

Research Paper

Simultaneous Optimization of Cropping Patterns and Irrigation Scheduling under Different Water Supply Scenarios Using the Grey Wolf Optimizer (GWO): A Case Study in the Tajan Irrigation and Drainage Network, Sari, Iran

Ahmad Mohammadi¹, Ali Bagheri^{2*}, Davod Akbari Nodehi³

¹ Ph.D. Candidate, Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

² Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

³ Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran



10.22125/iwe.2026.591059.1936.

Received:

June 10, 2026

Accepted:

September 1, 2026

Available online:

September 7, 2026

Keywords:

Cropping pattern optimization; Irrigation scheduling; Grey Wolf Optimizer (GWO); Economic water productivity

Abstract

Increasing water scarcity and competition among different water-use sectors have highlighted the need for advanced optimization approaches to simultaneously manage cropping patterns and irrigation scheduling in agricultural systems. This study aimed to determine the optimal cropping pattern and irrigation schedule to maximize net profit and improve economic water productivity in Unit 1 of the Tajan Irrigation and Drainage Network, Sari, Iran. Seven crops, including rice, citrus orchards, wheat, barley, canola, forage maize, and soybean, were evaluated across a cultivated area of 3,000 ha. An optimization model was developed to maximize net profit under constraints related to water availability, cultivable land, and management requirements, and the Grey Wolf Optimizer (GWO) was employed to solve the model. To evaluate different water management strategies, 27 scenarios were developed by combining three water supply levels (100%, 80%, and 60%), three irrigation intervals (5, 7, and 10 days), and three Management Allowable Depletion (MAD) levels (100%, 80%, and 60%). The results showed that integrated management of cropping patterns and irrigation scheduling can reduce water consumption without substantially reducing economic returns. The best-performing scenario, W60-I10-M60, reduced irrigation water consumption by 7.87% compared with the baseline scenario, while increasing net profit by 0.35% and economic water productivity by 8.93%. Overall, the results indicate that metaheuristic optimization models can serve as effective decision-support tools for water allocation, irrigation management, and improving the economic sustainability of irrigation systems under water-scarce conditions.

1. Introduction

Agriculture remains the largest consumer of freshwater resources worldwide, accounting for approximately 70% of total freshwater withdrawals. Increasing population growth, climate variability, frequent drought events, and growing competition among agricultural, industrial, and domestic sectors have intensified pressure on available water resources, making efficient agricultural water management an essential

* Corresponding Author: Ali Bagheri

Address: Department of Water Science and Engineering, QaS.C., Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

Email: Ali.bagheri@iau.ac.ir

component of sustainable development. In regions where irrigation is the primary source of crop water supply, improving water allocation strategies while maintaining agricultural productivity has become one of the major challenges for water managers and policy makers. Iran is among the countries experiencing severe water stress because of low precipitation, uneven temporal and spatial rainfall distribution, excessive groundwater abstraction, and increasing irrigation demands. Although northern provinces receive relatively higher annual rainfall than other regions of the country, recent climatic fluctuations and increasing agricultural water consumption have considerably reduced water availability during the growing season. Consequently, irrigation networks in these regions require scientific decision-support tools capable of allocating limited water resources more efficiently while preserving farmers' income and regional agricultural production.

Cropping pattern optimization has been widely recognized as one of the most effective approaches for improving agricultural water productivity. By reallocating cultivated areas according to crop water requirements, production costs, market prices, and available water resources, optimized cropping patterns can simultaneously enhance economic returns and reduce irrigation demand. However, cropping pattern optimization alone cannot fully address irrigation management challenges unless it is integrated with appropriate irrigation scheduling strategies. Therefore, simultaneous optimization of cropping patterns and irrigation scheduling provides a more realistic framework for sustainable water resources management. Recent advances in computational intelligence have significantly improved the capability of solving complex agricultural optimization problems. Among various metaheuristic algorithms, the Grey Wolf Optimizer (GWO) has demonstrated high efficiency in nonlinear optimization because of its simple structure, rapid convergence, and strong global search capability. Nevertheless, limited studies have evaluated the combined effects of different water supply levels, irrigation intervals, and soil moisture depletion strategies on cropping pattern optimization within large irrigation networks in northern Iran. Accordingly, the objective of the present study was to develop an integrated optimization model for determining the optimal cropping pattern and irrigation scheduling in Unit 1 of the Tajan Irrigation and Drainage Network using the Grey Wolf Optimizer algorithm. The model was designed to maximize net economic profit while improving economic water productivity under multiple water management scenarios. The obtained results are expected to provide practical guidance for sustainable irrigation planning and efficient allocation of limited water resources under future water scarcity conditions

2. Materials and Methods

The study was conducted in Unit 1 of the Tajan Irrigation and Drainage Network, located in Sari County, Mazandaran Province, northern Iran. This irrigation district represents one of the most productive agricultural regions in northern Iran, where rice cultivation dominates the cropping system alongside citrus orchards, wheat, barley, forage maize, soybean, and canola. The total cultivated area considered in the optimization model was 3000 ha, consisting of 1320 ha of rice, 1080 ha of citrus orchards, and 600 ha allocated to annual field crops.

Crop water requirements were estimated according to the FAO-56 methodology, in which reference evapotranspiration (ET_0) was calculated using the FAO Penman–Monteith equation. Crop evapotranspiration (ET_c) was subsequently obtained by multiplying ET_0 by the crop coefficient (K_c) corresponding to each growth stage. Effective rainfall was deducted from seasonal crop water demand to estimate the net irrigation water requirement. Crop-specific agronomic parameters, including irrigation depth, crop yield response factor (K_y), production costs, cultivated area, and market prices, were compiled from regional agricultural statistics, published literature, and field observations.

To evaluate crop performance under deficit irrigation conditions, the Doorenbos and Kassam crop yield response model was employed. This model estimates the reduction in actual yield as a function of the relative reduction in crop evapotranspiration. Consequently, crop yields under different irrigation conditions were determined based on the relationship between potential evapotranspiration, actual evapotranspiration, and the crop-specific yield response factor.

The optimization problem was formulated as a constrained nonlinear programming model with the objective of maximizing total net economic profit. Decision variables included cultivated area allocated to each crop under different management scenarios. The objective function incorporated crop yield, production costs, market prices, and cultivated area, while the model was subjected to several practical constraints, including total cultivated area, available irrigation water, minimum allowable rice cultivation, and restrictions on citrus orchard area due to their perennial nature.

The optimization model was solved using the Grey Wolf Optimizer (GWO) algorithm implemented in MATLAB R2024a. In this algorithm, each wolf represented a candidate cropping pattern, while the fitness

of each solution was evaluated using the net economic profit objective function. The optimization process was performed with a population size of 50 wolves and a maximum of 200 iterations. The control parameter (α) decreased linearly from 2 to 0, enabling a gradual transition from global exploration during the early iterations to local exploitation near convergence.

To investigate the combined effects of irrigation management variables, 27 management scenarios were generated using three irrigation water supply levels (100%, 80%, and 60%), three irrigation intervals (5, 7, and 10 days), and three Management Allowable Depletion (MAD) levels (100%, 80%, and 60%). For each scenario, the optimization model determined the optimal cultivated area of individual crops, total irrigation water consumption, net economic profit, and economic water productivity. The comparative evaluation of these indicators enabled identification of the most efficient irrigation management strategy under varying water availability conditions.

3. Results

The optimization results clearly demonstrated that simultaneous optimization of cropping pattern and irrigation scheduling considerably improved both economic and water-use performance under different water management scenarios. The baseline scenario (W100-I5-M100) represented the existing management condition, in which the entire irrigation water requirement was supplied using a five-day irrigation interval without allowable soil water depletion. Under this condition, total irrigation water consumption reached approximately 19.5 million m^3 , resulting in a net economic profit of about 27.9 trillion Rials and an economic water productivity of approximately 1.43 million Rials per cubic meter.

As irrigation management became more restrictive, gradual modifications in the optimal cropping pattern were observed. Rice, the most water-consuming crop in the study area, showed a continuous reduction in cultivated area, whereas the cultivated areas of canola and soybean increased under deficit irrigation scenarios. Citrus orchards experienced only minor changes because perennial crops were constrained by management requirements. These results indicate that the optimization algorithm preferentially reallocates cultivated land toward crops with relatively higher economic returns per unit of consumed water while maintaining the minimum cultivation constraints imposed by the optimization model.

Increasing irrigation intervals from 5 to 10 days together with higher allowable soil moisture depletion (MAD) improved irrigation efficiency by reducing non-beneficial water losses. Consequently, total irrigation water consumption continuously decreased across the evaluated scenarios. Under the most restrictive management condition (W60-I10-M60), irrigation water consumption declined to approximately 10.4 million m^3 , corresponding to a reduction of nearly 46.5% compared with the baseline scenario. Despite this considerable reduction in water use, net economic profit decreased only marginally, indicating that appropriate redistribution of cultivated areas effectively compensated for water shortages through more efficient crop selection.

Economic water productivity exhibited the greatest improvement among all evaluated indicators. While the baseline scenario produced approximately 1.43 million Rials per cubic meter, the optimal scenario increased this value to nearly 2.64 million Rials per cubic meter, representing an improvement of approximately 84.5%. This substantial increase demonstrates that optimization of irrigation scheduling together with cropping pattern adjustment enables significantly greater economic returns from each unit of irrigation water applied.

The optimization process also revealed that moderate deficit irrigation did not necessarily result in proportional reductions in farm profitability. Instead, appropriate combinations of irrigation interval, allowable depletion, and cultivated area redistribution substantially mitigated the economic impacts of water shortages. Such behavior reflects the capability of the Grey Wolf Optimizer to efficiently balance conflicting objectives between maximizing economic benefits and minimizing irrigation water consumption under practical management constraints.

Comparison among the twenty-seven management scenarios indicated that improvements in irrigation efficiency were primarily associated with reduced irrigation water allocation rather than substantial decreases in cultivated land. Total cultivated area remained constant at **3000 ha** in all scenarios, whereas crop composition gradually shifted toward more water-efficient production systems. This finding confirms

that optimization of crop allocation provides greater flexibility for adapting agricultural production to limited water availability than simple reductions in irrigated area.

The superiority of the **W60-I10-M60** scenario suggests that integrated water management strategies combining controlled deficit irrigation, longer irrigation intervals, and optimized crop allocation can substantially improve the sustainability of irrigation systems. Such management strategies simultaneously reduce irrigation withdrawals, preserve agricultural income, and enhance economic water productivity without requiring major structural modifications to existing irrigation infrastructure.

Overall, the results demonstrate that combining crop water requirement estimation, crop yield response modeling, and metaheuristic optimization provides a robust decision-support framework for irrigation management. The developed model successfully identified management scenarios capable of achieving considerable water savings while maintaining acceptable economic performance, thereby offering practical guidance for improving agricultural water allocation under increasing water scarcity conditions

4. Discussion and Conclusion

The present study developed an integrated optimization framework for simultaneous cropping pattern optimization and irrigation scheduling in Unit 1 of the Tajan Irrigation and Drainage Network using the Grey Wolf Optimizer algorithm. The integration of crop water requirement estimation based on the FAO-56 methodology, crop yield response assessment using the Doorenbos and Kassam model, and metaheuristic optimization enabled comprehensive evaluation of irrigation management under multiple water availability conditions. The results demonstrated that coordinated management of cropping pattern and irrigation scheduling significantly improved irrigation performance by reducing water consumption while maintaining satisfactory economic returns.

Among the twenty-seven evaluated scenarios, the W60-I10-M60 scenario was identified as the most efficient management strategy. This scenario substantially reduced irrigation water consumption while achieving the highest economic water productivity through appropriate redistribution of cultivated areas among the studied crops. The optimization results indicated that gradual reduction of rice cultivation together with increased allocation to relatively drought-tolerant and economically efficient crops, including canola and soybean, provided an effective mechanism for adapting agricultural production to limited water availability. Furthermore, extending irrigation intervals and increasing allowable soil moisture depletion enhanced irrigation efficiency without causing unacceptable reductions in net farm income.

The findings highlight the capability of metaheuristic optimization algorithms to support irrigation management decisions under complex agricultural conditions characterized by multiple constraints and conflicting objectives. The developed framework can assist irrigation authorities and agricultural planners in identifying sustainable cropping patterns that maximize economic performance while improving water productivity under future water scarcity scenarios. The methodology presented in this study is also transferable to other irrigation districts with similar climatic and management conditions, providing an effective decision-support tool for sustainable agricultural water resources management.

5. Six important references

- 1) Aboutorabi, H. R., Ramroudi, M., Asgharipour, M. R., & Ghazanfari Moghadam, M. S. (2025). Cropping pattern optimization for rainfed and irrigated lands of Iran: A trade-off between profit and water footprints. *Water and Environment Journal*, 39, e12971.
- 2) Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO.
- 3) Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome: FAO.
- 4) Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61.
- 5) Hacısüleyman, V., & Özger, M. (2024). Multi-objective cropping pattern optimization and comparative assessment with the food–energy–water nexus. *Water Supply*, 24, 4077–4093.
- 6) Su, Z., Zhao, J., Zhuang, M., Liu, Z., Zhao, C., Pullens, J. W. M., Liu, K., Harrison, M. T., & Yang, X. (2024). Climate-adaptive crop distribution can feed food demand, improve water scarcity, and reduce greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, 944, 173819.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere appreciation to the Mazandaran Regional Water Company for providing the data and technical support required for conducting this research. Their valuable cooperation is gratefully acknowledged.



بهینه‌سازی هم‌زمان الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری تحت سناریوهای مختلف تأمین آب با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری: (GWO) مطالعه موردی شبکه آبیاری و زهکشی تجن، ساری

احمد محمدی^۱، علی باقری^۲ و داود اکبری نوده‌ی^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱

مقاله پژوهشی

چکیده

محدودیت روزافزون منابع آب و افزایش رقابت بین بخش‌های مختلف مصرف‌کننده، ضرورت استفاده از روش‌های نوین بهینه‌سازی برای مدیریت هم‌زمان الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری در سامانه‌های کشاورزی را افزایش داده است. هدف این پژوهش، تعیین الگوی کشت و برنامه آبیاری بهینه با هدف افزایش سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب در واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن در شهرستان ساری بود. در این مطالعه، هفت محصول شامل برنج، مرکبات، گندم، جو، کلزا، ذرت علوفه‌ای و سویا در سطح ۳۰۰۰ هکتار مورد بررسی قرار گرفتند. مدل بهینه‌سازی با هدف بیشینه‌سازی سود خالص، تحت محدودیت منابع آب، اراضی قابل کشت و قیود مدیریتی توسعه و الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری (GWO) برای حل مدل به‌کار گرفته شد. به‌منظور بررسی اثر شرایط مختلف مدیریت آب، ۲۷ سناریو شامل سه سطح تأمین آب (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد)، سه دور آبیاری (۵، ۷ و ۱۰ روز) و سه سطح تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) تعریف و ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدیریت تلفیقی الگوی کشت و برنامه آبیاری می‌تواند بدون کاهش محسوس سود اقتصادی، مصرف آب را کاهش دهد. بهترین سناریو، W60-I10-M60، با کاهش ۷/۸۷ درصدی حجم آب مصرفی نسبت به شرایط پایه، موجب افزایش ۰/۳۵ درصدی سود خالص و بهبود ۸/۹۳ درصدی بهره‌وری اقتصادی آب شد. بر اساس نتایج، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای تصمیم‌گیری مدیریتی، تخصیص بهینه منابع آب و افزایش پایداری اقتصادی شبکه‌های آبیاری در شرایط کم‌آبی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی الگوی کشت، برنامه‌ریزی آبیاری، الگوریتم گرگ خاکستری، بهره‌وری اقتصادی آب

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران Mahab.baresh@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران Ali.bagheri@iau.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی آب، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران d.akbari@iau.ac.ir



مقدمه

یکی از مؤثرترین راهکارهای افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی، برنامه‌ریزی علمی آبیاری و تخصیص بهینه منابع آب است. در این فرآیند، مقدار و زمان آبیاری به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که ضمن تأمین نیاز آبی گیاه، از اتلاف آب جلوگیری شده و عملکرد و بازده اقتصادی افزایش یابد. با این حال، وابستگی برنامه‌ریزی آبیاری به عوامل متعددی مانند شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک، نوع محصول و محدودیت منابع آب، آن را به مسئله‌ای پیچیده و چندهدفه تبدیل کرده است که حل آن با روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی همواره با دشواری همراه است (Howell, 2001, Pereira et al., 2002).

علاوه بر مدیریت آبیاری، انتخاب الگوی کشت مناسب نقش مهمی در بهره‌برداری پایدار از منابع آب دارد. در شرایط کمبود آب، روش‌های سنتی توانایی مدیریت هم‌زمان محدودیت‌های منابع و اهداف اقتصادی را ندارند، از این‌رو، استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی برای تعیین هم‌زمان الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری مورد توجه قرار گرفته است (Fereses and Soriano, 2007).

مطالعات اخیر نیز نشان داده‌اند که تلفیق راهبردهای آبیاری ناقص با روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری آب و کاهش اثرات کمبود آب بر تولیدات کشاورزی داشته باشد (Li et al., 2022). از سوی دیگر، انتخاب الگوی کشت مناسب با هماهنگی با منابع آب، شرایط خاک، اقلیم و اهداف اقتصادی، نقش مهمی در کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری دارد. تغییر ترکیب محصولات می‌تواند بر مصرف آب، درآمد کشاورزان و کارایی اقتصادی اثرگذار باشد؛ از این‌رو، در بسیاری از پژوهش‌ها، بهینه‌سازی الگوی کشت هم‌زمان با برنامه‌ریزی آبیاری برای دستیابی به بهره‌برداری پایدار از منابع آب انجام می‌شود (Mirzaei et al., 2022).

پیشرفت علوم رایانه و توسعه روش‌های هوش مصنوعی، زمینه استفاده گسترده از الگوریتم‌های فراابتکاری را در مسائل مهندسی آب فراهم کرده است. الگوریتم‌هایی نظیر

الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization)، الگوریتم کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization)، تکامل تفاضلی (Differential Evolution)، و الگوریتم گرگ خاکستری (Grey Wolf Optimizer) طی دو دهه اخیر در مسائل مختلف مدیریت منابع آب، بهره‌برداری از مخازن، طراحی شبکه‌های آبیاری، تخصیص آب و بهینه‌سازی الگوی کشت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج اغلب این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم‌های فراابتکاری در مقایسه با روش‌های کلاسیک، توانایی بیشتری در حل مسائل پیچیده، غیرخطی و دارای محدودیت‌های متعدد داشته و قادرند در زمان محاسباتی مناسب، پاسخ‌هایی نزدیک به جواب بهینه ارائه دهند (Mirjalili et al., 2014).

عزیز آبادی فرهنگی و میرزایی (۱۴۰۰) به منظور بهینه‌سازی برنامه ریزی آبیاری در شبکه آبیاری دشت قزوین در شرایط مختلف حجم آب در دسترس و برای چند محصول با استفاده از الگوریتم مورچگان انجام دادند. نتایج نشان داد که با اجرای مدل تدوین شده زراعی برنامه آبیاری در زمانی که حجم آب اولیه ۱۰۰ درصد است، دور آبیاری ۸ روز و عمق آب آبیاری ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر به ترتیب برای محصولات پاییزه و بهاره است. شعبانی و همکاران (۱۳۸۷) یک مدل برنامه ریزی آبیاری ارائه دادند که الگوی بهینه کشت را به گونه ای انتخاب می کند که در آن سود حداکثر و میزان آب مصرفی حداقل می شود که از این قابلیت برای تعریف سناریوهای آبیاری برای محصولات مختلف در مدل استفاده می گردد تا بتوان در شرایط محدودیت آب، که امکان تغییر در الگوی کشت نیز از لحاظ اجرایی وجود ندارد، محصولات را به سمت کم آبیاری سوق دهد. Qureshi et al. (2001) با استفاده از مدل SWAP93 و بررسی ترکیب‌های مختلف عمق و فاصله آبیاری برای نیشکر در استان سند پاکستان، گزارش کردند که عمق آبیاری فصلی ۱۶۵۰ میلی‌متر همراه با فاصله آبیاری ۱۵ روز،

از سوی دیگر، بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه بهینه سازی کشاورزی، تنها یک سطح از محدودیت منابع آب یا یک راهبرد آبیاری را مورد بررسی قرار داده اند. همچنین، محدودیت های مدیریتی نظیر حفظ حداقل سطح زیرکشت محصولات راهبردی، کنترل تغییرات سطح زیرکشت باغات و ارزیابی هم زمان اثر دور آبیاری و درصد تخلیه مجاز رطوبت خاک (Management Allowed Depletion; MAD) کمتر در قالب یک چارچوب یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع، به ویژه در شبکه های آبیاری بزرگ که تصمیم گیری هم زمان درباره تخصیص آب، انتخاب الگوی کشت و مدیریت آبیاری اهمیت زیادی دارد، یکی از خلأ های مهم پژوهشی به شمار می رود. در این راستا، خلأ اصلی پژوهش حاضر نه در معرفی یا به کارگیری الگوریتم GWO، بلکه در توسعه یک چارچوب یکپارچه برای تصمیم گیری هم زمان درباره الگوی کشت، میزان آب قابل تخصیص، دور آبیاری و حد مجاز تخلیه رطوبت خاک (MAD) تحت محدودیت های واقعی بهره برداری از شبکه است. در این چارچوب، تصمیم مربوط به سطح زیرکشت هر محصول به صورت مستقل از برنامه آبیاری در نظر گرفته نشده، بلکه تغییرات الگوی کشت و نحوه تخصیص آب به صورت متقابل بر یکدیگر اثر می گذارند. علاوه بر این، اثر سه سطح تأمین آب، سه دور آبیاری و سه سطح MAD در قالب ۲۷ سناریوی مدیریتی ارزیابی شده و هم زمان قیود اجرایی شامل حفظ حداقل سطح زیرکشت شالیزار، محدودیت تغییر سطح باغات مرکبات، محدودیت سطح اراضی و حجم آب قابل تخصیص لحاظ شده است. بنابراین، سهم اصلی این مطالعه، ارائه و ارزیابی یک چارچوب تصمیم گیری یکپارچه و سناریو محور برای شرایط کم آبی است که در آن معیارهای مصرف آب، سود خالص و بهره وری اقتصادی آب به صورت هم زمان برای شناسایی گزینه مدیریتی مناسب مورد استفاده قرار می گیرند. در این ساختار، GWO صرفاً به عنوان ابزار حل مسئله بهینه سازی غیرخطی و چندقیدی به کار گرفته شده است و نوآوری پژوهش به ترکیب ساختاری این مؤلفه های تصمیم گیری و

مناسب ترین برنامه آبیاری از نظر عملکرد محصول و بهره وری مصرف آب است.

(Shahverdi and Maestre, 2022) با توسعه الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) برای زمان بندی توزیع آب در شبکه آبیاری دز، عملکرد این الگوریتم را در شرایط عادی و کمبود آب ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که GWO در شرایط بهره برداری عادی با همگرایی مناسب، توزیع آب را با دقت، عدالت و قابلیت اطمینان مطلوب انجام داده و عملکرد آن با روش یادگیری فازی SARSA قابل رقابت است، هرچند در شرایط کمبود شدید آب کارایی آن کاهش می یابد.

Wu et al. (2024) یک مدل چندهدفه برای بهینه سازی الگوی کشت در یک منطقه آبیاری با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) ارائه کردند. در این مدل، اهداف منابع آب، اقتصادی و اجتماعی به صورت هم زمان در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که الگوریتم GWO با ارائه ساختار کشت بهینه، مصرف آب آبیاری را کنترل کرده، درآمد خالص کشاورزان و تولید محصول را افزایش داده و عملکردی بهتر از سایر روش های بهینه سازی مورد مقایسه ارائه کرده است. در میان الگوریتم های فراابتکاری، الگوریتم گرگ خاکستری (Grey Wolf Optimizer; GWO) که توسط Mirjalili et al. (2014) معرفی شد، به دلیل ساختار ساده، تعداد اندک پارامترهای تنظیمی، سرعت همگرایی مناسب و توانایی ایجاد تعادل بین مراحل اکتشاف (Exploration) و بهره برداری (Exploitation)، به یکی از الگوریتم های پرکاربرد در مسائل بهینه سازی مهندسی تبدیل شده است. با وجود پیشرفت های اخیر در زمینه مدیریت آبیاری و بهینه سازی الگوی کشت، اغلب مطالعات این دو مؤلفه را به صورت مستقل بررسی کرده اند؛ در حالی که وابستگی متقابل آن ها ایجاب می کند به صورت هم زمان بهینه شوند. از این رو، توسعه مدل های یکپارچه برای بهینه سازی هم زمان الگوی کشت و برنامه ریزی آبیاری، یکی از نیازهای مهم مدیریت پایدار منابع آب کشاورزی محسوب می شود.



آبریز تجن تقریباً بین طول‌های جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار دارد. این شبکه یکی از مهم‌ترین سامانه‌های آبیاری شمال کشور بوده و آب مورد نیاز اراضی کشاورزی را از رودخانه تجن تأمین می‌کند. محصولات اصلی منطقه شامل برنج، گندم، کلزا، سویا، ذرت و باغ‌های مرکبات هستند که به دلیل تفاوت در نیاز آبی و ارزش اقتصادی، شرایط مناسبی برای ارزیابی مدل بهینه‌سازی فراهم می‌کنند (شکل ۱).

داده‌های مورد استفاده

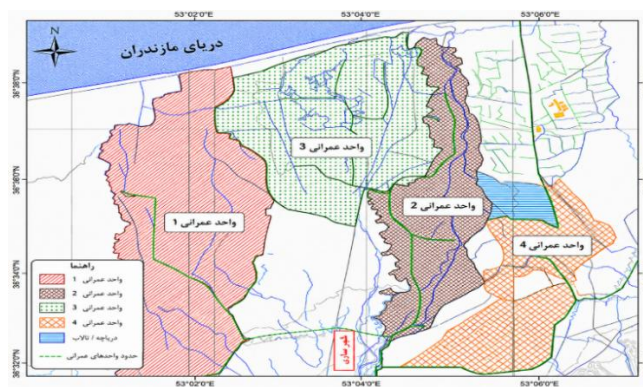
به‌منظور توسعه مدل بهینه‌سازی، از داده‌های اقلیمی، زراعی، هیدرولیکی و اقتصادی استفاده شد. داده‌های روزانه هواشناسی شامل بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی از ایستگاه سینوپتیک ساری برای دوره آماری ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۳ تهیه شد. این داده‌ها برای برآورد نیاز آبی محصولات و محاسبه شاخص‌های مورد نیاز مدل مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات مربوط به ویژگی‌های خاک، وضعیت سامانه آبیاری و مشخصات اراضی از گزارش‌های مطالعاتی واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن استخراج شد.

کاربرد آن در مقیاس شبکه آبیاری و زهکشی تجن مربوط می‌شود. در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) برای بهینه‌سازی هم‌زمان الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری تحت سه سطح تأمین آب، سه دور آبیاری و سه سطح تخلیه مجاز رطوبت خاک توسعه داده شد. همچنین، محدودیت‌هایی مانند حداقل سطح زیرکشت شالیزار، دامنه تغییرات باغات مرکبات و منابع آب قابل تخصیص در مدل لحاظ شد تا نتایج از قابلیت اجرایی مناسبی برخوردار باشند. هدف این پژوهش، ارزیابی اثر سناریوهای مختلف بر الگوی کشت، مصرف آب، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب و تعیین مناسب‌ترین سناریوی مدیریتی است. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری در زمینه تخصیص بهینه آب و مدیریت شبکه‌های آبیاری در شرایط محدودیت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از شبکه آبیاری و زهکشی تجن در شهرستان ساری، استان مازندران است که به‌منظور اجرای مدل بهینه‌سازی، محدوده‌ای واحد عمرانی یک به وسعت ۳۰۰۰ هکتار انتخاب شد. موقعیت جغرافیایی حوضه



شکل (۱): محدوده مورد مطالعه واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن

وزارت جهاد کشاورزی و قیمت‌های مصوب و متداول سال زراعی ۱۴۰۴ گردآوری شد. هزینه‌های تولید هر محصول شامل هزینه‌های متغیر و مستقیم تولید، از جمله تهیه بذر

همچنین، اطلاعات مربوط به محصولات شامل سطح زیرکشت، نیاز آبیاری، هزینه تولید و قیمت فروش از آمارهای رسمی سازمان جهاد کشاورزی استان مازندران،



محاسبات مدل به کار گرفته شد. پارامترهای زراعی، نیاز آبی و عملکردی محصولات مورد مطالعه که به عنوان داده‌های ورودی مدل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این جدول شامل سطح زیرکشت، نیاز خالص آبی، آب آبیاری اعمال شده، عملکرد پتانسیل، عملکرد واقعی و ضریب حساسیت عملکرد به تنش آبی (Ky) برای محصولات منتخب منطقه مطالعه است. مقادیر ارائه شده بر اساس نتایج محاسبات نرم افزار CROPWAT، داده‌های اقلیمی منطقه، اطلاعات مدیریت زراعی و ضرایب استاندارد ارائه شده توسط فائو (Allen et al., 1998; Doorenbos & Kassam, 1979) استخراج و به عنوان پارامترهای پایه در مدل بهینه‌سازی الگوی کشت مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نبود داده‌های مستقل مزرعه‌ای، اعتبارسنجی مستقیم امکان پذیر نبود. در نسخه اصلاح شده، مبانی مدل بر FAO-56 و رابطه پاسخ عملکرد به آب تصریح و خروجی‌های نیاز آبی و عملکرد با مقادیر گزارش شده در منابع معتبر فائو و مطالعات منطقه‌ای از نظر دامنه و روند مقایسه شدند.

علاوه بر پارامترهای زراعی و هیدرولوژیکی، اجرای مدل بهینه‌سازی نیازمند اطلاعات اقتصادی هر محصول شامل هزینه تولید، قیمت فروش، سطح زیرکشت موجود و حجم آب آبیاری اعمال شده بود. این پارامترها به عنوان ورودی تابع هدف و قیود مدل مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات فنی و اقتصادی محصولات مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

مدل بهینه‌سازی

به منظور تعیین هم‌زمان الگوی کشت و برنامه‌ریزی آبیاری، یک مدل بهینه‌سازی غیرخطی توسعه داده شد. در این مدل، متغیرهای تصمیم شامل سطح زیرکشت هر محصول و میزان آب تخصیصی به آن بوده و هدف، بیشینه‌سازی سود خالص حاصل از فعالیت‌های کشاورزی در واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجمیع است.

یا نهال، کود و سموم، آماده‌سازی و عملیات خاک‌ورزی، کاشت، داشت، برداشت، نیروی کار، ماشین‌آلات و هزینه‌های مرتبط با آبیاری در نظر گرفته شد. برای باغات مرکبات، هزینه‌های مربوط به نگهداری و بهره‌برداری باغ نیز لحاظ گردید. این هزینه‌ها به صورت ریالی برای هر هکتار محاسبه و در تابع هدف مدل به منظور تعیین سود خالص وارد شدند. در این پژوهش، هفت محصول اصلی شامل شالیزار، مرکبات، گندم، جو، ذرت علوفه‌ای، سویا و کلزا با مجموع سطح زیرکشت ۳۰۰۰ هکتار مورد بررسی قرار گرفتند. مشخصات زراعی و اقتصادی محصولات مورد استفاده در مدل در جدول ۱ ارائه شده است.

برآورد نیاز آبی محصولات

نیاز آبی محصولات بر اساس روش ارائه شده در نشریه FAO-56 محاسبه شد. در این روش، ابتدا تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) با استفاده از معادله پنمن-مانتیت فائو محاسبه و سپس با اعمال ضریب گیاهی (K_c)، تبخیر و تعرق واقعی محصول (ET_c) برای هر مرحله رشد برآورد شد (Alle et al, 1998).

بارندگی مؤثر نیز از بارندگی کل کسر و نیاز خالص آبیاری به صورت رابطه ۱ محاسبه شد.

$$IR = ET_c \times P_e \quad (1)$$

که در آن: IR_n نیاز خالص آبیاری و P_e بارندگی مؤثر می‌باشد. به منظور برآورد کاهش عملکرد ناشی از کمبود آب، از مدل پاسخ عملکرد به آب استفاده شد. این مدل رابطه بین کاهش نسبی عملکرد و کاهش تبخیر و تعرق را به صورت رابطه ۲ بیان می‌کند (Doorenbos and Kassam, 1979).

$$\frac{Y_a}{Y_p} = 1 - K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_p}\right) \quad (2)$$

که در آن:

Y_a : عملکرد واقعی (کیلوگرم)، Y_p : عملکرد ماکزیمم (کیلوگرم)، K_y : فاکتور حساسیت گیاه، ET_a و ET_p به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی و ماکزیمم می‌باشد. مقادیر ضریب گیاهی (K_c)، ضریب حساسیت عملکرد (K_y) و سایر پارامترهای زراعی از منابع فائو استخراج و در



تابع هدف

زیرکشت، I_i مقدار آب تخصیصی و C_w هزینه واحد آب آبیاری است.

قیود مدل

مدل بهینه‌سازی تحت محدودیت‌های منابع آب، اراضی قابل کشت و الزامات مدیریتی اجرا شد.

هدف مدل، بیشینه‌سازی سود خالص کل شبکه آبیاری البرز با در نظر گرفتن درآمد حاصل از فروش محصولات، هزینه‌های تولید و هزینه مصرف آب است. تابع هدف به صورت رابطه (۳) تعریف شد.

$$\max Z = \sum_{i=1}^n (P_i Y_i A_i - C_i) - C_w \sum_{i=1}^n A_i I_i \quad (3)$$

که در آن، Z سود خالص کل شبکه، P_i قیمت فروش محصول، Y_i عملکرد واقعی، C_i هزینه تولید، A_i سطح

جدول (۱) پارامترهای پایه زراعی، نیاز آبی و عملکرد محصولات مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی الگوی کشت واحد عمرانی ۱ شبکه

آبیاری و زهکشی تجن

محصول	سطح زیرکشت (هکتار)	آب خالص (میلی‌متر)	بارندگی مؤثر (میلی‌متر)	نیاز خالص آبی (میلی‌متر)	عملکرد پتانسیل (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد واقعی (کیلوگرم در هکتار)	ضریب حساسیت به تنش (Ky)
شالیزار	۱۳۲۰	۱۲۱۰	۲۴۶	۹۶۴	۱۱۰۰	۷۵۰۰	۱/۲۰
مرکبات	۱۰۸۰	۵۸۰	۱۶۷	۴۱۳	۴۵۰	۳۲۰۰۰	۰/۹۰
گندم	۱۲۰	۳۹۵	۷۰	۳۲۵	۳۶۰	۵۲۰۰	۱/۱۵
جو	۱۲۰	۳۲۰	۷۴	۲۴۶	۲۸۰	۴۵۰۰	۱/۰۵
ذرت	۱۲۰	۴۶۰	۷۹	۳۸۱	۴۲۰	۶۰۰۰۰	۱/۲۵
علوفه‌ای							
سویا	۱۲۰	۳۵۰	۶۶	۲۸۴	۳۲۰	۴۰۰۰	۰/۸۵
کلزا	۱۲۰	۴۱۰	۶۵	۳۴۵	۳۸۰	۳۶۰۰	۱/۰۰

جدول (۲): پارامترهای فنی و اقتصادی محصولات مورد استفاده در مدل بهینه‌سازی الگوی کشت واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن

عنوان	شالیزار	باغات مرکبات	گندم	جو	ذرت علوفه‌ای	سویا	کلزا
سطح زیرکشت (هکتار)	۱۳۲۰	۱۰۸۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰
آب آبیاری اعمال شده (مترمکعب در هکتار)	۱۱۰۰۰	۴۳۶۰	۱۶۰۰	۱۶۰۰	۵۷۴۰	۵۶۰۰	۱۲۶۰
هزینه تولید (میلیون ریال در هکتار)	۹۰۰	۷۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۵۵۰	۵۰۰	۴۲۰
قیمت فروش (هزار ریال بر کیلوگرم)	۹۳۱	۳۲۹	۲۲۴	۱۴۸	۱۳۱	۴۷۱	۴۴۹

$$0.9 A_{\text{Rice.citrus}} \leq A_{\text{Rice}} \text{ and } A_{\text{citrus}} \leq 1.1 A_{\text{Rice.citrus}} \quad (6)$$

به دلیل ماهیت دائمی باغ‌های مرکبات، و این که برنج منبع تامین اقتصادی اکثر کشاورزان منطقه می‌باشد سطح زیرکشت آن در محدوده ده درصد مقدار موجود ثابت در نظر گرفته شد.

شرط نامنفی بودن

مهم‌ترین قیود مدل در روابط ۴ تا ۷ ارائه گردید.

محدودیت زمین

$$\sum_i^7 A_i \leq 3000 \quad (4)$$

محدودیت منابع آب

$$\sum_{i=1}^7 A_i I_i \leq I_{\text{Available}} \quad (5)$$

محدودیت سطح زیرکشت مرکبات و برنج

از آن‌ها به‌طور مستقل اجرا شد. روند تشکیل سناریوها و اجرای مدل در شکل ۲ ارائه شده است. در تمامی سناریوها، شرایط اقلیمی، ویژگی‌های خاک، پارامترهای زراعی و اطلاعات اقتصادی ثابت در نظر گرفته شد و تنها میزان آب قابل تخصیص و پارامترهای مدیریتی آبیاری تغییر یافتند. این رویکرد امکان بررسی اثر هم‌زمان محدودیت منابع آب و راهبردهای مختلف آبیاری بر الگوی کشت، مصرف آب، سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب را فراهم کرد.

الگوریتم گرگ خاکستری (Grey Wolf Optimizer, GWO)

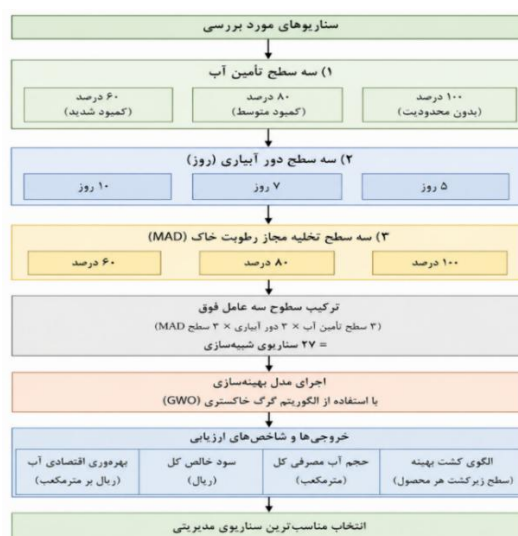
در الگوریتم GWO، جمعیت گرگ‌ها بر اساس کیفیت پاسخ در چهار گروه آلفا، بتا، (دلتا) و امگا (ω) طبقه‌بندی می‌شوند. گرگ آلفا بهترین جواب موجود را در اختیار دارد و فرآیند جستجو را هدایت می‌کند. گرگ‌های بتا و دلتا به‌ترتیب دومین و سومین پاسخ برتر را تشکیل داده و در هدایت سایر اعضای جمعیت مشارکت می‌کنند، در حالی که گرگ‌های امگا سایر اعضای جمعیت را تشکیل می‌دهند و موقعیت خود را بر اساس سه گرگ برتر به‌روزرسانی می‌کنند.

$$A_i \geq 0, I_i \geq 0 \quad (7)$$

که در آن AT کل اراضی قابل کشت، IAvailable حجم آب قابل تخصیص در هر سناریو و $A_{Rice.citrus}$ به ترتیب سطح زیر کشت برنج و مرکبات است.

تعریف سناریوهای شبیه‌سازی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل در شرایط مختلف مدیریت آب، سه سطح تأمین آب، سه دور آبیاری و سه سطح تخلیه مجاز رطوبت خاک (Management Allowable Depletion; MAD) در نظر گرفته شد. ترکیب این عوامل منجر به تعریف ۲۷ سناریوی مدیریتی گردید که در هر یک، مدل بهینه‌سازی به‌طور مستقل اجرا شد. سناریوهای تأمین آب شامل سه سطح ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد حجم آب پایه بودند که به‌ترتیب شرایط بدون محدودیت، محدودیت متوسط و محدودیت شدید منابع آب را شبیه‌سازی کردند. همچنین، دوره‌های آبیاری ۵، ۷ و ۱۰ روز و مقادیر MAD برابر با ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد به‌عنوان راهبردهای مختلف مدیریت آبیاری در مدل اعمال شدند. به‌منظور ارزیابی اثر هم‌زمان میزان تأمین آب، دور آبیاری و سطح تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD)، ۲۷ سناریوی مدیریتی تعریف و مدل بهینه‌سازی برای هر یک



شکل (۲): روند تعریف سناریوهای مدیریتی و اجرای مدل بهینه‌سازی در واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن

فرآیند شکار در الگوریتم شامل سه مرحله اصلی ردیابی شکار، محاصره و حمله نهایی است. موقعیت هر گرگ در هر



اجرای مستقل با مقداردهی اولیه تصادفی اجرا شد و بهترین جواب حاصل به عنوان راه حل نهایی انتخاب گردید.

به منظور دستیابی به تعادل مناسب بین اکتشاف (Exploration) و بهره‌برداری (Exploitation)، پارامتر کنترلی a مطابق ساختار استاندارد الگوریتم به صورت خطی از مقدار ۲ در ابتدای فرآیند جستجو به مقدار صفر در پایان تکرارها کاهش یافت. اندازه جمعیت الگوریتم برابر با ۵۰ و حداکثر تعداد تکرارها ۲۰۰ در نظر گرفته شد.

شاخص‌های ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی اقتصادی مصرف آب در سناریوهای مختلف، شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (Water Productivity; WP) محاسبه شد. این شاخص از نسبت سود خالص حاصل از تولیدات کشاورزی به حجم کل آب آبیاری مصرف شده در شبکه به دست می‌آید و بیانگر ارزش اقتصادی ایجاد شده به ازای هر واحد آب مصرفی است. مقدار بیشتر این شاخص نشان‌دهنده استفاده کارآمدتر از منابع آب و بازده اقتصادی بالاتر سیستم کشاورزی است. رابطه (۱۲) بدست می‌آید.

$$W_p = \frac{N_p}{A_w} \quad (12)$$

که در آن: W_p : بهره‌وری اقتصادی آب (هزار ریال بر مترمکعب)، N_p : سود خالص حاصل از الگوی کشت (میلیارد ریال) و A_w : حجم کل آب آبیاری مصرف شده در شبکه (میلیون مترمکعب) می‌باشد.

همچنین، تغییرات الگوی کشت در هر سناریو نسبت به شرایط پایه بررسی و اثر آن بر مصرف آب و سود اقتصادی تحلیل شد. در نهایت، مناسب‌ترین سناریوی مدیریتی بر اساس بیشترین سود خالص، کمترین مصرف آب و بیشترین بهره‌وری اقتصادی آب انتخاب گردید.

نتایج و بحث

تغییرات الگوی کشت در سناریوهای مختلف مدیریت آب

تکرار با استفاده از روابط ۸ تا ۱۱ به روزرسانی می‌شود.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot X_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (8)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (9)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (10)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (11)$$

در روابط بالا t برابر تکرار الگوریتم، بردارهای A و C ضرایب بردار مکان طعمه و X بردار مکان گرگ خاکستری است. a به صورت خطی و در طی تکرارها از مقدار ۲ به صفر کاهش می‌یابد. r_1 و r_2 بردارهای تصادفی در بازه $(0/1)$ هستند.

پیاده‌سازی الگوریتم GWO در مدل بهینه‌سازی

در این پژوهش، الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری در محیط MATLAB R2024a برای حل مدل بهینه‌سازی الگوی کشت توسعه داده شد. در این الگوریتم، هر گرگ بیانگر یک راه حل ممکن شامل سطح زیرکشت محصولات و میزان آب تخصیص یافته به هر محصول است. کیفیت هر راه حل بر اساس مقدار تابع هدف، یعنی بیشینه‌سازی سود خالص کل، ارزیابی شد و محدودیت‌های مدل شامل حجم آب قابل تخصیص، مساحت اراضی، حداقل سطح زیرکشت شالیزار و محدودیت تغییرات باغات مرکبات در فرآیند ارزیابی اعمال گردید. در هر تکرار، پس از محاسبه مقدار تابع هدف برای تمامی اعضای جمعیت، سه پاسخ برتر به عنوان گرگ‌های آلفا (α)، بتا (β) و دلتا (δ) انتخاب شدند و سایر گرگ‌ها (w) موقعیت خود را بر اساس این سه رهبر به روزرسانی کردند. در پیاده‌سازی الگوریتم GWO، موقعیت اولیه گرگ‌ها به صورت تصادفی و در محدوده مجاز متغیرهای تصمیم تعیین شد. در هر تکرار، مقدار تابع هدف پس از اعمال قیود مدل برای تمامی گرگ‌ها محاسبه شد. معیار توقف شامل رسیدن به حداکثر ۲۰۰ تکرار یا عدم بهبود معنادار تابع هدف در تکرارهای متوالی بود. به منظور بررسی پایداری نتایج، الگوریتم برای هر سناریو در ۱۰

شرایط، سطح زیرکشت کلزا از ۱۲۰ به ۱۵۵ هکتار افزایش یافت (۲۹/۲ درصد)، در حالی که ذرت علوفه‌ای و سویا نیز به ترتیب از ۱۲۰ به ۱۵۷ و ۱۵۸ هکتار رسیدند. در مقابل، سطح زیرکشت گندم و جو از ۱۲۰ به ۱۰۰ هکتار کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد که حتی در شرایط عدم محدودیت حجم آب، افزایش فاصله بین نوبت‌های آبیاری سبب انتقال تدریجی بخشی از اراضی به سمت محصولات با انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به تنش رطوبتی شده است. با کاهش تأمین آب به ۸۰ درصد، شدت تغییرات افزایش یافت. در سناریوی W80-I5-M100 سطح زیرکشت شالیزار به ۱۲۰۰ هکتار کاهش یافت که نسبت به شرایط پایه ۱۲۰ هکتار (۹/۱ درصد) کمتر است. این روند در سناریوی W80-I10-M60 ادامه یافته و سطح زیرکشت شالیزار به ۱۰۵۶ هکتار رسید که نسبت به سناریوی پایه ۲۶۴ هکتار (۲۰ درصد) کاهش نشان می‌دهد. در مقابل، سطح زیرکشت کلزا به ۲۷۰ هکتار افزایش یافت که ۱۲۵ درصد بیشتر از مقدار اولیه است. همچنین ذرت علوفه‌ای از ۱۲۰ به ۲۲۲ هکتار (۸۵ درصد افزایش) و سویا از ۱۲۰ به ۲۳۲ هکتار (۹۳ درصد افزایش) رسیدند. در این گروه از سناریوها، سطح زیرکشت گندم و جو به ۵۰ هکتار کاهش یافت که نسبت به وضعیت پایه ۵۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی اثر هم‌زمان محدودیت منابع آب، دور آبیاری و مقدار تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) بر الگوی کشت، تعداد ۲۷ سناریو مدیریتی شامل سه سطح تأمین آب (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد)، سه دور آبیاری (۵، ۷ و ۱۰ روز) و سه سطح MAD (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است. در تمامی سناریوها، مجموع سطح زیرکشت برابر ۳۰۰۰ هکتار ثابت نگه داشته شد و تنها ترکیب محصولات به گونه‌ای تغییر یافت که تابع هدف مدل، یعنی حداکثرسازی سود خالص تحت محدودیت منابع آب، بیشینه شود. در سناریوی پایه (W100-I5-M100)، که بیانگر تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، دور آبیاری ۵ روزه و MAD برابر ۱۰۰ درصد است، سطح زیرکشت شالیزار ۱۳۲۰ هکتار، باغات مرکبات ۱۰۸۰ هکتار و هر یک از محصولات گندم، جو، کلزا، ذرت علوفه‌ای و سویا ۱۲۰ هکتار تعیین شد. این سناریو به عنوان مبنای مقایسه سایر گزینه‌های مدیریتی در نظر گرفته شد. در گروه سناریوهای تأمین کامل آب (۱۰۰ درصد)، تغییرات الگوی کشت نسبتاً محدود بود، اما روندی مشخص مشاهده شد. با افزایش دور آبیاری از ۵ به ۱۰ روز و کاهش MAD از ۱۰۰ به ۶۰ درصد، سطح زیرکشت شالیزار از ۱۳۲۰ به ۱۲۳۰ هکتار کاهش یافت که معادل ۹۰ هکتار (۶/۸ درصد) است. در همین



جدول (۳): الگوی کشت بهینه حاصل از اجرای الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) در سناریوهای مختلف مدیریت آب

سناریو	(%) تأمین آب	دور آبیاری (روز)	MAD (%)	شالیزار	باغات مرکبات	گندم	جو	کلزا	ذرت علوفه‌ای	سویا	جمع (هکتار)
W100-I5-M100	۱۰۰	۵	۱۰۰	۱۳۲۰	۱۰۸۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۳۰۰۰
W100-I5-M80	۱۰۰	۵	۸۰	۱۳۱۰	۱۰۸۲	۱۱۸	۱۱۸	۱۲۲	۱۲۵	۱۲۵	۳۰۰۰
W100-I5-M60	۱۰۰	۵	۶۰	۱۳۰۰	۱۰۸۵	۱۱۵	۱۱۵	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۰	۳۰۰۰
W100-I7-M100	۱۰۰	۷	۱۰۰	۱۲۹۰	۱۰۸۸	۱۱۲	۱۱۲	۱۳۰	۱۳۴	۱۳۴	۳۰۰۰
W100-I7-M80	۱۰۰	۷	۸۰	۱۲۸۰	۱۰۹۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۳۵	۱۳۷	۱۳۸	۳۰۰۰
W100-I7-M60	۱۰۰	۷	۶۰	۱۲۷۰	۱۰۹۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۴۰	۱۴۰	۱۴۱	۳۰۰۰
W100-I10-M100	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۱۲۶۰	۱۰۹۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۴۵	۱۴۵	۱۴۵	۳۰۰۰
W100-I10-M80	۱۰۰	۱۰	۸۰	۱۲۴۵	۱۰۹۸	۱۰۲	۱۰۲	۱۵۰	۱۵۱	۱۵۲	۳۰۰۰
W100-I10-M60	۱۰۰	۱۰	۶۰	۱۲۳۰	۱۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۵	۱۵۷	۱۵۸	۳۰۰۰
W80-I5-M100	۸۰	۵	۱۰۰	۱۲۰۰	۱۰۹۵	۹۰	۹۰	۱۸۰	۱۷۰	۱۷۵	۳۰۰۰
W80-I5-M80	۸۰	۵	۸۰	۱۱۸۵	۱۰۹۸	۸۵	۸۵	۱۹۰	۱۷۷	۱۸۰	۳۰۰۰
W80-I5-M60	۸۰	۵	۶۰	۱۱۷۰	۱۱۰۰	۸۰	۸۰	۲۰۰	۱۸۳	۱۸۷	۳۰۰۰
W80-I7-M100	۸۰	۷	۱۰۰	۱۱۵۵	۱۱۰۳	۷۵	۷۵	۲۱۰	۱۸۸	۱۹۴	۳۰۰۰
W80-I7-M80	۸۰	۷	۸۰	۱۱۴۰	۱۱۰۵	۷۰	۷۰	۲۲۰	۱۹۴	۲۰۱	۳۰۰۰
W80-I7-M60	۸۰	۷	۶۰	۱۱۲۵	۱۱۰۸	۶۵	۶۵	۲۳۰	۲۰۰	۲۰۷	۳۰۰۰
W80-I10-M100	۸۰	۱۰	۱۰۰	۱۱۱۰	۱۱۱۰	۶۰	۶۰	۲۴۰	۲۰۵	۲۱۵	۳۰۰۰
W80-I10-M80	۸۰	۱۰	۸۰	۱۰۸۵	۱۱۱۵	۵۵	۵۵	۲۵۵	۲۱۳	۲۲۲	۳۰۰۰
W80-I10-M60	۸۰	۱۰	۶۰	۱۰۵۶	۱۱۲۰	۵۰	۵۰	۲۷۰	۲۲۲	۲۳۲	۳۰۰۰
W60-I5-M100	۶۰	۵	۱۰۰	۱۰۵۶	۱۱۱۰	۴۵	۴۵	۲۹۰	۲۲۰	۲۳۴	۳۰۰۰
W60-I5-M80	۶۰	۵	۸۰	۱۰۵۶	۱۱۱۵	۴۰	۴۰	۳۰۰	۲۲۰	۲۲۹	۳۰۰۰
W60-I5-M60	۶۰	۵	۶۰	۱۰۵۶	۱۱۲۰	۳۵	۳۵	۳۱۰	۲۲۰	۲۲۴	۳۰۰۰
W60-I7-M100	۶۰	۷	۱۰۰	۱۰۵۶	۱۱۲۵	۳۰	۳۰	۳۲۰	۲۲۰	۲۱۹	۳۰۰۰
W60-I7-M80	۶۰	۷	۸۰	۱۰۵۶	۱۱۳۰	۲۵	۲۵	۳۳۰	۲۲۰	۲۱۴	۳۰۰۰
W60-I7-M60	۶۰	۷	۶۰	۱۰۵۶	۱۱۳۵	۲۰	۲۰	۳۴۰	۲۲۰	۲۰۹	۳۰۰۰
W60-I10-M100	۶۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۵۶	۱۱۴۰	۱۵	۱۵	۳۵۰	۲۲۰	۲۰۴	۳۰۰۰
W60-I10-M80	۶۰	۱۰	۸۰	۱۰۵۶	۱۱۴۵	۱۰	۱۰	۳۶۰	۲۲۰	۱۹۹	۳۰۰۰
W60-I10-M60	۶۰	۱۰	۶۰	۱۰۵۶	۱۱۵۰	۵	۵	۳۷۰	۲۲۰	۱۹۴	۳۰۰۰

سناریوها به صورت W-I-M تعریف شده است؛ به طوری که W نشان‌دهنده درصد تأمین آب (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد)، I نشان‌دهنده دور آبیاری (۵، ۷ و ۱۰ روز) و M بیانگر سطح MAD (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) می‌باشد. به عنوان مثال، سناریوی W60-I10-M60 نشان‌دهنده تأمین ۶۰ درصد آب مورد نیاز، دور آبیاری ۱۰ روزه و MAD برابر ۶۰ درصد است.

رعایت شد. رفتار باغات مرکبات نیز متفاوت از سایر محصولات بود. سطح زیرکشت این محصول از ۱۰۸۰ هکتار در سناریوی پایه به ۱۱۵۰ هکتار در سناریوی W60-I10-M60 افزایش یافت. یعنی حدود ۷۰ هکتار (۶/۵ درصد) رشد. این نتیجه بیانگر آن است که مدل، با توجه به دائمی بودن باغات، هزینه بالایی حذف و جایگزینی و ارزش اقتصادی آن‌ها، از کاهش سطح زیرکشت این کاربری

شدیدترین تغییرات مربوط به سناریوهای ۶۰ درصد تأمین آب بود. در این شرایط، سطح زیرکشت شالیزار در تمامی سناریوها روی مقدار ۱۰۵۶ هکتار ثابت باقی ماند. این موضوع نشان می‌دهد که مقدار مذکور به عنوان حداقل سطح مجاز کشت برنج در مدل تعریف شده و الگوریتم، حتی در شدیدترین شرایط کمبود آب نیز از این حد پایین‌تر نرفته است. بنابراین، قید مدیریتی حفظ حداقل سطح زیرکشت شالیزار به طور کامل

هم‌زمان آب و سطح زیرکشت، موجب انتقال اراضی به سمت محصولاتی با ارزش اقتصادی بالاتر و افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌شود. همچنین Kuo et al. (2006) گزارش کردند که تعیین دقیق نیاز آبی محصولات و اصلاح الگوی کشت، یکی از مؤثرترین راهکارهای افزایش راندمان بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری است. نتایج این پژوهش با مطالعات داخلی نیز همخوانی دارد. به‌طوری‌که نجفی و همکاران (۱۳۹۵)، یوسفی و همکاران (۱۳۹۵) و عزیزآبادی فراهانی و میرزایی (۱۴۰۰) نیز نشان دادند که ترکیب روش‌های بهینه‌سازی با مدیریت الگوی کشت، ضمن حفظ درآمد کشاورزان، بهره‌وری مصرف آب را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که تغییر راهبرد مدیریت آب و اصلاح الگوی کشت، علاوه بر کاهش مصرف آب، می‌تواند بر سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب اثرگذار باشد. در این مطالعه، سناریوی W100-I5-M100 به‌عنوان شرایط پایه در نظر گرفته شد که در آن حجم آب مصرفی برابر ۲۱/۱۲ میلیون مترمکعب، سود خالص ۱۸۹۱۵ میلیارد ریال و بهره‌وری اقتصادی آب ۸۹۵/۳۷ هزار ریال بر مترمکعب به‌دست آمد. با افزایش فاصله آبیاری از ۵ به ۷ و ۱۰ روز در شرایط تأمین کامل آب (سناریوهای گروه W100)، حجم آب مصرفی به‌تدریج کاهش یافت. به‌طوری‌که در سناریوی W100-I10-M60 حجم آب مصرفی به ۲۰/۶۳ میلیون مترمکعب رسید که نشان‌دهنده کاهش ۲/۳۶ درصدی مصرف آب نسبت به شرایط پایه است. هم‌زمان، سود خالص در این سناریو برابر ۱۸۹۰۳ میلیارد ریال بود که تنها ۰/۰۶ درصد کاهش نسبت به حالت پایه نشان داد. این رفتار بیانگر آن است که افزایش فاصله آبیاری، در محدوده مشخص، موجب کاهش مصرف آب بدون ایجاد افت محسوس اقتصادی می‌شود. افزایش بهره‌وری اقتصادی آب نیز در این سناریو به ۹۱۶/۳۹ هزار ریال بر مترمکعب رسید که نسبت به حالت پایه ۲/۳۵ درصد افزایش داشت. در شرایط محدودیت متوسط آب (تأمین ۸۰ درصد نیاز آبی)، تغییرات اقتصادی شدیدتر مشاهده شد. در سناریوی W80-I10-M60 حجم آب

جلوگیری کرده است. در مقابل، کلزا بیشترین افزایش سطح زیرکشت را تجربه کرد؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۱۲۰ به ۳۷۰ هکتار رسید که معادل ۲۰۸ درصد افزایش نسبت به سناریوی پایه است. ذرت علوفه‌ای نیز با افزایش از ۱۲۰ به ۲۲۰ هکتار (۸۳ درصد افزایش) و سویا با افزایش از ۱۲۰ به ۱۹۴ هکتار (۶۲ درصد افزایش) سهم بیشتری از اراضی را به خود اختصاص دادند. در مقابل، سطح زیرکشت گندم و جو در پایان دوره به ۵ هکتار کاهش یافت که نسبت به مقدار اولیه بیش از ۹۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این تغییر بیانگر آن است که در تابع هدف مدل، این دو محصول در شرایط کمبود آب از نظر اقتصادی توان رقابت کمتری نسبت به کلزا، سویا و ذرت علوفه‌ای داشتند. به‌طور کلی، نتایج جدول ۳ سه الگوی مدیریتی مشخص را آشکار می‌سازد. نخست، با افزایش شدت محدودیت منابع آب، سهم محصولات با نیاز آبی بالا، به‌ویژه شالیزار، کاهش یافته است. دوم، سطح زیرکشت باغات مرکبات تقریباً ثابت باقی مانده یا افزایش محدودی یافته که ناشی از ماهیت دائمی این کاربری است. سوم، منابع آب آزادشده عمدتاً به محصولاتی مانند کلزا، ذرت علوفه‌ای و سویا اختصاص یافته که از دیدگاه مدل، نسبت سود به مصرف آب بالاتری دارند. این نتایج با مطالب ارائه‌شده در FAO-56 توسط Allen et al. (1998) همخوانی دارد. آنان بیان کردند که در شرایط محدودیت منابع آب، تخصیص بهینه آب مستلزم انتقال تدریجی اراضی از محصولات با نیاز آبی بالا به محصولات با بهره‌وری اقتصادی بیشتر است. همچنین معادله تغییرات عملکرد به آب ارائه‌شده توسط Doorenbos and Kassam. (1979) محصولات دارای ضریب حساسیت عملکرد (Ky) بالاتر، در صورت کاهش تبخیر و تعرق واقعی، افت عملکرد بیشتری خواهند داشت. از این رو کاهش سطح زیرکشت این محصولات در شرایط کمبود آب از نظر اقتصادی قابل توجیه است. نتایج پژوهش حاضر همچنین با مطالعات محققین دیگر همسو است (Nguyen et al. 2016, 2017) نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری در تخصیص



مصرفی به ۱۹/۵۷ میلیون مترمکعب کاهش یافت که معادل ۷/۳۵ درصد صرفه‌جویی آب نسبت به سناریوی پایه است.

جدول (۴): تحلیل اقتصادی و مدیریتی سناریوهای مختلف مدیریت آب در واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن

کد سناریو	حجم آب مصرفی (میلیون مترمکعب)	تغییر آب (%)	سود خالص (میلیارد ریال)	تغییر سود (%)	بهره‌وری اقتصادی آب (هزار ریال بر مترمکعب)	(%) تغییر بهره‌وری
W100-I5-M100	۲۱/۱۲	۰/۰۰	۱۸۹۱۵	۰/۰۰	۸۹۵/۳۷	۰/۰۰
W100-I5-M80	۲۱/۰۸	-۰/۲۳	۱۸۹۱۶	۰/۰۱	۸۹۷/۵۲	۰/۲۴
W100-I5-M60	۲۱/۰۳	-۰/۴۵	۱۸۹۲۸	۰/۰۷	۹۰۰/۰۲	۰/۵۲
W100-I7-M100	۲۰/۹۸	-۰/۷۱	۱۸۹۳۳	۰/۱۰	۹۰۲/۶۲	۰/۸۱
W100-I7-M80	۲۰/۹۱	-۱/۰۰	۱۸۹۲۳	۰/۰۴	۹۰۴/۸۲	۱/۰۵
W100-I7-M60	۲۰/۸۵	-۱/۳۰	۱۸۹۲۱	۰/۰۴	۹۰۷/۴۶	۱/۳۵
W100-I10-M100	۲۰/۸۰	-۱/۵۵	۱۸۹۲۴	۰/۰۵	۹۰۹/۹۳	۱/۶۳
W100-I10-M80	۲۰/۷۲	-۱/۹۴	۱۸۹۱۸	۰/۰۲	۹۱۳/۲۳	۱/۹۹
W100-I10-M60	۲۰/۶۳	-۲/۳۶	۱۸۹۰۳	-۰/۰۶	۹۱۶/۳۹	۲/۳۵
W80-I5-M100	۲۰/۴۴	-۳/۲۲	۱۸۸۱۱	-۰/۵۵	۹۲۰/۰۸	۲/۷۶
W80-I5-M80	۲۰/۳۶	-۳/۶۳	۱۸۸۱۳	-۰/۵۴	۹۲۴/۱۰	۳/۲۱
W80-I5-M60	۲۰/۲۷	-۴/۰۴	۱۸۸۰۱	-۰/۶۰	۹۲۷/۴۴	۳/۵۸
W80-I7-M100	۲۰/۱۸	-۴/۴۵	۱۸۷۹۱	-۰/۶۵	۹۳۱/۰۰	۳/۹۸
W80-I7-M80	۲۰/۱۰	-۴/۸۶	۱۸۷۷۹	-۰/۷۲	۹۳۴/۳۸	۴/۳۶
W80-I7-M60	۲۰/۰۱	-۵/۲۷	۱۸۷۷۵	-۰/۷۴	۹۳۸/۲۶	۴/۷۹
W80-I10-M100	۱۹/۹۲	-۵/۶۸	۱۸۷۵۸	-۰/۸۳	۹۴۱/۴۴	۵/۱۵
W80-I10-M80	۱۹/۷۶	-۶/۴۶	۱۸۷۳۶	-۰/۹۵	۹۴۸/۱۸	۵/۹۰
W80-I10-M60	۱۹/۵۷	-۷/۳۵	۱۸۷۰۱	-۱/۱۳	۹۵۵/۴۵	۶/۷۱
W60-I5-M100	۱۹/۵۴	-۷/۵۱	۱۸۶۱۳	-۱/۵۹	۹۵۲/۶۶	۶/۴۰
W60-I5-M80	۱۹/۵۳	-۷/۵۶	۱۸۶۵۹	-۱/۳۵	۹۵۵/۴۸	۶/۷۱
W60-I5-M60	۱۹/۵۲	-۷/۶۰	۱۸۷۰۵	-۱/۱۱	۹۵۸/۳۰	۷/۰۳
W60-I7-M100	۱۹/۵۱	-۷/۶۵	۱۸۷۵۱	-۰/۸۶	۹۶۱/۱۳	۷/۳۴
W60-I7-M80	۱۹/۵۰	-۷/۶۹	۱۸۷۹۷	-۰/۶۲	۹۶۳/۹۶	۷/۶۶
W60-I7-M60	۱۹/۴۹	-۷/۷۴	۱۸۸۴۳	-۰/۳۸	۹۶۶/۷۹	۷/۹۸
W60-I10-M100	۱۹/۴۸	-۷/۷۸	۱۸۸۸۹	-۰/۱۴	۹۶۹/۶۳	۸/۲۹
W60-I10-M80	۱۹/۴۷	-۷/۸۳	۱۸۹۳۵	۰/۱۱	۹۷۲/۴۷	۸/۶۱
W60-I10-M60	۱۹/۴۶	-۷/۸۷	۱۸۹۸۱	۰/۳۵	۹۷۵/۳۱	۸/۹۳

سناریوها به صورت W-I-M تعریف شده است؛ به طوری که W نشان‌دهنده درصد تأمین آب (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد)، I نشان‌دهنده دور آبیاری (۵، ۷ و ۱۰ روز) و M بیانگر سطح MAD (۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد) می‌باشد. به عنوان مثال، سناریوی W60-I10-M60 نشان‌دهنده تأمین ۶۰ درصد آب مورد نیاز، دور آبیاری ۱۰ روزه و MAD برابر ۶۰ درصد است.

در مقابل، بهره‌وری اقتصادی آب به ۹۵۵/۴۵ هزار ریال بر مترمکعب افزایش یافت که نشان‌دهنده ۶/۷۱ درصد بهبود

اگرچه سود خالص این سناریو به ۱۸۷۰۱ میلیارد ریال کاهش یافت، اما مقدار کاهش سود تنها ۱/۱۳ درصد بود.

الگوی کشت با رویکرد چندهدفه، ضمن افزایش سود اقتصادی، موجب کاهش رد پای آب و بهبود بهره‌وری مصرف آب در اراضی آبی و دیم می‌شود. همچنین نتایج Khajehi et al (2025) نشان دادند که در شرایط خشکسالی، ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی با مدیریت الگوی کشت می‌تواند کاهش مصرف آب را با حداقل کاهش درآمد همراه کند. مطابق با نتایج جدول ۴، سناریوی W60-I10-M60 به‌عنوان گزینه مدیریتی برتر انتخاب شد، زیرا این سناریو توانست با کاهش ۷/۸۷ درصدی حجم آب مصرفی، نه تنها سود اقتصادی را حفظ کند، بلکه سود خالص را ۰/۳۵ درصد افزایش دهد و بهره‌وری اقتصادی آب را به میزان ۸/۹۳ درصد نسبت به شرایط پایه افزایش دهد. بنابراین، این سناریو می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مدیریتی مناسب برای شرایط کم‌آبی در واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن پیشنهاد شود.

این نتایج نشان می‌دهد که اثر مدیریت آب بر عملکرد اقتصادی سامانه صرفاً تابع مقدار آب تخصیصی نیست، بلکه به نحوه توزیع و بازتخصیص آب میان محصولات نیز وابسته است. کاهش آب تخصیصی در صورت همراه شدن با افزایش فاصله آبیاری و اصلاح الگوی کشت، امکان کاهش مصرف آب بدون کاهش متناسب سود خالص را فراهم می‌کند. در این شرایط، کاهش سطح زیرکشت محصولات با نیاز آبی بالاتر و افزایش سهم محصولاتی مانند کلزا، ذرت علوفه‌ای و سویا موجب استفاده اقتصادی‌تر از منابع محدود آب شده است. از سوی دیگر، حفظ سطح باغات مرکبات و حداقل سطح شالیزار نشان می‌دهد که اعمال قیود مدیریتی در مدل، ضمن افزایش کارایی اقتصادی، امکان‌پذیری اجرایی الگوی بهینه را نیز مدنظر قرار داده است. بنابراین، برتری سناریوی W60-I10-M60 را می‌توان حاصل اثر هم‌زمان سه عامل کاهش مصرف آب، بازتخصیص منابع به محصولات اقتصادی‌تر و تنظیم فاصله آبیاری دانست، نه صرفاً کاهش حجم آب تخصیصی. این یافته از دیدگاه مدیریتی بیانگر آن است که در شرایط کم‌آبی، سیاست کاهش یکسان آب برای

نسبت به شرایط پایه است. این نتیجه نشان می‌دهد که کاهش نسبی آب تخصیصی، در صورتی که همراه با بازتخصیص منابع به سمت محصولات اقتصادی‌تر باشد، می‌تواند اثر منفی کاهش آب را تا حد زیادی جبران کند. در سناریوهای تأمین آب ۶۰ درصد، بیشترین فشار کم‌آبی اعمال شد. نتایج نشان داد که کاهش آب الزاماً به کاهش شدید سود منجر نمی‌شود. برای مثال، در سناریوی W60-I10-M60، حجم آب مصرفی به ۱۹/۴۶ میلیون مترمکعب رسید که نسبت به شرایط پایه ۷/۸۷ درصد کاهش نشان می‌دهد. با وجود این کاهش منابع آب، سود خالص به ۱۸۹۸۱ میلیارد ریال افزایش یافت که معادل ۰/۳۵ درصد افزایش نسبت به سناریوی پایه است. همچنین بهره‌وری اقتصادی آب در این سناریو به ۹۷۵/۳۱ هزار ریال بر مترمکعب رسید که بالاترین مقدار در میان تمام سناریوها بوده و افزایش ۸/۹۳ درصدی را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت آب، کاهش سهم آب آبیاری و افزایش فاصله آبیاری، همراه با تغییر ترکیب سطح زیرکشت، موجب انتقال منابع محدود آب از محصولات کم‌بازده‌تر به محصولات دارای ارزش اقتصادی بیشتر شده است. در این پژوهش، کاهش سطح زیرکشت شالیزار و گندم در سناریوهای کم‌آبی و افزایش نسبی سهم محصولاتی مانند کلزا، ذرت علوفه‌ای و سویا، عامل اصلی حفظ سود اقتصادی تحت شرایط کاهش منابع آب بوده است. یافته‌های این مطالعه با نتایج پژوهش‌های اخیر در زمینه مدیریت منابع آب کشاورزی همخوانی دارد. Sue et al (2024) نشان دادند که ترکیب بهینه‌سازی الگوی کشت با تخصیص مجدد آب می‌تواند ضمن کاهش مصرف آب، پایداری اقتصادی سامانه‌های کشاورزی را حفظ کند. نتایج این پژوهش با یافته‌های Ye et al (2024) نیز همخوانی دارد، آنان نشان دادند که استفاده از مدل‌های هوشمند و روش‌های بهینه‌سازی در مدیریت منابع آب کشاورزی می‌تواند ضمن کاهش مصرف آب، بهره‌وری سامانه‌های آبیاری و پایداری اقتصادی تولید را بهبود بخشد. Aboutorabi et al (2025) نشان دادند که بهینه‌سازی



رقابتی GWO در مقایسه با سایر روش‌های فراابتکاری همخوانی دارد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین الگوی کشت و مدیریت تخصیص آب در واحد عمرانی ۱ شبکه آبیاری و زهکشی تجن توسعه داده شد. نیاز آبی محصولات بر اساس روش FAO-56 محاسبه و اثر کمبود آب بر عملکرد محصولات با استفاده از رابطه پاسخ عملکرد به آب در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)، سناریوهای مختلف مدیریت آب شامل سطوح مختلف تأمین آب، دور آبیاری و سطوح تخلیه مجاز رطوبت خاک (MAD) مورد بررسی قرار گرفتند.

همه محصولات می‌تواند کارایی کمتری نسبت به مدیریت هدفمند تخصیص آب و اصلاح الگوی کشت داشته باشد. به‌منظور ارزیابی عملکرد GWO، نتایج آن با الگوریتم‌های ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) در سناریوی منتخب W60-I10-M60 مقایسه شد. نتایج مقایسه شاخص‌های اقتصادی و محاسباتی در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق جدول ۵، هر سه الگوریتم به پاسخ‌های نزدیک به یکدیگر دست یافتند. با این حال، GWO با دستیابی به بیشترین سود خالص و بهره‌وری اقتصادی آب و کمترین حجم آب مصرفی، عملکرد اندکی بهتر از GA و PSO نشان داد. همچنین، زمان اجرای کمتر GWO بیانگر کارایی محاسباتی مناسب آن در حل مسئله حاضر است. این یافته با نتایج (Mirjalili et al. (2014) درباره عملکرد

جدول (۵) مقایسه عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی گرگ خاکستری (GWO)، ژنتیک (GA) و ازدحام ذرات (PSO) در سناریوی منتخب W60-I10-M60

الگوریتم	سود خالص (میلیارد ریال)	آب مصرفی (میلیون مترمکعب)	بهره‌وری اقتصادی آب (هزار ریال بر مترمکعب)	زمان اجرا (ثانیه)
الگوریتم ژنتیک (GA)	۱۸۹۵۲	۱۹,۴۹	۹۷۲,۳۸	۴۴,۱
بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)	۱۸۹۶۳	۱۹,۴۸	۹۷۳,۴۶	۳۶,۵
الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)	۱۸۹۸۱	۱۹,۴۶	۹۷۵,۳۱	۲۹,۴

مترمکعب کاهش یافت که نسبت به شرایط پایه ۷/۸۷ درصد صرفه‌جویی آب ایجاد کرد. در عین حال، سود خالص به ۱۸۹۸۱ میلیارد ریال رسید که نسبت به سناریوی پایه ۰/۳۵ درصد افزایش نشان داد. همچنین بهره‌وری اقتصادی آب به ۹۷۵/۳۱ هزار ریال بر مترمکعب افزایش یافت که بیانگر ۸/۹۳ درصد بهبود نسبت به شرایط پایه است. نتایج نشان داد که کاهش یکنواخت آب برای تمامی محصولات، راهکار مناسبی برای مدیریت کم‌آبی نیست، بلکه تخصیص هدفمند آب، اصلاح الگوی کشت و تنظیم برنامه آبیاری می‌تواند تعادل مناسبی بین کاهش مصرف آب و حفظ سود اقتصادی ایجاد کند. همچنین استفاده از الگوریتم GWO توانست فضای پیچیده تصمیم‌گیری شامل محدودیت منابع

بررسی سناریوهای مختلف نشان داد که کاهش میزان آب تخصیصی، در صورتی که همراه با تغییر مناسب در ترکیب محصولات و مدیریت زمان آبیاری باشد، الزاماً باعث کاهش شدید سود اقتصادی نمی‌شود. تحلیل نتایج نشان داد که با کاهش سطح تأمین آب، الگوی کشت به سمت کاهش سطح محصولات با نیاز آبی بالا و افزایش سهم محصولات دارای ارزش اقتصادی مناسب تغییر پیدا کرد. این تغییرات موجب شد اثرات منفی محدودیت آب بر درآمد کاهش یافته و امکان استفاده مؤثرتر از منابع محدود آب فراهم شود. بر اساس نتایج تحلیل اقتصادی، سناریوی W60-I10-M60 به‌عنوان بهترین گزینه مدیریتی انتخاب شد. در این سناریو، حجم آب مصرفی به ۱۹/۴۶ میلیون



مدیران شبکه‌های آبیاری در تصمیم‌گیری برای شرایط کم‌آبی، کاهش فشار بر منابع آب و دستیابی به کشاورزی پایدار کمک کند. در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود اثر عدم قطعیت‌های اقلیمی، تغییرات قیمت محصولات و محدودیت‌های اقتصادی و اجتماعی نیز در چارچوب مدل بهینه‌سازی لحاظ شود تا پایداری و قابلیت کاربرد نتایج در شرایط واقعی افزایش یابد.

آب، سطح زیرکشت محصولات، هزینه تولید و درآمد اقتصادی را به صورت همزمان بررسی کرده و گزینه‌های مدیریتی مناسب را شناسایی کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی بهینه‌سازی الگوی کشت، مدیریت دور آبیاری و تخصیص هدفمند آب می‌تواند به عنوان یک راهکار عملی برای افزایش بهره‌وری اقتصادی آب در شبکه‌های آبیاری دارای محدودیت منابع مورد استفاده قرار گیرد. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به

منابع

- شعبانی، م. ک.، هنر، ت. و ع. ر. سپاسخواه، ۱۳۸۷. بهینه سازی مصرف آب و الگوی کشت با استفاده از تکنیک کم آبیاری در سطح مزرعه: مطالعه موردی شبکه آبیاری درودزن فارس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، دوره ۶ شماره ۳، ص ۵۲-۳۵.
- عزیزآبادی فراهانی، م. و ف. میرزایی. ۱۴۰۰. بهینه سازی برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط مختلف تأمین آب با استفاده از الگوریتم مورچگان. مجله پژوهش آب ایران، دوره ۱۵ شماره ۱، ص ۵۵-۶۴.
- نجفی، ا.، امیری، ا.، ابراهیمیان، ح. و ه. میرابوالقاسمی. ۱۳۹۵. بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری در واحدهای زراعی شبکه آبیاری و زهکشی شهید چمران اهواز. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۱۰ شماره ۳، ص ۳۳۹-۳۵۱.
- یوسفی، م.، سلطانی، ج.، بنی حبیب، م. و ع. رحیمی خوب. ۱۳۹۵. توسعه مدل بهینه‌سازی چندهدفه بهره‌برداری تلفیقی پساب و آب زیرزمینی در شبکه آبیاری ورامین. مجله پژوهش آب در کشاورزی، دوره ۳۰ شماره ۴، ص ۵۵۵-۵۶۷.
- Aboutorabi, H. R., Ramroudi, M., Asgharipour, M. R. and M. S. Ghazanfari Moghadam. 2025. Cropping pattern optimization for rainfed and irrigated lands in the Ghaenat and Zirkuh regions of Iran: A trade-off between profit and water footprints, *Water and Environment Journal*. 39(2): 220-234.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56).
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam, A. H. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33.
- Fereres, E., and M. A. Soriano. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 147-159.
- Howell, T. A. 2001. Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy Journal*, 93(2), 281-289.
- Khajehi, F., Moghimi, M. M. and A.R. Zarei. 2025. Providing optimal cropping patterns and water consumption according to monitored and forecasted drought conditions. *Irrigation and Drainage*. 74(1): 420-438
- Kuo, S. F., Lin, B. J. and H.J 2006. Estimation of irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural Water Management*, 82: 433-451.
- Li, L., Zhou, Y., Li, M., Cao, K., Tao, Y. and Liu, Y. 2022. Integrated modelling for cropping pattern optimization and planning considering the synergy of water resources-society-economy-ecology-environment system. *Agricultural Water Management*, 271 (104): 107808.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. and A Lewis. 2014. Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69: 46-61
- Mirzaei, A., a., Azarm, H and S. Naghavi. 2022. Optimization of cropping pattern under seasonal fluctuations of surface water using multistage stochastic programming, *Water Supply* 22(6):5716-5728

- Nguyen, D. C. H., Maier, H. R., Dandy, G. C. and J.C. Ascough II. 2016. Framework for computationally efficient optimal crop and water allocation using ant colony optimization. *Environmental Modelling and Software*, 76: 37–53.
- Nguyen, D. H., Ascough II, J., Maier, H. R., Dandy, G. and A. Andales. 2017. Optimization of irrigation scheduling using ant colony algorithms and an advanced cropping system model. *Environmental Modelling and Software*, 97: 32–45.
- Pereira, L. S., Oweis, T. and A. Zairi. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3), 175–206.
- Qureshi, S.A., Madramootoo, C. A and G.T. Dodds. 2001. Evaluation of irrigation schemes for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWAP93. *Agricultural Water Management*, 54(1): 37-48.
- Shahverdi, K. and J. M. Maestre. 2022. Gray Wolf Optimization for Scheduling Irrigation Water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(7): 04022018.
- Su, Z., Zhao, J., Zhuang, M., Liu, Z., Zhao, C., Pullens, J. W. M., Liu, K., Harrison, M. T. and X. Yang. 2024. Climate-adaptive crop distribution can feed food demand, improve water scarcity, and reduce greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, 944: 173819.
- Wu, L., Tian, J., Liu, Y., Wang, Y. and P. Zhang. 2024. Multi-Objective Planting Structure Optimisation in an Irrigation Area Using a Grey Wolf Optimisation Algorithm, *Water* 16(16): 2297. . .
- Ye, Z., Yin, S., Cao, Y., et al. (2024). AI-driven optimization of agricultural water management for enhanced sustainability. *Scientific Reports*, 14, 25721.
- Zeng, X., Kang, S., Li, F., Zhang, L., and P. Guo. 2010. Fuzzy multi-objective linear programming for water resources allocation. *Agricultural Water Management*, 97: 134–142