5	90	82	124	0	124
6	60	50	72	0	72
7	120	80	188	0	188
8	90	60	156	0	156
9	90	70	136	0	136
10	90	60	188	0	188
11	90	60	184	0	184
12	0	0	0	0	0
13	60	40	176	0	176
14	120	99	124	0	124
15	90	69	72	160	232
16	0	0	0	0	0
17	90	60	164	0	164
18	60	49	56	0	56
19	90	69	144	0	144
20	60	60	76	144	220
21	120	70	232	0	232
22	120	91	188	0	188
23	120	100	168	56	224
24	90	61	180	0	180
25	120	90	192	0	192
26	120	80	212	0	212
27	150	102	232	0	232
28	120	100	168	0	168
29	60	52	96	136	232
30	120	90	156	0	156
31	120	90	204	0	204
32	150	100	220	0	220
33	120	80	168	0	168
34	120	90	220	0	220
35	60	49	156	0	156
36	150	100	148	72	220
37	90	70	172	0	172
38	150	112	232	0	232
39	90	70	188	0	188
40	60	60	108	124	232
41	90	82	108	124	232
42	60	43	64	168	232
43	60	41	56	156	212
44	120	80	188	0	188
45	60	59	100	0	100



شکل۳- برنامه‌ریزی تحویل بهینهٔ آب در کانال M

Figure 3- Scheduling of optimal water delivery in Canal M



شکل ٤- هیدروگراف جریان ورودی به کانال M در طول دورهٔ تحویل

Figure 4- Inlet hydrograph of Canal M during the delivery period

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل بهینه‌ساز توزیع و تحویل آب در سطح کانال‌های توزیع با استفاده از الگوریتم ژنتیک در فضای نرم‌افزار متلب توسعه داده شد. با هدف تخصیص و تحویل بهینهٔ آب در سطوح مختلف شبکهٔ آبیاری و با تلفیق مدل گیاهی، نتایج و خروجی مدل‌ها با یک‌دیگر ترکیب شدند تا نتایج برنامه‌ریزی بهینهٔ آب با شرایط واقعی و نیاز آبی شبکهٔ تناسب بیش‌تری داشته باشد. در این مدل توسعه یافته عوامل تحویل آب شامل دبی، مدت زمان تحویل آب و هم‌زمانی تحویل آب به انشعابات کانال توزیع، به‌گونه‌ای تعیین شدند که اهداف مورد نظر شامل کاهش تلفات آب، کاهش هزینه‌ها، کاهش ظرفیت بهره‌برداری سامانه و غیره تأمین شود. مدل توزیع و تحویل بهینهٔ آب، برنامهٔ زمان‌بندی تحویل آب به آبگیرها، بلوک‌بندی و میزان تنظیمات دریچه‌ها را متناسب با دبی تحویلی تعیین کرده و به‌این ترتیب برنامهٔ بهره‌برداری از انشعابات در کانال توزیع را ارائه می‌کند. برای کانال مورد بررسی در دورهٔ اوج تقاضا حداکثر و حداقل ظرفیت کانال به‌ترتیب برابر ۲/۵۷۳ و ۰/۵۹۰ مترمکعب بر ثانیه، حداکثر زمان تکمیل برنامهٔ تحویل آب به آبگیرها ۲۳۲ ساعت و تعداد تنظیمات دریچه سراب ۲۳ تنظیم محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده بیان‌گر آن است که مدل‌های توسعه یافته برای برنامه‌ریزی تخصیص و تحویل بهینهٔ آب سودمند بوده است و به کمک آن می‌توان اهداف متفاوتی را به‌صورت هم‌زمان بهینه نمود.

سپاسگزاری

این پژوهش در قالب رسالهٔ دکتری صورت گرفته است. نویسندگان از سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل و شرکت بهره‌بردار شبکهٔ آبیاری مغان که موجبات تسهیل انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

همهٔ اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

پریسا کهخامقدم: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری و آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **علی نقی ضیائی:** راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **کامران داوری:** مشاوره، ویرایش و بازبینی متن مقاله، کنترل نتایج؛ **امین کانونی:** مشاوره، ویرایش و بازبینی متن مقاله، کنترل نتایج؛ **صدیقه صادقی:** مشاوره، تحلیل‌های نرم‌افزاری.

منابع

جرعه‌نوش، محمدهادی، اگدرنژاد، اصلان، شاهرخ‌نیا، محمدعلی، ابراهیمی‌پاک، نیازعلی (۱۴۰۳). ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم تحت سناریوهای مختلف مدیریت زراعی در قزوین. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱۶-۱. doi:10.22098/mmws.2023.12533.1248

حسین‌زاده کوهی، حسین، اردستانی، مجتبی، سارنگ، امین (۱۴۰۳). بهینه‌سازی طراحی کانال‌های جمع‌آوری رواناب شهری برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش اطمینان‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۱۰۱-۸۵. doi:10.22098/mmws.2023.12222.1213

خاشعی‌سیوکی، عباس، اطمینان، سمانه، شهیدی، علی، پوررضابیلندی، محسن، جلالی، وحیدرضا (۱۴۰۳). بررسی عملکرد الگوریتم تکامل تفاضلی در برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۴(۱)، ۵۱-۳۶. doi:10.22098/mmws.2023.12101.1202

قادری‌نسب‌گروهی، فرزانه، قادری، کورش، و رهنما، محمدباقر (۱۳۹۴). برنامه تحویل و توزیع بهینه آب در شبکه آبیاری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی (مطالعه موردی شبکه آبیاری زیر سد جیرفت). *آبیاری و زهکشی ایران*، ۹(۵)، ۸۴۱-۸۳۰.

کانونی، امین، و منعم، محمدجواد (۱۳۹۵). بهینه‌سازی تخصیص و برنامه‌ریزی تحویل آب در شبکه‌های آبیاری. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۰(۱)، ۲۳-۱۲. https://sid.ir/paper/131725/fa

کهخامقدم، پریسا، ضیائی، علی‌نقی، داوری، کامران، کانونی، امین، و صادقی، صدیقه (۱۴۰۱). تخصیص بهینه آب و زمین در شبکه آبیاری مغان با ترکیب مدل‌سازی گیاهی و الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۳(۱۲)، ۲۹۲۱-۲۹۳۵. doi:10.22059/ijswr.2023.352463.669411

منعم، محمدجواد، نجفی، محمدرضا، و خوشنواز، صائب (۱۳۸۶). برنامه‌ریزی بهینه تحویل آب در کانال‌های آبیاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۳(۱)، ۱۱-۱. https://sid.ir/paper/100139/f

References

Bastiaanssen, W.G., Allen, R.G., Droogers, P., D'Urso, G., & Steduto, P. (2007). Twenty-five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. *Agricultural Water Management*, *92*(3), 111-125. doi:10.1016/j.agwat.2007.05.013

Bowmer, K.H., & Meyer, W.S. (2014). Irrigation agriculture: Sustainability through holistic approaches to water use and innovation. Pp. 181-224, In Drinking Water and Water Management: New research, *Nova Science Publishers.*

Brown, P.D., Cochrane, T.A., & Krom, T.D. (2010). Optimal on-farm irrigation scheduling with a seasonal water limit using simulated annealing. *Agricultural Water Management*, *97*(6), 892-900. doi:10.1016/j.agwat.2010.01.020

Chen, Z., Zhao, C., Wu, H., & Miao, Y. (2019). A water-saving irrigation decision-making model for greenhouse tomatoes based on genetic optimization TS fuzzy neural network. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, *13*(6), 2925-2948. doi:10.3837/tiis.2019.06.009

Clemmens, A.J. (1987). Delivery system schedules and required capacities. Pp. 18-34, In Planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems, *American Society of Civil Engineers*.

Das, B., Singh, A., Panda, S.N., & Yasuda, H. (2015). Optimal land and water resources allocation policies for sustainable irrigated agriculture. *Land Use Policy*, *42*, 527-537. doi:10.1016/j.landusepol.2014.09.012

Edwards, E.C., & Nehra, A. (2020). Importance of Freshwater for Irrigation. Pp. 22-28, in: Goldestein, M.I, Dellasala,A.D. (Eds.), Encyclopedia of the World's Biomes. *Elsevier Inc, Washington* doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.11913-X

García-Vila, M., & Fereres, E. (2012). Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy*, *36*(1), 21-31. doi:10.1016/j.eja.2011.08.003

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley-Longman, Publishing Co Inc. USA. 412 pages.

Guo, D., Olesen, J.E., Manevski, K., & Ma, X. (2021). Optimizing irrigation schedule in a large agricultural region under different hydrologic scenarios. *Agricultural Water Management*, *245*, 106575. doi:10.1016/j.agwat. 2020.106575

Hosseinzade Kuhi, H., Ardestani, M., & Sarang, A. (2024). Optimum redesign of runoff harvesting channels to reduce vulnerability and increase reliability against climate change. Water and *Soil Management and Modeling*, 4(1), 85-101. doi:10.22098/mmws.2023.12222.1213. [In Persian]

Jorenush, M.H., Egdernezhad, A., Shahrokhnia, M.A., & Ebrahimi Pak, N.A. (2024). Evaluation of AquaCrop model for simulation of Wheat plant (*Triticum*) yield under different scenarios of agricultural management in Qazvin. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 1-16. doi:10.22098/mmws.2023.12533.1248. [In Persian]

Kahkhamoghadam, P., Ziaei, A.N., Davari, K., Kanooni, A., & Sadeghi, S. (2023). Optimal allocation of water and land in Moghan irrigation network using crop model and genetic algorithm. *Iranian Journal Soil and Water Research*, *53*(12), 2921-2935. [In Persian]. doi:10.22059/ijswr.2023.352463.669411

Kanooni, A., & Monem, M.J. (2014). Integrated stepwise approach for optimal water allocation in irrigation canals. *Irrigation and Drainage*, *63*(1), 12-21. doi:10.1002/ird.1798

Kanooni, A., & Monem, M.J. (2016). Allocation and water delivery scheduling optimization in irrigation networks. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *10*(1), 12-23. https://sid.ir/paper/131725/fa [In Persian]

Khashei Siuki, A., Etminan, S., Shahidi, A., Pourreza Bilondi, M., & Jalali, V. (2024). Investigating the performance of the differential evolution algorithm in estimating soil hydraulic parameters. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1), 36-51. doi:10.22098/mmws.2023.12101.1202. [In Persian]

Kheir, A.M., Alkharabsheh, H.M., Seleiman, M.F., Al-Saif, A.M., Ammar, K.A., Attia, A., Zoghdan,.M.G., Shabana, M.M.A., Aboelsoud, H., & Schillaci, C. (2021). Calibration and validation of AQUACROP and APSIM models to optimize wheat yield and water saving in arid regions. *Land*, *10*(12), 1375. doi:10.3390/land10121375

Kumar, V., & Yadav, S.M. (2019). Optimization of cropping patterns using elitist-Jaya and elitist-TLBO algorithms. *Water Resources Management*, *33*(5), 1817-1833. doi:10.1007/s11269-019-02204-z

Kuo, S.F., Merkley, G.P., & Liu, C.W. (2000). Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm. *Agricultural Water Management*, *45*(3), 243-266. doi:10.1016/S0378-3774(00)00081-0

Liu, Y., Yang, T., Zhao, R.H., Li, Y.B., Zhao, W.J., & Ma, X.Y. (2018). Irrigation canal system delivery scheduling based on a particle swarm optimization algorithm. *Water*, *10*(9), 1281. doi:10.3390/w10091281

Ma, M., & Zhao, M. (2019). Research on an improved economic value estimation model for crop irrigation water in arid areas: from the perspective of water-crop sustainable development. *Sustainability*, *11*(4), 1207. doi:10.3390/su11041207

Martínez-Romero, A., López-Urrea, R., Montoya, F., Pardo, J.J., & Domínguez, A. (2021). Optimization of irrigation scheduling for barley crop, combining AquaCrop and MOPECO models to simulate various water-deficit regimes. *Agricultural Water Management*, *258*, 107219. doi:10.1016/j.agwat.2021.107219

Miglietta, P.P., Morrone, D., & Lamastra, L. (2018). Water footprint and economic water productivity of Italian wines with appellation of origin: Managing sustainability through an integrated approach. *Science of The Total Environment*, *633*, doi:1280-1286.10.1016/j.scitotenv.2018.03.270

Monem, M.J., & Namdariyan, R. (2005). Application of simulated annealing (SA) techniques for optimal water distribution in irrigation canals. *Irrigation and Drainage*, *54*(4), 365-373. doi:10.1002/ird.199

Monem, M.J., Najafi, M.R., & Khoshnavaz, S. (2007). Optimal water scheduling in irrigation networks using genetic algorithm. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *3*(1), 1-11. https://sid.ir/paper/100139/fa. [In Persian]

Oad, R., Garcia, L., Kinzli, K.D., Patterson, D., & Shafike, N. (2009). Decision support systems for efficient irrigation in the Middle Rio Grande Valley. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *135*(2), 177-185. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:2(177)

Osroosh, Y., Peters, R.T., Campbell, C.S., & Zhang, Q. (2016). Comparison of irrigation automation algorithms for drip-irrigated apple trees. *Computers and Electronics in Agriculture*, *128*, 87-99. doi:10.1016/j.compag.2016.08.013

Pardo, M.A., Navarro-González, F.J., & Villacampa, Y. (2022). An algorithm to schedule water delivery in pressurized irrigation networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 107290. doi:10.1016/j.compag.2022.107290

Polinova, M., Salinas, K., Bonfante, A., & Brook, A. (2019). Irrigation optimization under a limited water supply by the integration of modern approaches into traditional water management on the cotton fields. *Remote Sensing*, *11*(18), 2127. doi:10.3390/rs11182127

Qaderi Nasab, F., Qaderi, K., & Rahnama, M.B. (2015). Optimal programming for delivery and distribution of water irrigation network using evolutionary algorithms (the case study: the network irrigation at downstream of the Jiroft dam). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, *9*(5), 830-841. [In Persian]

Rabie, Z., Honar, T., & Bateni, M. (2016). Determination of optimal and and water allocation under limited water resources using soil water balance in Ordibehesht canal of Doroodzan water district. *Iran Agricultural Research*, *34*(2), 21-28. doi:10.22099/IAR.2016.3454

Rath, A., Samantaray, S., Biswal, S., & Swain, P.C. (2018). Application of genetic algorithm to derive an optimal cropping pattern, in part of Hirakud command. Pp. 711-721, In: Progress in Computing, Analytics and Networking: Proceedings of ICCAN 2017. *Springer Singapore*. doi:10.1007/978-981-10-7871-2_68

Shen, H., Jiang, K., Sun, W., Xu, Y., & Ma, X. (2021). Irrigation decision method for winter wheat growth period in a supplementary irrigation area based on a support vector machine algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, *182*, 106032. doi:10.1016/j.compag.2021.106032

Suryavanshi, A.R. & Reddy, J.M. (1986). Optimal operation schedule of irrigation distribution systems. *Agricultural Water Management*, *11*(1), 23-30. doi:10.1016/0378-3774(86)90033-8

Villacampa, Y., Navarro-González, F.J., Compañ-Rosique, P., & Satorre-Cuerda, R. (2019). A guided genetic algorithm for diagonalization of symmetric and Hermitian matrices. *Applied Soft Computing*, 75, 180-189. doi:10.1016/j.asoc.2018.11.004

Wang, Z., Reddy, J.M., & Feyen, J. (1995). Improved 0–1 programming model for optimal flow scheduling in irrigation canals. *Irrigation and Drainage Systems*, *9*, 105-116. doi:10.1007/BF00881670

Wardlaw, R., & Bhaktikul, K. (2004). Application of genetic algorithms for irrigation water scheduling. Irrigation and Drainage: *The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, *53*(4), 397-414. doi:10.1002/ird.121

Zhang, F., He, C., Yaqiong, F., Hao, X., & Kang, S. (2022). Canal delivery and irrigation scheduling optimization based on crop water demand. *Agricultural Water Management*, *260*, 107245. doi:10.1016/j.agwat.2021.107245