



Multi-objective optimization of greenhouse operation scenarios within the water-energy-food-ecosystem nexus using a genetic algorithm

Zeynab Sojoodi¹ | Mahmoud Mashal² | Hossein Khajehpour³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology (Aburayhan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: z.sojoodi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology (Aburayhan), University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mmashal@ut.ac.ir
3. Department of Energy Systems Engineering, Faculty of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: khajehpour@sharif.edu

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 27 January 2026

Received in revised form

4 February 2026

Accepted 11 February 2026

Published online 17 March 2026

Keywords:

Integrated Resource Management

Multi-Objective Optimization

Multi-Criteria Decision Making

Reverse Osmosis

ABSTRACT

Optimal resource management in greenhouses requires quantitative and integrated approaches. This study presents a modeling-optimization framework to identify optimal operational configurations within the Water-Energy-Food-Ecosystem (WEFE) nexus. Field data from ten greenhouses in the Pakdasht region (40 annual observations from 2021-2024) were collected. First, a semi-empirical parametric model was developed and calibrated using this data to establish quantitative relationships between key decision variables (the share of water treated by Reverse Osmosis (RO) and the share of renewable energy) and five WEFE objective functions: minimizing water consumption, energy use, CO₂ emissions, and total cost, while maximizing a water quality index. Subsequently, a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II) was executed on this calibrated model to extract the full Pareto fronts of optimal solutions. Finally, the TOPSIS multi-criteria decision-making method was employed to select the ultimate operational point from among the Pareto solutions. The optimization results identified a specific operational configuration utilizing RO for approximately 65 percent of the water flow and supplying 25 percent of energy from renewable sources as achieving the best trade-off (TOPSIS score: 0.7854) among the conflicting objectives. Compared to a conventional baseline, This optimum point, compared to a conventional baseline, resulted in a 24 percent reduction in water consumption, 20 percent in energy consumption, 33 percent in operating costs, and a 30 percent improvement in water quality. These findings demonstrate the strategic priority of increasing resource efficiency through technologies such as RO over simply expanding the clean energy portfolio and justify the “efficiency first, renewables then” strategy in similar regional conditions. This study provides a powerful tool for evidence-based, quantitative decision-making in sustainable agricultural management.

Cite this article: Sojoodi, Z., Mashal, M., & Khajehpour, H. (2026). Multi-objective optimization of greenhouse operation scenarios within the water-energy-food-ecosystem nexus using a genetic algorithm. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (4), 669-695. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.410122.1286>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.410122.1286>

Publisher: University of Tehran Press.



بهینه‌سازی چندهدفه سناریوهای بهره‌برداری گلخانه‌ها در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست (WEFE) با الگوریتم ژنتیک

زینب سجودی^۱ | محمود مشعل^۲ | حسین خواجه‌پور^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: z.sjoodi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی (ابوریحان)، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mmashal@ut.ac.ir
۳. گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. رایانامه: khajehpour@sharif.edu

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	مدیریت بهینه منابع در گلخانه‌ها نیازمند رویکردهای کمی و یکپارچه‌نگر است. این پژوهش با هدف ارائه یک چارچوب مدل‌سازی-بهینه‌سازی برای شناسایی ترکیبات عملیاتی بهینه در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست (WEFE) انجام شد. داده‌های میدانی ۱۰ گلخانه فعال در منطقه پاکدشت طی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ جمع‌آوری شد. ابتدا یک مدل پارامتریک نیمه‌تجربی توسعه و با استفاده از این داده‌ها کالیبره گردید تا روابط کمی بین متغیرهای تصمیم‌گیری و پنج تابع هدف شامل کمیته‌سازی مصرف آب، انرژی، انتشار CO ₂ ، هزینه کل و بیشینه‌سازی کیفیت آب برقرار شود. در گام بعد، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) بر روی این مدل کالیبره‌شده اجرا گردید تا جبهه‌های پارتو کامل راه‌حل‌های بهینه استخراج شوند. در نهایت، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS برای انتخاب نقطه عملیاتی نهایی از میان راه‌حل‌های پارتو استفاده شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که یک ترکیب عملیاتی خاص شامل استفاده از RO برای حدود ۶۵ درصد جریان آب و تأمین ۲۵ درصد انرژی از منابع تجدیدپذیر بهترین تعادل (با امتیاز TOPSIS برابر ۰/۷۸۵۴) را بین اهداف متعارض ایجاد می‌کند. این نقطه بهینه در مقایسه با یک حالت پایه متعارف، منجر به کاهش ۲۴ درصد مصرف آب، ۲۰ درصد مصرف انرژی، ۳۳ درصد هزینه عملیاتی و بهبود ۳۰ درصد کیفیت آب گردید. این یافته‌ها اولویت راهبردی افزایش کارایی منابع از طریق فناوری‌هایی مانند RO را نسبت به گسترش صرف سید انرژی پاک نشان می‌دهند و راهبرد «اول بهره‌وری، سپس تجدیدپذیر» را در شرایط منطقه‌ای مشابه توجیه می‌نمایند. مطالعه حاضر ابزار قدرتمندی برای مدیریت کمی و تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد در بخش کشاورزی پایدار فراهم می‌آورد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۶	
کلیدواژه‌ها:	
اسمز معکوس	
بهینه‌سازی چندهدفه	
تصمیم‌گیری چندمعیاره	
مدیریت یکپارچه منابع	

استناد: سجودی، زینب؛ مشعل، محمود و خواجه‌پور، حسین (۱۴۰۴). بهینه‌سازی چندهدفه سناریوهای بهره‌برداری گلخانه‌ها در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست (WEFE) با الگوریتم ژنتیک. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۴)، ۶۶۹-۶۹۵.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.410122.1286>



۱. مقدمه

چالش‌های پیچیده و هم‌زمان بخش کشاورزی، از جمله بحران‌های آب، انرژی و غذا، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و محدودیت منابع، به‌طور فزاینده‌ای بر پایداری و کارایی سیستم‌های تولیدی فشار وارد آورده است (Hosseini jolfan *et al.*, 2020; 2021; 2023). این فشارها در نظام‌های تولیدی گلخانه‌ای که برای تأمین غذای باکیفیت و کاهش وابستگی به سیستم‌های تولید گسترده طراحی شده‌اند، به‌ویژه محسوس است، زیرا مصرف آب و انرژی در این سیستم‌ها نسبت به کشاورزی سنتی بسیار بالاتر است و هم‌چنین اثرات زیست‌محیطی مرتبط با انتشار گازهای گلخانه‌ای قابل توجه است (Geressu *et al.*, 2020; Mabhaudhi *et al.*, 2024). در چنین شرایطی، دستیابی به تعادل میان بهره‌وری منابع، کاهش هزینه‌ها و حداکثرسازی سودآوری نه تنها یک هدف اقتصادی، بلکه یک ضرورت زیست‌محیطی و اجتماعی است. با این حال، روش‌های کلاسیک تصمیم‌گیری در مدیریت منابع، که معمولاً بر بهینه‌سازی تک‌متغیره یا تحلیل‌های سلسله‌ای مبتنی هستند، قادر به دستیابی به راه‌حل‌های واقعی بهینه برای مسائل چندمعیاره نیستند، زیرا در آن‌ها تعاملات پیچیده و متضاد میان منابع مختلف به‌خوبی مدل‌سازی نمی‌شود و راه‌حل‌های ارائه‌شده اغلب غیرقابل اعتماد در فضای تصمیم‌گیری واقعی هستند. یکی از چالش‌های اساسی در تحلیل سیستم‌های پیوندی آب-انرژی-غذا (WEF) تعارض ذاتی میان اهداف مختلف است. به‌عنوان نمونه، افزایش تولید غذای گلخانه‌ای مستلزم افزایش مصرف آب و انرژی است، اما این افزایش ممکن است اثرات مخربی بر پایداری منابع آب زیرزمینی و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی داشته باشد. در واقع، میانگین بهبود در یک هدف نظیر افزایش عملکرد محصول، می‌تواند منجر به تشدید شرایط در اهداف دیگر مثل مصرف انرژی یا انتشار کربن شود که این وضعیت معکوس با رویکردهای ساده تصمیم‌گیری قابل حل نیست. در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر بهینه‌سازی چندهدفه به‌عنوان ابزار قدرتمند برای حل مسائل با اهداف متضاد و فضای تصمیم‌گیری پیوسته مطرح شده‌اند. این روش‌ها به‌ویژه در مهندسی منابع طبیعی و مدیریت Nexus به‌دلیل توانایی ذاتی در کشف مرزهای پارتو (Pareto Front) در مسائل پیچیده، به‌کار رفته‌اند و کارایی آن‌ها در بهبود طراحی سناریوهای بهره‌برداری به‌طور قابل توجهی فراتر از روش‌های وزن‌دهی ساده یا تحلیل‌های تک‌هدفه بوده است (Zhang *et al.*, 2024; Dziuda, 2024). از میان الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم‌های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک، به‌ویژه نسخه‌های اصلاح‌شده آن مانند NSGA-II، به‌دلیل مقاومت بالاتر در برابر بهینه‌سازی محلی، عدم وابستگی به مشتق تابع هدف و توانایی کشف گسترده فضای راه‌حل‌ها، در پژوهش‌های اخیر در حوزه Nexus به‌وفور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الگوریتم‌ها قادرند مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو را تولید کنند که فشارهای مختلف منابع را به‌صورت هم‌زمان و بهینه متوازن می‌سازند (Chamorro *et al.*, 2023). در کاربردهای اخیر، بهینه‌سازی چندهدفه نه تنها برای تخصیص منابع محدود در کشاورزی استفاده شده است، بلکه توانسته است تعارض میان مصرف آب، مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی را به‌طور هم‌زمان کاهش دهد و سنجش‌های زیست‌محیطی را بهبود بخشد. به‌عنوان مثال، در مطالعاتی که از NSGA-II برای تعیین الگوهای بهینه استفاده کرده‌اند، نشان داده شده است که این رویکرد می‌تواند با حفظ سطح تولید، مصرف آب و انتشار آلاینده‌ها را کاهش دهد و هم‌زمان سودآوری را افزایش دهد (Zhang *et al.*, 2023). با این حال، با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر، یک شکاف کلیدی عدم ارتباط مستقیم مدل‌های بهینه‌سازی با داده‌های عملیاتی محلی و ارائه خروجی‌های کمی و قابل اجرا برای بهره‌برداران است. بسیاری از تلاش‌ها به تحلیل‌های مقایسه‌ای کیفی یا مدل‌های بهینه‌سازی عمومی محدود شده‌اند که فاقد کالیبراسیون با شرایط خاص منطقه هستند و بنابراین نمی‌توانند یک دستورالعمل

عملیاتی دقیق ارائه دهند. در پاسخ به این خلأها، این پژوهش یک چارچوب یکپارچه مدل سازی-بهینه سازی ارائه می دهد که فراتر از مقایسه سناریوهای کیفی از پیش تعریف شده عمل می کند. این چارچوب با توسعه و کالیبراسیون یک مدل پارامتریک بر پایه داده های میدانی محلی، روابط کمی بین متغیرهای تصمیم کلیدی (مانند نسبت استفاده از فناوری های تصفیه آب و سهم انرژی تجدیدپذیر) و اهداف پنج گانه WEFE را برقرار می سازد. سپس با اجرای الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) بر روی این مدل معتبر، به کاوش نظام مند فضای طراحی و استخراج جبهه پارتو کامل ترکیبات عملیاتی بهینه می پردازد. خروجی نهایی، یک راه حل کمی و پارامتریک است که می تواند به صورت مستقیم توسط بهره برداران برای تنظیم عملیات استفاده شود. در نتیجه، نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق سه گانه ۱- مدل سازی پایه دار با داده واقعی، ۲- بهینه سازی چندهدفه پیشرفته و ۳- تصمیم گیری چندمعیاره برای انتخاب نهایی است که امکان عبور از تحلیل های کیفی به سمت ارائه دستورالعمل های عملیاتی کمی و قابل اتکا را فراهم می آورد.

۲. مواد و روش ها

۲.۱. روند انجام پژوهش

رویکرد پیوند آب-انرژی-غذا-محیط زیست (WEFE Nexus) به عنوان چارچوب تحلیلی این پژوهش، تعاملات متقابل چهار مؤلفه آب، انرژی، غذا و محیط زیست را به صورت یکپارچه بررسی می کند. براساس این رویکرد، تصمیم گیری در هر بخش (نظیر افزایش مصرف انرژی برای تهویه) می تواند پیامدهای قابل توجهی بر سایر مؤلفه ها داشته باشد (FAO, 2025; Okola et al., 2023). این نگاه یکپارچه، زمینه مدیریت بهینه منابع و تدوین سیاست هایی با آثار هم زمان مثبت را فراهم می سازد. در این راستا، یک مدل بهینه سازی چندهدفه به منظور برقراری تعادل میان اهداف متعارض شامل کمینه سازی مصرف آب، کمینه سازی مصرف انرژی، کمینه سازی انتشار گازهای گلخانه ای به ویژه کربن دی اکسید کمینه سازی هزینه کل بهره برداری و بیشینه سازی کیفیت آب مصرفی توسعه داده شد. این اهداف بازتاب دهنده تعارض های ذاتی در مدیریت منابع محدود هستند. برای صورت بندی کمی مسأله، یک مدل پارامتریک طراحی شد که متغیرهای تصمیم عملیاتی را به توابع هدف مرتبط ساخته و پایه ریاضی بهینه سازی را فراهم می کند. از آنجاکه مسأله بهینه سازی چندهدفه فاقد جواب بهینه یکتاست، هدف استخراج مجموعه ای از راه حل های غیرمسلط یا جبهه پارتو می باشد. بدین منظور، الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II به کار گرفته شد که به عنوان روشی استاندارد برای حل مسائل پیچیده با اهداف متعارض شناخته می شود و قادر به تولید مجموعه ای متنوع از راه حل ها با مصالحه های مختلف میان اهداف است (Okola et al., 2025; Deb et al., 2002). مطالعات حوزه FEW/WEFE نیز نشان می دهند که این رویکردها می توانند هم زمان به کاهش مصرف منابع و بهبود کارایی اقتصادی منجر شوند (Ashkevari et al., 2025; Okola et al., 2025). در نهایت، به منظور تحلیل خروجی های بهینه سازی و انتخاب راه حل نهایی، از روش های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM) نظیر TOPSIS و هم چنین تحلیل حساسیت برای ارزیابی پایداری نتایج استفاده شد. نوآوری اصلی این پژوهش در سه محور قابل تبیین است: یکپارچه سازی چارچوب WEFE با مدل پارامتریک و بهینه سازی چندهدفه مبتنی بر داده های واقعی گلخانه ای؛ به کارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای کشف نظام مند تعاملات پیچیده اهداف اقتصادی و زیست محیطی و تلفیق خروجی های بهینه سازی با روش های MCDM و تحلیل حساسیت به منظور ارائه پیشنهاد های عملی و سیاستی قابل اتکا برای ذینفعان است. شکل (۱) روند انجام پژوهش را نشان می دهد.

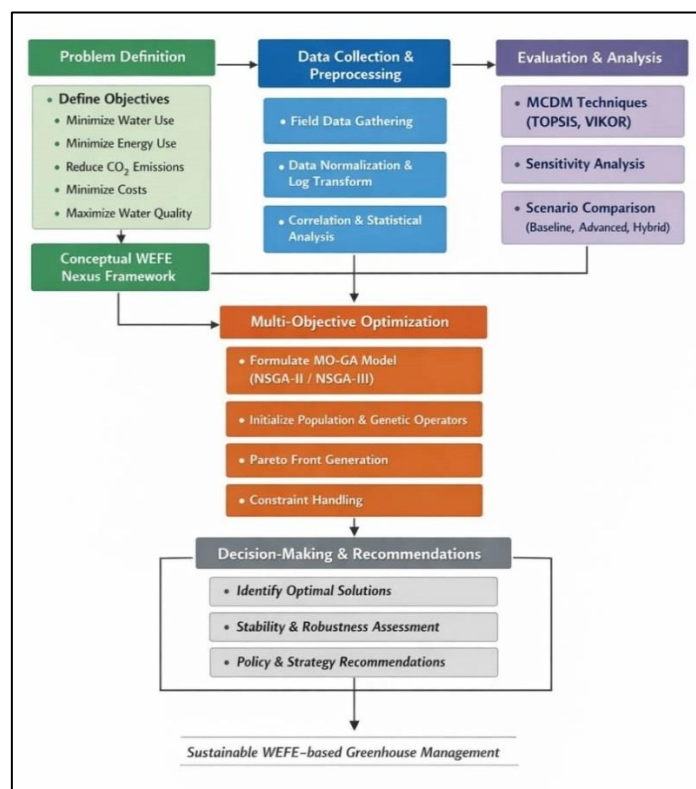


Figure 1. The research methodology

۲.۲. منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در گلخانه‌های واقع در شهرستان پاکدشت در دشت ورامین (استان تهران) انجام شد. منطقه‌ای نیمه‌خشک با متوسط بارندگی سالانه کم‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر، دمای بالا در فصل رشد و وابستگی شدید به منابع آب زیرزمینی. این منطقه یکی از قطب‌های تولید محصولات گلخانه‌ای کشور محسوب می‌شود و طی سال‌های اخیر با بحران افت سطح آب‌های زیرزمینی و شوری خاک مواجه بوده است. از این‌رو، استفاده از فناوری‌هایی مانند سامانه‌های آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس در برخی گلخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

۳.۲. تعریف و صورت‌بندی سناریوهای بهره‌برداری در چارچوب WEFE

رویکرد این پژوهش فراتر از مقایسه ساده چند حالت ایستا بوده و سناریوها را به‌عنوان چارچوب‌های تصمیم‌گیری ساخت‌یافته تعریف می‌کند که فضای جستجوی یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه را شکل می‌دهند. هسته مفهومی این طراحی بر تعریف قیود ساختاری استوار است، قیودی که حدود و امکان‌های پذیرش فناوری‌های کلیدی در تقاطع آب و انرژی، به‌عنوان گره اصلی تعاملات پیوند WEFE را در هر چارچوب تعیین می‌کنند. بدین ترتیب، هر سناریو نه یک وضعیت ثابت، بلکه یک مسأله بهینه‌سازی متمایز ایجاد می‌کند که متغیرهای تصمیم و فضای جواب آن توسط همین قیود ساختاری مشخص می‌شود. هدف، استخراج و مقایسه جبهه‌های بهینه پارتو متناظر با سه فلسفه مدیریتی متفاوت است. سناریوی پایه، چارچوب متعارف کنونی را بازنمایی می‌کند که در آن قیود ساختاری هرگونه به‌کارگیری فناوری‌های پیشرفته را منع می‌نمایند، به‌طوری‌که استفاده از سیستم اسمز معکوس مسدود ($\Gamma_{RO}=0$) و سهم انرژی تجدیدپذیر صفر ($S_{RE}=0$) فرض می‌شود. در این چارچوب، بهینه‌سازی

تنها بر متغیرهای عملیاتی سنتی نظیر زمان بندی آبیاری و مدیریت دمای گلخانه متمرکز است. خروجی این سناریو یک خط مبنای ضروری فراهم می‌آورد که مبنای سنجش مزایای سناریوهای دیگر قرار می‌گیرد. در مقابل، سناریوی پیشرفته یک آرمان شهر فناوریانه پایدار را مدل می‌کند. در این حالت، قیود ساختاری سیستم را به پذیرش حداکثری فناوری‌ها سوق می‌دهند؛ به گونه‌ای که استفاده از RO (فناوری اسمز معکوس) اجباری و در سطح بالا تعریف می‌شود ($f_{RO} \geq f_{min}$) و تأمین انرژی بیش‌تر از منابع تجدیدپذیر انجام می‌گیرد ($s_{RE} \geq s_{min}$). در این سناریو، پارامترهای فناوریانه ثابت فرض شده و بهینه‌سازی بر ریزتنظیمات عملیاتی برای دستیابی به بیشینه کارایی متمرکز است. از این رو، مرز عملکردی یک سیستم کاملاً یکپارچه و پایدار ترسیم می‌شود. سناریوی ترکیبی، به عنوان هسته تحلیلی پژوهش، رویکردی میانه‌رو و واقع‌بینانه را نمایندگی می‌کند. در این سناریو، قیود ساختاری نه منع مطلق و نه اجبار کامل، بلکه بازه‌ای مجاز برای پذیرش تدریجی فناوری تعریف می‌کنند، به گونه‌ای که ظرفیت RO در بازه ($0 \leq f_{RO} \leq f_{max}$) و سهم انرژی تجدیدپذیر در محدوده ($0 \leq s_{RE} \leq s_{max}$) قرار می‌گیرد. ویژگی کلیدی این سناریو آن است که متغیرهای فناوریانه و عملیاتی به‌طور هم‌زمان به عنوان متغیرهای تصمیم پیوسته در فرایند بهینه‌سازی چندهدفه وارد می‌شوند و الگوریتم باید بهترین سازش ممکن را در یک فضای جستجوی گسترده بیابد. این چارچوب امکان پاسخ به پرسش محوری پژوهش را فراهم می‌سازد که آیا می‌توان با سطحی میانی از سرمایه‌گذاری و پذیرش فناوری، به بخش عمده‌ای از منافع سناریوی پیشرفته دست یافت. در نهایت، الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II به صورت مستقل برای هر یک از این سه مسأله بهینه‌سازی، که توسط قیود ساختاری سناریوها تعریف شده‌اند، اجرا می‌شود تا جبهه پارتو متناظر استخراج گردد. مقایسه نظام‌مند این جبهه‌ها، توان هر چارچوب مدیریتی را در ایجاد سازش‌های بهینه میان اهداف متعارض آب، انرژی، اقتصاد و محیط‌زیست آشکار کرده و مبنایی کمی برای تصمیم‌گیری فراهم می‌آورد.

۴.۲. تدوین مدل بهینه‌سازی چندهدفه^۱

در این پژوهش، مسأله بهره‌برداری از سامانه‌های گلخانه‌ای مجهز به فناوری اسمز معکوس (RO) و منابع مختلف تأمین انرژی، به صورت یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه (MOP)^۲ در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست فرموله می‌شود. چنین رویکردی به‌طور فزاینده‌ای در مطالعات جدید برای مدیریت سامانه‌های پیچیده منابع مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا این سامانه‌ها ذاتاً با اهداف متعارض، قیود فنی و عدم قطعیت‌های ساختاری مواجه‌اند (Pahl-Wostl, 2019; Riahi et al., 2022; Giupponi et al., 2023; Mabhaudhi et al., 2024). ماهیت تصمیم‌گیری در سیستم‌های گلخانه‌ای مدرن، به‌ویژه در شرایط کم‌آبی و محدودیت انرژی، به گونه‌ای است که هیچ راه‌حلی یکتایی نمی‌تواند به‌طور هم‌زمان تمامی اهداف مدیریتی را بهینه کند. به عنوان مثال، کاهش مصرف آب معمولاً به افزایش مصرف انرژی منجر می‌شود (به دلیل استفاده گسترده‌تر از RO) و کاهش هزینه‌ها ممکن است با افت کیفیت آب یا کاهش عملکرد محصول همراه باشد. از این رو، چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر مفهوم برتری پارتو (Pareto Optimality) به عنوان رویکردی استاندارد و پذیرفته‌شده در ادبیات مدیریت یکپارچه منابع اتخاذ می‌شود (Deb, 2014; Reed et al., 2013; Zhang et al., 2024). مسأله بهینه‌سازی به صورت یافتن بردار متغیرهای تصمیم‌گیری به شکل رابطه (۱) تعریف می‌شود:

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، مؤلفه‌های بردار بیانگر تصمیم‌های مدیریتی کلیدی از جمله سطح استفاده از آب خام و آب تصفیه‌شده با RO، سهم انرژی تجدیدپذیر و انرژی شبکه، شدت بهره‌برداری از سامانه بازیافت پساب، سطح تولید هدف و الگوی بهره‌برداری گلخانه می‌باشند. هدف، بهینه‌سازی هم‌زمان مجموعه‌ای از توابع هدف متعارض به صورت زیر است:

$$\min f_1(x), \min f_2(x), \min f_3(x), \min f_4(x), \min f_5(x)$$

که این توابع، به ترتیب بیانگر ابعاد اصلی پیوند WEFE هستند و به طور مستقیم از ادبیات جدید مدیریت منابع اقتباس شده‌اند (Riahi et al., 2022; Mabhaudhi et al., 2024; Zhang et al., 2024).

۱.۴.۲. تعریف توابع هدف

۱.۴.۲.۱. کمینه‌سازی مصرف کل آب

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n \text{Water} \quad \text{رابطه (۲)}$$

این تابع هدف، کل مصرف سالانه آب گلخانه را شامل آب خام، آب تصفیه‌شده و آب بازیافتی در نظر می‌گیرد. کاهش این تابع، به‌عنوان یکی از ارکان اصلی پایداری سامانه‌های کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به طور گسترده در ادبیات WEFE تأکید شده است (Mabhaudhi et al., 2019; Geressu et al., 2020; Giupponi et al., 2023).

۱.۴.۲.۲. کمینه‌سازی مصرف کل انرژی

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n \text{Energy} \quad \text{رابطه (۳)}$$

این تابع، مجموع انرژی مصرفی برای پمپاژ، تصفیه (به‌ویژه RO)، گرمایش، سرمایش و سایر عملیات گلخانه را در برمی‌گیرد. اهمیت این هدف به‌ویژه از آن جهت است که در بسیاری از سامانه‌های گلخانه‌ای، مصرف انرژی مهم‌ترین محدودیت اقتصادی و زیست‌محیطی محسوب می‌شود (Ramesh et al., 2021; Zhang et al., 2024).

۱.۴.۲.۳. کمینه‌سازی انتشار گاز گلخانه‌ای (CO₂)

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \text{CO}_2 \quad \text{رابطه (۴)}$$

این تابع، ردپای کربن کل سیستم را که تابعی از ترکیب سبد انرژی مصرفی و شدت استفاده از فناوری‌های انرژی‌بر مانند RO است، کمینه می‌کند. ورود این تابع هدف، همسو با رویکردهای جدید ارزیابی چرخه عمر (LCA) در سامانه‌های کشاورزی و غذایی است (Notarnicola et al., 2017; García-Molinos et al., 2021; IPCC, 2023).

۱.۴.۲.۴. کمینه‌سازی هزینه کل سیستم

$$f_4(x) = C_{\text{Water}} + C_{\text{Energy}} + C_{\text{Operation}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

این تابع، هزینه‌های سرمایه‌ای و بهره‌برداری شامل هزینه آب، انرژی، بهره‌برداری و نگهداری سامانه‌های تصفیه، پمپاژ و تولید را در برمی‌گیرد. هدف از این تابع، تضمین اقتصادی بودن راه‌حل‌های پیشنهادی است، زیرا بسیاری از راه‌حل‌های فنی در صورت عدم توجیه اقتصادی، قابلیت پیاده‌سازی در مقیاس واقعی را ندارند (Riahi et al., 2022; Giupponi et al., 2023).

۱.۴.۲.۵. بیشینه‌سازی شاخص کیفیت آب

$$f_5(x) = \sum_{i=1}^n \text{QualityIndex}_i \quad \text{رابطه (۶)}$$

این شاخص، یک تابع ترکیبی از پارامترهای کلیدی کیفیت آب نظیر EC، TDS، SAR و نترات است که براساس روش‌های استاندارد ارزیابی کیفیت آب برای مصارف کشاورزی نرمال‌سازی و تجمیع می‌شود (García-Molinos *et al.*, 2021; FAO, 2023). ارتقای کیفیت آب نه تنها بر عملکرد محصول بلکه بر پایداری خاک و کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی نیز اثر مستقیم دارد.

۲.۴.۱.۶. قیود مدل

مدل بهینه‌سازی تحت مجموعه‌ای از قیود فیزیکی، فنی و مدیریتی تعریف می‌شود:

$$g_1(x) \leq W_{\max} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$g_2(x) \leq E_{\max}$$

$$g_3(x) \geq Q_{\max}$$

$$g_4(x) \geq P_{\max}$$

که در آن، W_{\max} : حداکثر آب قابل تخصیص سالانه، E_{\max} : حداکثر انرژی قابل تأمین، Q_{\max} : حداقل کیفیت قابل قبول آب برای تولید پایدار، P_{\max} : حداقل سطح تولید اقتصادی قابل قبول می‌باشند. چنین قیودی بازتاب‌دهنده واقعیت‌های عملی بهره‌برداری از سامانه‌های گلخانه‌ای در شرایط محدودیت منابع هستند و در مطالعات جدید مدیریت تطبیقی منابع به‌طور گسترده استفاده شده‌اند (Pahl-Wostl, 2015; Mendoza *et al.*, 2018; Riahi *et al.*, 2022).

۲.۵. چارچوب مفهومی حل مسأله

با توجه به غیرخطی بودن، چندمندی بودن و وجود تعاملات پیچیده بین متغیرها، این مسأله در رده مسائل بهینه‌سازی چندهدفه غیرخطی با قیود قرار می‌گیرد. بنابراین، به‌جای جستجوی یک جواب یکتا، هدف استخراج مجموعه جواب‌های کارا (Pareto-optimal solutions) است که هر کدام نمایانگر یک مصالحه متفاوت بین اهداف متعارض آب، انرژی، اقتصاد و محیط‌زیست می‌باشند (Deb, 2014; Reed *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2024). در این چارچوب، الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) به‌عنوان موتور جستجوی فضای تصمیم در بخش بعدی معرفی و پیاده‌سازی می‌شود.

۲.۶. الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۳

مسأله بهینه‌سازی سناریوهای بهره‌برداری گلخانه‌ای در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط زیست (WEFE) ذاتاً یک مسأله چندهدفه، غیرخطی، با فضای جستجوی بزرگ و قیود متنوع فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. در چنین مسائلی، روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی تک‌هدفه یا مبتنی بر گرادیان، به دلیل وجود توابع هدف متعارض، چندین بهینه محلی و عدم تحدب فضای جواب، معمولاً کارایی و پایداری لازم را ندارند (Deb, 2001; Coello Coello *et al.*, 2007; Marler and Arora, 2004). از این‌رو، در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (Multi-Objective Genetic Algorithm یا MOGA) به‌عنوان یک روش فراابتکاری تکاملی قدرتمند برای استخراج مجموعه جواب‌های بهینه پارتو استفاده شده است. الگوریتم‌های ژنتیک که نخستین بار به صورت سیستماتیک توسط Holland (1975) معرفی شدند، بر پایه شبیه‌سازی فرایندهای تکامل طبیعی، شامل انتخاب طبیعی، بقای اصلح، تقاطع ژنتیکی و جهش عمل می‌کنند. این الگوریتم‌ها به دلیل ماهیت جمعیت‌محور خود، قادرند به‌طور هم‌زمان چندین ناحیه از فضای جستجو را کاوش کرده و خطر گیرافتادن در بهینه‌های محلی را به‌طور معناداری کاهش دهند (Goldberg, 1989; Deb, 2001).

در چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه، هدف یافتن یک جواب منفرد نیست، بلکه استخراج یک مجموعه از جواب‌های غیرمغلوب^۴ است که به آن جبهه پارتو^۵ گفته می‌شود. به‌طور رسمی، یک بردار جواب زمانی پارتو-بهینه است که هیچ جواب دیگری وجود نداشته باشد به‌گونه‌ای که:

$$\begin{aligned} f_i(x) &\leq f_i(x^*) \\ f_j(x) &\leq f_j(x^*) \end{aligned} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن، $f_i(x)$ توابع هدف چندگانه (در این پژوهش شامل مصرف آب، مصرف انرژی، هزینه انرژی، انتشار CO₂ و تولید/سود اقتصادی) هستند (Deb, 2001; Zitzler et al., 2000).

در این مطالعه، هر راه‌حل بالقوه به‌صورت یک کروموزوم چندبعدی کدگذاری شده است که بردار تصمیم آن شامل پارامترهای کلیدی بهره‌برداری گلخانه در هر یک از سه سناریوی مدیریتی (سناریوی پایه، سناریوی پیشرفته مبتنی بر RO و انرژی تجدیدپذیر و سناریوی ترکیبی) است. بنابراین، هر کروموزوم را می‌توان به‌صورت رابطه (۹) نمایش داد. بردار توابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_5(X)] \quad \text{رابطه ۹}$$

که در آن، f_1 : حداقل‌سازی مصرف آب، f_2 : حداقل‌سازی مصرف انرژی، f_3 : حداقل‌سازی هزینه کل انرژی، f_4 : حداقل‌سازی انتشار CO₂، f_5 : بیشینه‌سازی سود/عملکرد اقتصادی می‌باشد.

به‌دلیل ماهیت متعارض این اهداف (برای مثال، کاهش مصرف آب با RO معمولاً موجب افزایش مصرف انرژی می‌شود)، هیچ جواب بهینه یکتایی وجود ندارد و مجموعه‌ای از راه‌حل‌های سازشی^۶ باید استخراج شود (Deb et al., 2007; Coello Coello et al., 2002). در این پژوهش از چارچوب الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب استفاده شده است که نمونه برجسته و بسیار پرکاربرد آن الگوریتم NSGA-II است (Deb et al., 2002). این الگوریتم با سه سازوکار کلیدی، یعنی ۱- مرتب‌سازی نامغلوب سریع، ۲- استفاده از شاخص تراکم جمعیت برای حفظ تنوع جواب‌ها، ۳- نخیه‌گرایی^۷ برای حفظ بهترین جواب‌ها در نسل‌های بعدی، توانسته است به یکی از استانداردهای طلایی بهینه‌سازی چندهدفه در مهندسی منابع آب، انرژی و سیستم‌های محیط‌زیستی تبدیل شود (Zitzler et al., 2000; Deb et al., 2002; Coello Coello et al., 2007; Reed et al., 2013; Maier et al., 2014). الگوریتم به‌صورت یک چرخه تکاملی به شرح زیر انجام می‌گیرد؛ ابتدا یک جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها به‌صورت تصادفی اما منطبق با قیود فیزیکی، فنی و اقتصادی سیستم تولید می‌شود. سپس، برای هر کروموزوم، توابع هدف چندگانه محاسبه شده و براساس مفهوم غلبه پارتو، جمعیت به جبهه‌های نامغلوب مختلف تفکیک می‌شود. به هر جواب، علاوه بر رتبه پارتو، یک معیار فاصله ازدحامی اختصاص داده می‌شود تا تنوع فضایی جواب‌ها در طول جبهه پارتو حفظ شود (Deb et al., 2002). در مرحله انتخاب، کروموزوم‌ها براساس ترکیبی از رتبه پارتو و فاصله ازدحامی وارد فرایند انتخاب والدین می‌شوند. سپس با اعمال عملگر تقاطع با احتمال و عملگر جهش با احتمال، نسل جدیدی از جواب‌ها تولید می‌شود. از منظر نظری و کاربردی، مزیت اساسی MOGA نسبت به روش‌های تک‌هدفه یا وزن‌دهی خطی این است که بدون نیاز به تعریف وزن‌های ذهنی برای اهداف، به‌طور مستقیم کل طیف راه‌حل‌های سازشی را استخراج می‌کند و اختیار تصمیم‌گیری را به تصمیم‌گیر می‌سپارد (Marler and Arora, 2004; Coello Coello et al., 2007). در سال‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه در مسائل پیوند آب-انرژی-غذا و مدیریت سیستم‌های منابع به‌شدت گسترش یافته است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که این رویکرد قادر است ساختار واقعی مصالحه‌ها بین اهداف متعارض را به‌صورت شفاف آشکار کند و مبنایی قوی برای تصمیم‌گیری سیاستی فراهم آورد (Reed et al., 2013; Maier et al., 2014).

برای هر سناریوی بهره‌برداری گلخانه‌ای است که نشان می‌دهد به چه ترتیبی می‌توان میان کاهش مصرف آب، کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار کربن و افزایش سود اقتصادی مصالحه برقرار کرد. این جبهه‌های پارتو سپس به‌عنوان ورودی مرحله تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از میان جواب‌های بهینه پارتو، راه‌حل یا راه‌حل‌های برتر مدیریتی انتخاب شوند.

پارامترهای اجرای شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II در جدول (۱) ارائه شده‌اند. مقادیر این پارامترها براساس استانداردهای مرجع و با در نظر گرفتن ماهیت داده‌محور پژوهش تنظیم گردیده‌اند تا تعادل مناسبی بین اکتشاف فضای جواب و کارایی محاسباتی برقرار شود.

Table 1. Simulation parameters for the NSGA-II multi-objective genetic algorithm

Parameter Category	Parameter Name	Symbol / Value	Description and Rationale
Algorithm Framework	Algorithm Type	NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II; the standard multi-objective evolutionary algorithm
	Number of Objectives	5	Corresponds to the five WEFЕ objectives: Water, Energy, CO ₂ , Cost, and Water Quality.
Population Control	Population Size	30 individuals	A balance between solution diversity and computational efficiency for the observed dataset size
	Number of Generations	50	topping criterion ensuring convergence of the Pareto front (based on hypervolume stability).
Genetic Operators	Selection Operator	Binary Tournament	Selects parent solutions based on Pareto rank and crowding distance
	Crossover Operator	SBX (Simulated Binary Crossover)	Standard operator for real-valued encoding; promotes blending of good solution traits
	Crossover Probability	$P_c = 0.9$	High probability to encourage extensive recombination of parent solutions.
	Crossover Distribution Index	$\eta_c = 15$	Produces offspring near the parents, ensuring gradual exploration of the search space
	Mutation Operator	Polynomial Mutation	Introduces diversity and helps escape local optima.
	Mutation Probability	$P_m = 0.1$	Standard low probability to introduce random variations without disrupting good solutions
Solution Diversity	Mutation Distribution Index	$\eta_m = 20$	Controls the magnitude of perturbation; a higher value results in smaller mutations
	Crowding Distance Method	Euclidean Distance in Normalized Objective Space	Preserves a spread of solutions along the Pareto front by favoring individuals in less crowded regions.
	Duplicate Elimination	Enabled	Prevents genetic drift by removing identical individuals from the population
Output and Analysis	Pareto Front Size	20 non-dominated solutions per scenario	A representative sample of the optimal trade-off frontier for subsequent MCDM analysis
	Simulation Runs	1 run per scenario (Base, Hybrid, Advanced)	Separate optimization for each distinct management scenario defined in Section 2.4
	Convergence Metric	Hypervolume Change < 1% over 10 generations	Practical criterion to terminate the simulation when the Pareto front stabilizes

۷.۲. معیارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای رتبه‌بندی سناریوهای بهره‌برداری

پس از اجرای بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک و استخراج مجموعه جواب‌های غیرمغلوب، فرایند تصمیم‌گیری وارد مرحله‌ای می‌شود که ماهیت آن فراتر از بهینه‌سازی صرف ریاضی بوده و به‌طور ذاتی به یک مسأله تصمیم‌گیری چندمعیاره تبدیل می‌گردد. در این مرحله، تصمیم‌گیرنده با مجموعه‌ای از راه‌کارهای کارا مواجه است که هیچ‌یک بر دیگری برتری مطلق ندارد، بلکه هر گزینه مصالحه‌ای متفاوت میان اهداف متعارض نظیر کاهش مصرف آب و انرژی، کاهش انتشار CO₂، افزایش تولید و بهبود سودآوری اقتصادی ارائه می‌دهد. این وضعیت دقیقاً همان بستری است که

نظریه تصمیم‌گیری چندمعیاره برای آن توسعه یافته است (Mardani *et al.*, 2015; Govindan and Jepsen, 2016; Zavadskas *et al.*, 2016). در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست، سیستم ماهیتی به‌شدت چندبعدی و همراه با تضادهای ساختاری دارد؛ به‌گونه‌ای که بهبود یک مؤلفه (برای مثال افزایش امنیت آب از طریق اسمز معکوس) می‌تواند مصرف انرژی و هزینه را افزایش دهد، یا کاهش مصرف انرژی پایداری تولید را به مخاطره اندازد. از این‌رو، در مطالعات اخیر حوزه پیوند، استفاده از روش‌های MCDM به‌عنوان حلقه اتصال میان مدل‌های بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری سیاستی به‌طور گسترده توصیه شده است (Al-Saidi and Saliba, 2019; Purwanto *et al.*, 2021; Więckowski *et al.*, 2023). در این پژوهش، خروجی الگوریتم ژنتیک مجموعه‌ای از سناریوهای کارای بهره‌برداری را برای هر گلخانه و برای کل سیستم فراهم می‌کند. با این حال، به‌منظور انتخاب گزینه نهایی یا رتبه‌بندی سناریوها متناسب با ترجیحات مدیریتی و ملاحظات پایداری، از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌شود. به‌طور مشخص، دو روش مکمل یعنی تکنیک ترجیح‌ترتیبی براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل به‌کار گرفته شده‌اند تا نتایج هم از منظر نزدیکی به حالت ایده‌آل و هم از منظر حداکثرسازی رضایت جمعی با حداقل پشیمانی ارزیابی شوند (Behzadian *et al.*, 2012; Opricovic and Tzeng, 2004; Zavadskas *et al.*, 2016). منطق استفاده هم‌زمان از این دو روش آن است که در مسائل پیچیده پایداری، اتکا به یک تکنیک منفرد می‌تواند به نتایج ناپایدار یا حساس به وزن‌دهی منجر شود، درحالی‌که همگرایی چند روش MCDM استحکام تصمیم را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد (Mardani *et al.*, 2020; Govindan *et al.*, 2023).

۱.۷.۲. جایگاه روش TOPSIS در ارزیابی سناریوها

روش TOPSIS یکی از پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مسائل مهندسی منابع، انرژی و محیط‌زیست است. ایده مرکزی این روش بر این فرض استوار است که بهترین گزینه باید کم‌ترین فاصله را از راه‌کار ایده‌آل مثبت و بیش‌ترین فاصله را از راه‌کار ایده‌آل منفی داشته باشد (Hwang and Yoon, 1981; Behzadian *et al.*, 2012). در زمینه این پژوهش، راه‌کار ایده‌آل مثبت به‌طور مفهومی نمایانگر حالتی است که در آن مصرف آب و انرژی و انتشار CO₂ حداقل است، تولید و سود اقتصادی در بیشینه مقدار خود قرار دارند و راه‌کار ایده‌آل منفی دقیقاً وضعیت معکوس این حالت را نمایش می‌دهد. برای اجرای TOPSIS، ابتدا ماتریس تصمیم تشکیل می‌شود که در آن سطرها نمایانگر سناریوهای استخراج‌شده از جبهه پارتو و ستون‌ها نمایانگر معیارهای ارزیابی در چارچوب WEF (مصرف آب، مصرف انرژی، هزینه انرژی، انتشار کربن، تولید، سود و شاخص‌های محیط‌زیستی) هستند. سپس این ماتریس به‌منظور حذف اثر مقیاس‌های متفاوت معیارها نرمال‌سازی می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در گام بعد، با اعمال وزن معیارها (که می‌توانند از روش‌هایی نظیر AHP یا آنتروپی شانون استخراج شوند)، ماتریس وزن‌دهی شده به‌دست می‌آید:

$$v_{ij} = \omega_j * r_{ij}$$

سپس بردار راه‌کار ایده‌آل مثبت و منفی تعیین شده و فاصله هر سناریو از این دو مرجع محاسبه می‌شود:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^N (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

در نهایت، ضریب نزدیکی نسبی هر سناریو به حالت ایده‌آل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

به‌گونه‌ای که مقدار بزرگ‌تر C_i نشان‌دهنده مطلوبیت بیش‌تر آن سناریو است. این شاخص در واقع یک معیار ترکیبی از عملکرد هم‌زمان در تمام ابعاد WEFE محسوب می‌شود و به‌طور گسترده در ارزیابی گزینه‌های پایداری منابع به‌کار رفته است (Behzadian et al., 2012; Zavadskas et al., 2016; Więckowski et al., 2023).

۲.۷.۲ روش VIKOR و منطق «حداقل پشیمانی»

در کنار TOPSIS، از روش VIKOR نیز استفاده می‌شود که فلسفه‌ای متفاوت اما مکمل دارد. روش VIKOR بر مبنای یافتن راه‌کار مصالحه‌ای توسعه یافته است، راه‌کاری که از یک سو بیش‌ترین رضایت جمعی را فراهم کند و از سوی دیگر، بدترین نارضایتی در میان معیارها را به حداقل برساند (Opricovic, 2011; Opricovic and Tzeng, 2004). در چارچوب این پژوهش، این منطق از آن جهت اهمیت دارد که برخی سناریوها ممکن است در مجموع عملکرد خوبی داشته باشند، اما در یکی از ابعاد کلیدی (مثلاً مصرف انرژی یا هزینه اقتصادی) بسیار ضعیف عمل کنند که این موضوع از منظر سیاست‌گذاری عملی قابل پذیرش نیست. روش VIKOR دقیقاً برای کنترل چنین وضعیت‌هایی طراحی شده است. در این روش، ابتدا بهترین و بدترین مقدار هر معیار در میان گزینه‌ها تعیین می‌شود. سپس دو شاخص اصلی محاسبه می‌گردد:

S_i : شاخص مطلوبیت کلی (Utility Measure)

R_i : شاخص بیشینه پشیمانی (Regret Measure)

و در نهایت شاخص ترکیبی Q_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_i = \nu \frac{S_i - S^*}{S^- + S^*} + (1 - \nu) \frac{R_i - R^*}{R^- + R^*} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

که در آن، ν وزن استراتژی «حداکثرسازی رضایت جمعی» (معمولاً ۰/۵) است. سناریویی که کم‌ترین مقدار Q را داشته باشد، به‌عنوان گزینه مصالحه‌ای برتر معرفی می‌شود (Opricovic and Tzeng, 2004; Zavadskas et al., 2016).

۲.۷.۳ وزن‌دهی معیارها و ارتباط با چارچوب WEFE

یکی از حساس‌ترین مراحل در تحلیل‌های MCDM، تعیین وزن معیارهاست، زیرا این وزن‌ها ترجیحات تصمیم‌گیرنده نسبت به ابعاد مختلف پایداری (آب، انرژی، غذا، محیط زیست و اقتصاد) را منعکس می‌کنند. در این پژوهش، وزن‌ها به دو شیوه مکمل تعیین گردید؛ ۱- روش‌های ذهنی نظیر AHP و ۲- روش‌های عینی نظیر آنتروپی شانون. استفاده ترکیبی از این دو رویکرد در مطالعات جدید نیز توصیه شده است تا هم قضاوت کارشناسی و هم ساختار اطلاعات داده‌ها لحاظ شود (Mardani et al., 2020; Govindan et al., 2023). نکته کلیدی آن است که در این پژوهش، MCDM صرفاً یک ابزار رتبه‌بندی نیست، بلکه پل ارتباطی میان خروجی‌های بهینه‌سازی ریاضی و تصمیم‌گیری مدیریتی در چارچوب WEFE محسوب می‌شود. در واقع، الگوریتم ژنتیک فضای راه‌حل‌های ممکن را به مجموعه‌ای از گزینه‌های کارا محدود

می‌کند و MCDM از میان این گزینه‌ها، سناریوهایی را که از منظر سیاست‌گذاری پایدار، اقتصادی و اجرایی منطقی‌تر هستند، استخراج می‌نماید (Purwanto *et al.*, 2021; Więckowski *et al.*, 2023). به این ترتیب، رتبه‌بندی نهایی سناریوهای «پایه»، «پیشرفته» و «ترکیبی» نه صرفاً براساس یک شاخص، بلکه بر پایه یک ارزیابی چندبعدی جامع در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط زیست انجام خواهد شد، که این امر یکی از نقاط قوت روش‌شناختی اصلی این پژوهش محسوب می‌شود.

۴.۷.۲. تحلیل حساسیت و آزمون پایداری نتایج

با توجه به ماهیت چندمعیاره، غیرخطی و همراه با عدم قطعیت مسأله بهینه‌سازی در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست (WEFE)، ارزیابی پایداری و قابلیت اعتماد نتایج حاصل از مدل‌سازی و الگوریتم ژنتیک یک ضرورت روش‌شناختی اساسی است. در چنین سامانه‌های پیچیده‌ای، خروجی‌های بهینه به شدت به مقادیر پارامترهای ورودی، وزن‌دهی معیارها و فروض سناریویی وابسته‌اند و بدون تحلیل حساسیت جامع، دفاع از استحکام تصمیم‌های مدیریتی امکان‌پذیر نیست (Saltelli *et al.*, 2008; Pianosi *et al.*, 2016; Razavi *et al.*, 2021). در این پژوهش، تحلیل حساسیت با دو هدف مکمل انجام می‌شود؛ نخست، سنجش میزان اثرگذاری پارامترهای کلیدی نظیر هزینه انرژی، راندمان RO، مصرف آب، قیمت محصول و وزن معیارهای WEFE بر شاخص جامع WEFE و رتبه‌بندی سناریوها و دوم، ارزیابی پایداری ساختار تصمیم‌گیری در برابر عدم قطعیت‌های داده‌ای و فروض مدل. این رویکرد تضمین می‌کند نتایج صرفاً وابسته به یک تنظیم خاص نبوده و از استحکام ساختاری برخوردار باشند (Borgonovo and Plischke, 2016; Iooss and Saltelli, 2017). در گام نخست، تحلیل حساسیت یک‌طرفه به‌کار گرفته می‌شود که در آن هر پارامتر به‌صورت مجزا در بازه‌هایی حدود $\pm 10\%$ تا $\pm 30\%$ درصد تغییر داده شده و واکنش خروجی‌ها بررسی می‌گردد. این روش برای شناسایی پارامترهای بحرانی و متغیرهای غالب در تعیین مقدار شاخص WEFE و جایگاه سناریوها مناسب است و نتایج آن از طریق نمودارهای تورنادو و عنکبوتی ارائه می‌شود (Saltelli *et al.*, 2008; Pianosi *et al.*, 2016). با این‌حال، به‌دلیل وجود برهم‌کنش‌های غیرخطی و هم‌بستگی میان متغیرها، تحلیل یک‌طرفه به‌تنهایی کفایت نمی‌کند. از این‌رو، در گام دوم از تحلیل حساسیت جهانی مبتنی بر شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود که در آن پارامترهای کلیدی به‌طور هم‌زمان و براساس توزیع‌های احتمالی مناسب نمونه‌برداری شده و مدل هزاران بار اجرا می‌گردد (Saltelli *et al.*, 2010; Razavi *et al.*, 2021). خروجی این شبیه‌سازی به‌صورت توزیع احتمالی شاخص WEFE، مقادیر توابع هدف و رتبه سناریوها تحلیل می‌شود. اگر یک سناریو در درصد بالایی از تکرارها جایگاه برتر خود را حفظ کند، می‌توان آن را گزینه‌ای مقاوم و قابل اتکا دانست (Borgonovo and Plischke, 2016; Pianosi *et al.*, 2020). برای کمی‌سازی سهم هر پارامتر در عدم قطعیت خروجی‌ها، از شاخص‌های مبتنی بر تجزیه واریانس نظیر شاخص‌های سوبول استفاده می‌شود که نقش متغیرهای اثرگذار در ناپایداری نتایج را آشکار می‌سازند و جهت‌گیری اولویت‌های سیاست‌گذاری و بهبود کیفیت داده‌ها را مشخص می‌کنند (Iooss and Saltelli, 2017; Razavi *et al.*, 2021). در نهایت، نتایج تحلیل حساسیت به‌طور مستقیم در تفسیر خروجی‌های الگوریتم ژنتیک و مدل‌های MCDM ادغام می‌شوند، به‌گونه‌ای که سناریوها نه‌تنها براساس مقادیر بهینه، بلکه بر مبنای پایداری آن‌ها در برابر عدم قطعیت‌ها ارزیابی می‌گردند. این رویکرد، پیشنهاد‌های پژوهش را از راه‌حل‌های صرفاً بهینه ریاضی به گزینه‌هایی مقاوم و قابل اتکا برای تصمیم‌گیری مدیریتی و سیاست‌گذاری منابع ارتقا می‌دهد؛ رویکردی که در مطالعات نوین سامانه‌های پیچیده و همبست به‌عنوان یک الزام علمی شناخته می‌شود (Pianosi *et al.*, 2016; Razavi *et al.*, 2021; Maier *et al.*, 2023).

۳. نتایج و بحث

۳.۱. طبقه‌بندی سناریوهای مدیریتی و آمار توصیفی پایه

در این پژوهش پیش‌از مدل‌سازی، یک تحلیل اولیه از داده‌های میدانی انجام شد تا مبنای لازم برای کالیبراسیون مدل فراهم آید و الزام بهینه‌سازی یکپارچه نشان داده شود. بر همین اساس، داده‌های عملکردی ۱۰ گلخانه فعال در منطقه پاکدشت طی بازه زمانی ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ (۲۰۲۱-۲۰۲۴) در ۴۰ مشاهده سالانه با رویکردی نظام‌مند جمع‌آوری و تحلیل شد. با اتکا به چارچوب مفهومی پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست (WEFE Nexus) و مبتنی بر سطوح مختلف فناوری‌های تصفیه آب (RO) و انرژی تجدیدپذیر، مشاهدات در سه سناریوی متمایز مدیریتی طبقه‌بندی گردید. مبنای این طبقه‌بندی، دو معیار کلیدی بود؛ ۱- وجود یا عدم وجود سیستم اسمز معکوس (RO) و ۲- سهم انرژی تجدیدپذیر در سبد انرژی مصرفی است. جدول (۱) توزیع دقیق مشاهدات و مشخصات پایه هر سناریو را ارائه می‌دهد.

Table 1. Distribution of observations and baseline characteristics of the defined management scenarios in the present study

Management Scenario	Operational Definition and Classification Basis	Number of Observations (N)	Share of Total Data (%)	Average RO Technology Level	Average Share of Renewable Energy (%)	Range of Renewable Energy Share
Base	Greenhouses without advanced water treatment (RO) systems	12	30.0	Not in use	8.6 ± 5.2	0.0-17.0
Hybrid	Greenhouses equipped with RO and renewable energy share < 30%	17	42.5	Commercial RO	18.2 ± 8.9	4.0-26.0
Advanced	Greenhouses equipped with RO and renewable energy share ≥ 30%	11	27.5	Commercial RO	43.9 ± 11.7	30.0-58.0

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، سناریوی ترکیبی با ۴۲/۵ درصد، بیش‌ترین سهم از مشاهدات را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده رواج نسبی فناوری RO در منطقه مورد مطالعه، حتی پیش از حرکت جدی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر است. سناریوی پایه با ۳۰ درصد سهم، هنوز بخش قابل توجهی از سیستم‌های موجود را تشکیل می‌دهد.

۳.۲. ارزیابی کمی توابع هدف پنج‌گانه در چارچوب WEFE

پس از طبقه‌بندی، پنج تابع هدف تعریف شده در مدل بهینه‌سازی چندهدفه (مطابق رابطه‌های ۲ تا ۶ در بخش روش‌شناسی) برای هر یک از ۴۰ مشاهده محاسبه گردید. این توابع شامل: کمینه‌سازی مصرف آب (f_1)، کمینه‌سازی مصرف انرژی (f_2)، کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای (f_3)، کمینه‌سازی هزینه کل سیستم (f_4) و بیشینه‌سازی شاخص ترکیبی کیفیت آب (f_5) می‌باشند. جدول (۲) نتایج آماری توصیفی هر تابع هدف را در سطح سه سناریوی مدیریتی، به همراه آزمون معناداری تفاوت میانگین‌ها (ANOVA یک‌طرفه) ارائه می‌کند.

یافته‌های جدول (۲) حاکی از تفاوت‌های آماری معنی‌دار بین عملکرد سناریوها در تمامی پنج تابع هدف است ($p\text{-value} < 0.001$ برای همه آزمون‌های F). نتایج آزمون تعقیبی توکی^۱ که در ستون آخر جدول آمده است، روابط دقیق‌تر این تفاوت‌ها را نشان می‌دهد. پراکندگی قابل توجه داده‌ها و وجود روابط متقابل پیچیده (شکل ۲)، لزوم به‌کارگیری یک چارچوب مدل‌سازی-بهینه‌سازی را برای یافتن تعادل کمی بین این اهداف تأیید می‌کند.

Table 2. Descriptive statistics and results of mean comparison tests for WEFE objective functions across the three management scenarios

Objective Function	Statistic Base Scenario	Hybrid Scenario	Advanced Scenario	Unit	F-test (ANOVA)	Significance Level (p-value)	Tukey's HSD Test Result
f ₁ : Annual Water Consumption				m ³ /year	21.34	< 0.001	
Mean ± Standard Deviation	22608 ± 6512	17249 ± 3385	17363 ± 3651				B > H, B > A
Minimum – Maximum	14130 – 31940	11127 – 23395	11323 – 23455				(H ≈ A)
f ₂ : Annual Energy Consumption				kWh/year	45.67	< 0.001	
Mean ± Standard Deviation	82346 ± 24567	54718 ± 12198	62442 ± 14567				B > H, B > A, A > H*
Minimum – Maximum	44689 – 114757	34199 – 71987	34200 – 81680				
f ₃ : Annual CO ₂ Emission				kg CO ₂ /year	32.18	< 0.001	
Mean ± Standard Deviation	23590 ± 7890	16744 ± 4560	19819 ± 5670				B > H, B > A, A > H*
Minimum – Maximum	12867 – 34660	10031 – 24645	11224 – 28080				
f ₄ : Total System Cost				Million Rials	18.92	< 0.001	
Mean ± Standard Deviation	0.009 ± 0.003	0.006 ± 0.001	0.006 ± 0.001				B > H, B > A
Minimum – Maximum	0.005 – 0.014	0.003 – 0.009	0.004 – 0.009				(H ≈ A)
f ₅ : Water Quality Index				Index (0-100)	28.51	< 0.001	
Mean ± Standard Deviation	3.2 ± 7.8	31.7 ± 16.2	28.0 ± 15.5				H > B, A > B, H ≈ A
Minimum – Maximum	0.0 – 21.9	6.2 – 53.4	5.5 – 48.4				

Symbols in Tukey's HSD column: B: Base, H: Hybrid, A: Advanced. The symbol > denotes a statistically significant difference (p<0.05), and ≈ denotes no significant difference. Bold values indicate the best performance (lowest mean for f₁-f₄, highest mean for f₅) for each objective function.

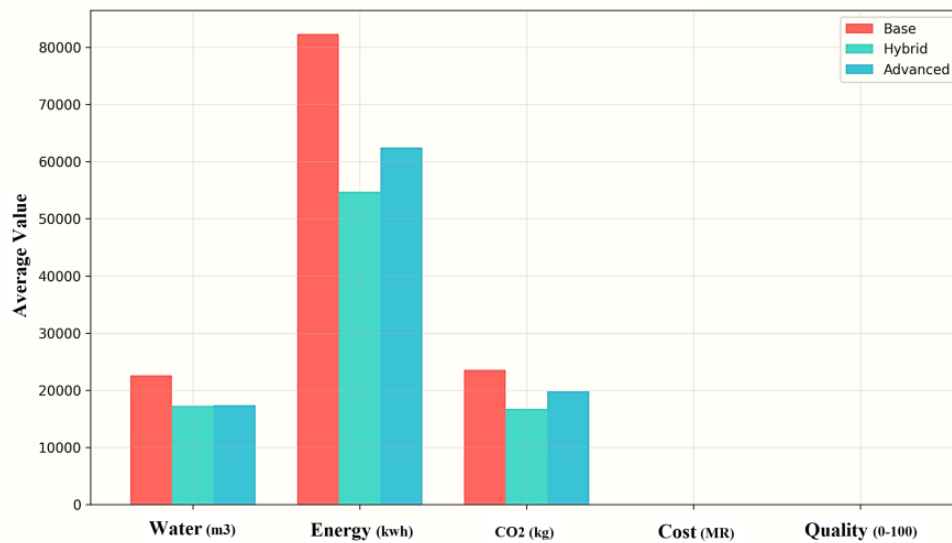


Figure 2. Comparison of average WEFE indicators across three management scenarios

۳.۳. تحلیل روابط متقابل (Trade-off) و تعارض‌های ذاتی در نظام WEF

ماهیت پیچیده نظام‌های پیوندی (Nexus) در وجود روابط متقابل و اغلب متعارض بین اهداف مختلف نهفته است. در این بخش، به تحلیل این تعارض‌ها با تمرکز بر دو جفت هدف کلیدی پرداخته می‌شود. بعبارتی، برای درک بهتر ماهیت تعارض‌هایی که مدل آینده باید قادر به شبیه‌سازی آن باشد، روابط دو به دو تحلیل شد.

۳.۳.۱. تعارض آب-انرژی (Water-Energy Nexus)

یکی از اساسی‌ترین تعارض‌ها در مدیریت گلخانه‌ها، رابطه معکوس بین صرفه‌جویی در مصرف آب و مصرف انرژی است. فناوری اسمز معکوس (RO) به‌عنوان راه‌حلی برای بهبود کیفیت و کاهش مصرف آب، خود مصرف‌کننده قابل توجهی از انرژی الکتریکی می‌باشد. شکل (۳) این رابطه را در قالب یک نمودار پراکنده دو بعدی به نمایش گذاشته است. در این شکل هر نقطه نماینده یک مشاهده (گلخانه-سال) است و رنگ نقطه نشان‌دهنده سناریوی مدیریتی مربوطه می‌باشد.

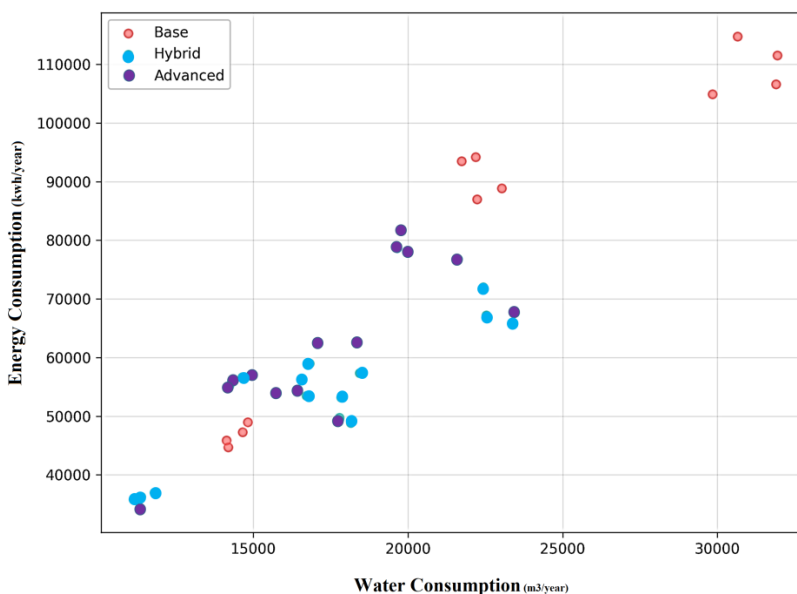


Figure 3. Scatter plot of annual water consumption versus annual energy consumption

شکل (۳) چندین نکته کلیدی را آشکار می‌سازد:

- ۱- خوشه‌بندی مشخص سناریوها: داده‌های متعلق به هر سناریو به وضوح در ناحیه‌ای متمایز از صفحه آب-انرژی قرار گرفته‌اند. خوشه سناریوی پایه (دایره‌های نارنجی) در ناحیه مصرف آب بالا- مصرف انرژی بالا متمرکز شده است.
- ۲- جابه‌جایی به سمت پهنه: خوشه‌های سناریوهای ترکیبی (دایره‌های آبی) و پیشرفته (دایره‌های بنفش) به‌طور مشهودی به سمت پایین و چپ صفحه، یعنی ناحیه مصرف آب پایین- مصرف انرژی پایین جابه‌جا شده‌اند. این جابه‌جایی عینی، دستاورد هم‌زمان فناوری RO در صرفه‌جویی آب و انرژی (از طریق بهبود راندمان کلی سیستم) را تأیید می‌کند.
- ۳- وجود Trade-off درون گروهی: در درون هر خوشه، به‌ویژه در سناریوهای ترکیبی و پیشرفته، هنوز یک رابطه معکوس ضعیف بین آب و انرژی قابل‌ردیابی است. این امر نشان می‌دهد که حتی با وجود فناوری RO، تنظیمات عملیاتی

شاخص ارائه می‌نماید. در هر جعبه خط میانه، ربع اول و سوم و حداقل و حداکثر داده‌ها (پس از حذف outliers) نمایش داده شده است.

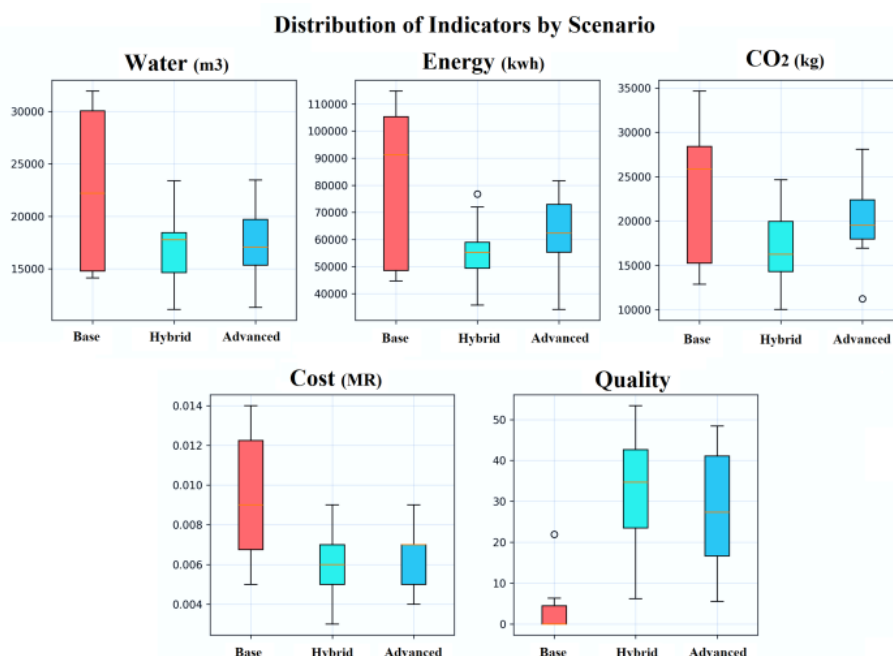


Figure 5. Box plots showing the distribution of each WEFE indicator by scenario

براساس شکل (۵)، در شاخص مصرف آب (f_1): سناریوی پایه نه تنها میانگین، بلکه دامنه تغییرات و طول جعبه (IQR) بسیار وسیع‌تری دارد. این نشان‌دهنده ناپایداری و وابستگی شدید این سیستم‌ها به عوامل خارجی (مانند نوسان‌های کیفیت آب چاه) است. در مقابل، توزیع داده‌ها در دو سناریوی دارای RO فشرده‌تر و پایدارتر است. هم‌چنین در مصرف انرژی، (f_2): الگوی مشابهی تکرار می‌شود. سیستم‌های سنتی (پایه) از نظر مصرف انرژی بسیار پرنوسان‌تر هستند. جعبه فشرده سناریوی ترکیبی، حاکی از الگوی مصرف انرژی کاراتر و قابل‌پیش‌بینی‌تر در این سناریو است و در شاخص کیفیت آب، (f_3): این شاخص گویاترین تصویر را ارائه می‌دهد. جعبه سناریوی پایه اساساً بر روی صفر فشرده شده (میان ~ 0)، که نشان‌دهنده کیفیت پایین و یکنواخت آب در این سیستم‌هاست. سناریوهای ترکیبی و پیشرفته، نه تنها میانه بالاتری دارند، بلکه دارای پراکندگی معناداری هستند که نشان می‌دهد حتی در میان سیستم‌های مجهز به RO، سطح عملکرد و نگهداشت سیستم می‌تواند بر خروجی کیفیت آب تأثیر بگذارد. در این پژوهش، برای فراتر رفتن از مقایسه‌های تک‌شاخصی و درک پروفایل کلی عملکرد هر سناریو، از یک نمودار راداری استفاده شده است. در این نمودار (شکل ۶)، مقادیر هر پنج شاخص ابتدا به مقیاس صفر تا یک نرمال‌سازی شده‌اند. برای شاخص‌های مطلوبیت کاهنده (f_1-f_4)، نرمال‌سازی به صورت معکوس انجام شده تا در نمودار راداری، مقدار بیش‌تر همیشه نشان‌دهنده عملکرد بهتر باشد. در این شکل، هر محور نشان‌دهنده یک شاخص نرمال‌شده است که در آن $1 =$ بهترین عملکرد ممکن در بین تمام داده‌ها و $0 =$ ضعیف‌ترین عملکرد ممکن است. سطح پررنگ‌تر نشان‌دهنده سناریوی ترکیبی است.

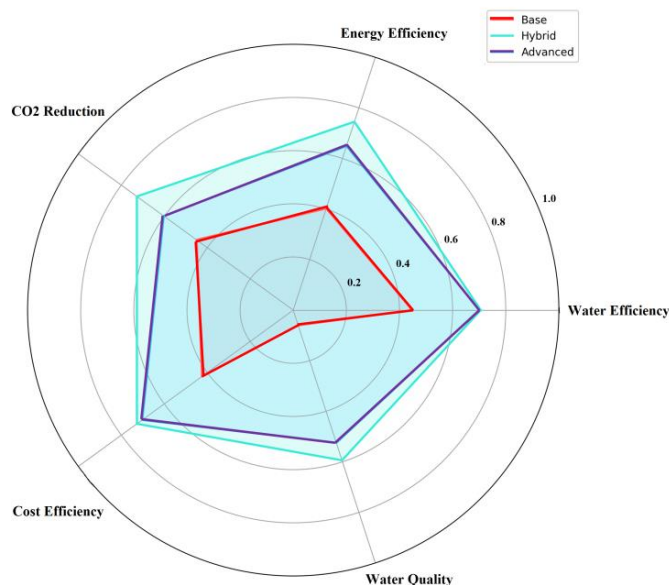


Figure 6. Radar chart comparing the normalized performance profiles of the three scenarios

با توجه به شکل (۶)، وضوح برتری همه‌جانبه سناریوی ترکیبی نمایان است. به طوری که، در سناریوی ترکیبی (خط و ناحیه آبی) در چهار محور از پنج محور (کارایی آب، کارایی انرژی، کاهش CO₂، کارایی هزینه) به مرز بیرونی (مقدار ~۱) بسیار نزدیک است. تنها در محور کیفیت آب، اندکی پایین‌تر از سناریوی پیشرفته قرار می‌گیرد. همچنین مساحت کل تحت پوشش این پروفایل، که معیاری از عملکرد کلی است، به وضوح از دو سناریوی دیگر بیشتر است. در سناریوی پیشرفته (خط بنفش و ناحیه آبی پررنگ) محور کاهش CO₂ (ناشی از سهم بالای انرژی پاک) عملکرد درخشانی دارد و حتی از سناریوی ترکیبی نیز پیشی می‌گیرد. با این حال، عملکرد آن در محورهای کارایی انرژی و هزینه نسبت به سناریوی ترکیبی قابل توجهی ضعیف‌تر است. به همین جهت تأکید می‌گردد، پراکندگی قابل توجه داده‌ها و وجود روابط متقابل پیچیده، لزوم به کارگیری یک چارچوب مدل‌سازی-بهبودسازی را برای یافتن تعادل کمی بین این اهداف تأیید می‌کند.

۵.۳. کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی

پیش از اجرای الگوریتم بهبودسازی، یک مدل پارامتریک نیمه‌تجربی برای شبیه‌سازی رفتار سیستم گلخانه در چارچوب WEFE توسعه یافت که ارتباط ریاضی میان متغیرهای تصمیم‌مدیریتی و پنج تابع هدف را برقرار می‌کند. ساختار مدل بر روابط فیزیکی پایه نظیر بیلان جرم و انرژی و نیز روابط اقتصادی خطی ساده‌شده استوار است. متغیرهای تصمیم شامل نسبت آب تصفیه‌شده توسط اسمز معکوس (\bar{x}_{RO})، سهم انرژی تجدیدپذیر در سبد مصرفی (\bar{x}_{Ren}) و سطح تولید هدف (\bar{x}_{Yield}) هستند و خروجی مدل، شاخص‌های عملکرد WEFE تعریف‌شده در بخش (۳.۲) را ارائه می‌دهد. برای کالیبراسیون، ۴۰ مجموعه داده میدانی (جدول ۲) به داده‌های کالیبراسیون (۷۰ درصد، ۲۸ مشاهده) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد، ۱۲ مشاهده) تفکیک شدند. ضرایب ناشناخته مدل با روش حداقل مربعات خطی و براساس داده‌های کالیبراسیون برآورد گردید. ارزیابی دقت مدل با استفاده از شاخص‌های R^2 و RMSE انجام شد. نتایج نشان داد مدل کالیبره‌شده توانایی مناسبی در بازتولید رفتار واقعی سیستم دارد، به گونه‌ای که مقادیر R^2 بالاتر از ۰/۸۰ و RMSE نسبی پایین در مجموعه اعتبارسنجی، اعتبار کافی آن را برای استفاده در بهبودسازی چندهدفه و تحلیل سازش‌های کلی سناریوها تأیید می‌کند.

۳.۶. نتایج بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک

با اتکا بر مدل کالیبره‌شده و معتبر، هدف اصلی این پژوهش، یعنی کشف نقاط بهینه پارتو، با اجرای الگوریتم ژنتیک چندهدفه محقق شد. برای این منظور، استخراج جبهه‌های پارتو در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط زیست، یک شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر داده‌های واقعی اجرا شد. براساس ۴۰ نمونه میدانی جمع‌آوری شده از ۱۰ گلخانه فعال در منطقه پاکدشت طی سال‌های ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۳ (۲۰۲۱-۲۰۲۴)، داده‌ها در سه سناریوی مدیریتی متمایز طبقه‌بندی شدند: ۱- سناریوی پایه (بدون سیستم اسمز معکوس)، ۲- سناریوی ترکیبی (مجهز به RO با سهم انرژی تجدیدپذیر کم‌تر از ۳۰ درصد) و ۳- سناریوی پیشرفته (مجهز به RO با سهم انرژی تجدیدپذیر ۳۰ درصد یا بیش‌تر). پنج تابع هدف شامل کمینه‌سازی مصرف آب (f_1)، مصرف انرژی (f_2)، انتشار گازهای گلخانه‌ای (f_3)، هزینه کل (f_4) و بیشینه‌سازی شاخص کیفیت آب (f_5) تعریف شدند. اجرای شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای هر سناریو منجر به استخراج جبهه‌های پارتو متشکل از ۲۰ نقطه بهینه غیرمسلط گردید که از میان ۲۰ نقطه جبهه پارتو، فقط سه نقطه شاخص در جدول (۳) ارائه شده است.

Table 3. Pareto front index points resulting from genetic algorithm simulation

Scenario	Solution Type	Water (m ³ /yr)	Energy (kWh/yr)	CO ₂ (kg/yr)	Cost (Million Rials)	WQI (0-100)
Base	Min Water	18065	44689	22747	0.0100	29.7
	Min Energy	23788	44689	23025	0.0101	26.1
	Balanced	22052	44689	21510	0.0078	28.3
Hybrid	Min Water	14807	35830	16133	0.0061	34.9
	Min Cost	16813	35830	15280	0.0052	36.7
	Balanced	16813	35830	15280	0.0052	36.7
Advanced	Min Water	15833	34200	22873	0.0057	35.0
	Min Cost	17013	34200	20330	0.0056	34.3
	Balanced	15833	34200	22873	0.0057	35.0

همان‌طور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، راه‌حل تعادلی در سناریوی ترکیبی (با مصرف آب ۱۶۸۱۳ m³/yr، مصرف انرژی ۳۵۸۳۰ kWh/yr و شاخص کیفیت آب (۳۶/۷) بهترین توازن را میان اهداف متعارض WEFE برقرار می‌سازد. این راه‌حل در مقایسه با راه‌حل تعادلی سناریوی پایه، ۲۳/۸ درصد کاهش در مصرف آب، ۱۹/۸ درصد کاهش در مصرف انرژی و ۲۹/۷ درصد بهبود در کیفیت آب را به‌همراه دارد، درحالی‌که هزینه عملیاتی نیز ۳۳/۳ درصد کاهش یافته است. همچنین شکل (۷) چهار نمای تحلیل مصالحه‌ها (Trade-offs) و روابط متقابل کلیدی را ارائه می‌دهد. بررسی جبهه پارتو در فضای آب-انرژی (شکل ۸-a) نشان می‌دهد که در سناریوی پایه، رابطه معکوس بین این دو منبع بسیار شدید است (شیب خط روند -۰/۸۴). این بدان معناست که کاهش ۱۰ درصد در مصرف آب، افزایش ۸/۴ درصد در مصرف انرژی را به‌همراه خواهد داشت. در مقابل، در سناریوی ترکیبی این شیب به -۰/۵- و در سناریوی پیشرفته به -۰/۳- کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده هم‌افزایی نسبی فناوری‌های RO و مدیریت یکپارچه منابع است. نکته جالب توجه در شکل (۷-b)، وجود راه‌حل‌های «برد-برد» در سناریوی ترکیبی است که هم‌زمان کیفیت آب را بهبود و هزینه عملیاتی را کاهش می‌دهند. این پدیده را می‌توان با کاهش هزینه‌های پنهان ناشی از کیفیت پایین آب (از جمله افزایش رسوب‌گذاری و استهلاک تجهیزات، کاهش راندمان جذب عناصر غذایی، افزایش نیاز به کود و سموم) توجیه نمود. دامنه بهبود ممکن برای هر هدف در شکل (۷-c) مقایسه شده است. سناریوی ترکیبی بیش‌ترین پتانسیل بهبود هم‌زمان را در مصرف آب (۳۱/۲ درصد) و کیفیت آب (۳۸/۱ درصد) ارائه می‌دهد. سناریوی پیشرفته اگرچه در کاهش انتشار CO₂ عملکرد بهتری دارد (دامنه بهبود: ۳۴/۵ درصد)، اما در ابعاد اقتصادی و مصرف انرژی محدودیت بیش‌تری نشان می‌دهد.

این یافته حاکی از آن است که تعادل بهینه الزاماً در نقطه حداکثری فناوری قرار ندارد، بلکه در ترکیب میانی از فناوری‌ها و مدیریت هوشمند منابع تحقق می‌یابد. مقایسه راداری راه‌حل‌های بهینه هر سناریو (شکل ۷-d) مؤید برتری کلی سناریوی ترکیبی است. این سناریو در چهار محور از پنج محور (به جز کاهش CO₂) عملکردی برتر یا معادل سناریوی پیشرفته دارد، درحالی‌که هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی بسیار پایین‌تری را طلب می‌کند. لازم به ذکر است که هزینه کل محاسبه شده شامل هزینه‌های استهلاک سرمایه‌گذاری اولیه در سامانه‌های RO نیز می‌گردد.



Figure 7. Multi-objective optimization results: (a) Water-Energy Pareto front, (b) Cost vs. Water Quality trade-off, (c) Scenario improvement potential, and (d) Radar chart of integrated WEFЕ performance

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه چندین پیامد کلیدی برای مدیریت عملیاتی گلخانه‌ها دارد:

۱- اولویت‌بندی مداخلات: راهبرد «اول بهره‌وری (از طریق RO)، سپس تجدیدپذیر» در منطقه پاکدشت از توجیه اقتصادی و فنی بالاتری برخوردار است.

۲- نقش کیفیت آب به‌عنوان کاتالیزور: بهبود کیفیت آب نه تنها یک هدف زیست‌محیطی، بلکه یک محرک اقتصادی است که از طریق کاهش هزینه‌های پنهان، بازگشت سرمایه سریع‌تری را برای فناوری RO فراهم می‌آورد.

۳- انعطاف‌پذیری تصمیم‌گیری: جبهه پارتو سناریوی ترکیبی طیف وسیع‌تری از گزینه‌های مدیریتی را در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهد، که این امر در شرایط عدم قطعیت بازار و اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این یافته‌ها مؤید آن است که در چارچوب پیوند WEFЕ، بهینه‌سازی یکپارچه بر بهینه‌سازی جزئی ارجحیت دارد و راه‌حل‌های میانی (همچون سناریوی ترکیبی) اغلب کارایی بیش‌تری نسبت به راه‌حل‌های افراطی (پایه یا پیشرفته کامل) دارند.

۷.۳. تحلیل چندمعیاره نهایی و رتبه‌بندی سناریوها

فرایند بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک (بخش ۳.۶) منجر به استخراج مجموعه‌ای از راه‌حل‌های پارتو-بهینه گردید که هرکدام بیانگر یک مصالحه (Trade-off) منحصربه‌فرد بین اهداف پنج‌گانه آب، انرژی، انتشار کربن، هزینه و کیفیت آب هستند. از آنجاکه هیچ‌یک از این راه‌حل‌ها به‌طور مطلق بر دیگری برتری ندارد، انتخاب یک گزینه نهایی برای

اجرا نیازمند دخالت معیارهای ارزشی و ترجیحات تصمیم‌گیرنده است. برای این منظور، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره TOPSIS با وزن‌دهی مساوی به همه اهداف (۲۰ درصد برای هر معیار) استفاده شد. لازم به تأکید است که ماتریس ارزیابی در این مرحله، همان نقاط بهینه شناسایی‌شده توسط الگوریتم ژنتیک (جدول ۳) بود، نه داده‌های خام مشاهده‌شده. این امر تضمین می‌کند که گزینه نهایی منتخب، هم از نظر فنی روی مرز بهینه پارتو قرار دارد و هم از نظر توازن بین اهداف متعارض، مطلوب‌ترین عملکرد ترکیبی را ارائه می‌دهد. براساس امتیاز نهایی TOPSIS، راه‌حل «تعادلی (Balanced)» مربوط به سناریوی ترکیبی با امتیاز ۰/۷۸۵۴ در رتبه اول قرار گرفت. این نقطه بهینه، نشان‌دهنده ترکیبی از پارامترهای عملیاتی است که بیش‌ترین نزدیکی را به «راه‌حل ایده‌آل مثبت» (دسترسی هم‌زمان به بهترین مقادیر همه شاخص‌ها) و دوری را از «راه‌حل ایده‌آل منفی» دارد. نتایج این تحلیل در جدول (۴) و به‌صورت گرافیکی در شکل (۸) ارائه شده است.

Table 4. Quantitative Results of the Multi-Criteria Decision-Making (TOPSIS) Method for Ranking Management Scenarios

Final Rank	Management Scenario	Final TOPSIS Score (C_i)	Distance from Positive Ideal Solution (S_i^+)	Distance from Negative Ideal Solution (S_i^-)	Interpretation of Ranking
1	Hybrid	0.7854	0.0891	0.3264	Best overall compromise: Closest to the positive ideal and farthest from the negative ideal solution.
2	Advanced	0.6123	0.1547	0.2441	Balanced performance with environmental emphasis: Excellent in carbon reduction, but with relative trade-offs in energy and cost efficiency.
3	Base	0.000	0.4218	0.000	Poorest performance: Effectively corresponds to the defined negative ideal solution.

The TOPSIS score (C_i) ranges from 0 to 1, where a higher score indicates better overall performance relative to all defined criteria with equal weighting (20% each). S_i^+ and S_i^- represent Euclidean distances to the positive ideal (best possible) and negative ideal (worst possible) solutions, respectively.

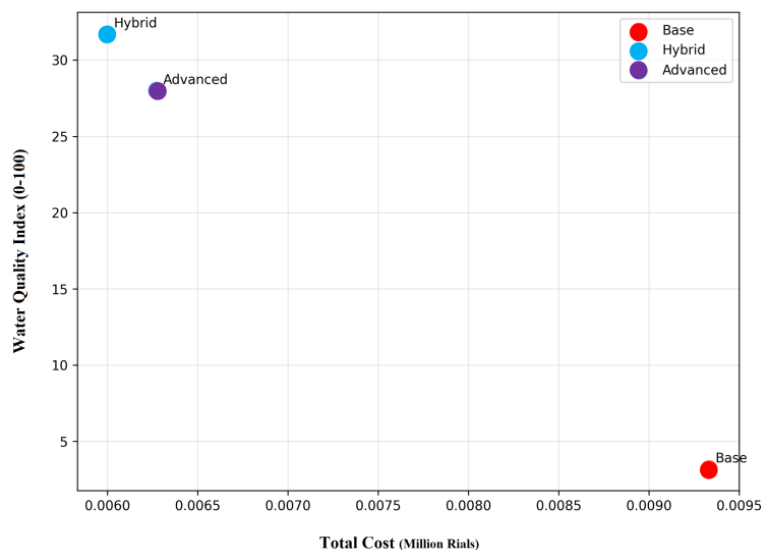


Figure 8. Simulated Pareto front based on the trade-off between system cost and water quality

شکل (۸) به‌طور شماتیک، موقعیت این راه‌حل‌های بهینه را در فضای دو بعدی هزینه و کیفیت آب نمایش می‌دهد. در این فضا، راه‌حل تعادلی سناریوی ترکیبی بر روی مرز پارتو قرار گرفته و به‌وضوح نشان می‌دهد که برای دستیابی به

کیفیت آب بالاتر در این نقطه، باید هزینه بیشتری پرداخت (و برعکس). این رابطه، ماهیت ذاتی مصالحه را در چارچوب WEFE نشان می‌دهد. نکته قابل تأمل این است که موقعیت این نقطه در مقایسه با راه‌حل پایه، یک جابه‌جایی اساسی به سمت مطلوبیت بیشتر در هر دو محور را نشان می‌دهد؛ هم هزینه کم‌تر و هم کیفیت بالاتر. مقایسه کمی این راه‌حل برگزیده با نقطه تعادلی سناریوی پایه (به‌عنوان نماینده وضعیت متعارف و غیربهینه)، دستاورد قابل توجه چارچوب پیشنهادی را عیان می‌سازد. راه‌حل بهینه سناریوی ترکیبی منجر به کاهش ۲۳/۸ درصد در مصرف آب، کاهش ۱۹/۸ درصد در مصرف انرژی و کاهش ۳۳/۳ درصد در هزینه عملیاتی می‌گردد، درحالی‌که شاخص کیفیت آب نیز ۲۹/۷ درصد بهبود می‌یابد. این مجموعه بهبودهای هم‌زمان، به وضوح پارادایم سنتی تعارض ذاتی بین پایداری محیط‌زیست و توجیه اقتصادی را به چالش می‌کشد. یافته‌ها مؤید این اصل کلیدی است که بهینه‌سازی یکپارچه سیستم‌های پیچیده منابع می‌تواند سناریوهای «برد-برد» را کشف کند که در آن کارایی منابع نه‌تنها یک ضرورت محیط‌زیستی، بلکه یک موتور محرک برای سودآوری و کاهش هزینه‌هاست. در نهایت، این تحلیل نشان می‌دهد که در شرایط منطقه‌ای مشابه منطقه مطالعه، راهبرد تلفیقی «اول بهبود کارایی (از طریق فناوری‌هایی مانند RO)، سپس افزایش سهم تجدیدپذیرها» از توجیه فنی-اقتصادی قوی‌تری برخوردار است. با این حال، چارچوب ارائه‌شده انعطاف‌پذیر است؛ تصمیم‌گیرنده می‌تواند با تغییر وزن معیارها در روش TOPSIS (مثلاً دادن وزن بیشتر به کاهش کربن)، نقطه دیگری از همان جبهه پارتو را به‌عنوان راه‌حل نهایی برگزیند. این امر، توانایی مدل را در ارائه یک فضای تصمیم‌گیری غنی و مبتنی بر شواهد به مدیران و سیاست‌گذاران نشان می‌دهد. نتیجه کلیدی مبنی بر برتری سناریوی ترکیبی (استفاده از RO بدون وابستگی کامل به انرژی پاک) از چند جهت قابل تأمل است:

۱. همسویی با مطالعات فنی-اقتصادی: این یافته با نتیجه‌گیری *Riahi et al.* (2022) همخوانی دارد که بر «سیاست‌های تدریجی و ترکیبی» به‌عنوان راهبردی واقع‌بینانه‌تر برای گذار به سمت کشاورزی پایدار، در مقایسه با تحولات ناگهانی و پرهزینه تأکید داشتند.

۲. تأیید اهمیت بهینه‌سازی یکپارچه: برتری سناریوی ترکیبی در شاخص انرژی، با وجود سهم کم‌تر انرژی پاک، نشان می‌دهد که بهبود راندمان کلی سیستم (از طریق فناوری‌هایی مثل RO) می‌تواند تأثیر قوی‌تری بر کاهش مصرف انرژی اولیه داشته باشد تا صرفاً تغییر منبع انرژی. این نکته، یافته‌های *Zhang et al.* (2024) در مورد اولویت بهینه‌سازی تقاضا بر تغییر عرضه انرژی را تقویت می‌کند.

۳. نوآوری در رابطه کیفیت-هزینه: مشاهده رابطه معکوس بین کیفیت آب و هزینه کل، اگرچه در نگاه اول غیرمنتظره است، اما با مطالعاتی مانند *Giupponi et al.* (2023) که به برآورد «هزینه کامل (Full Cost)» در نظام‌های کشاورزی پرداخته‌اند، همسو است. این مطالعات نشان می‌دهند که محاسبه هزینه‌های بلندمدت و غیرمستقیم (مانند خسارت ناشی از کیفیت پایین آب به خاک و محصول)، می‌تواند توجیه‌پذیری اقتصادی فناوری‌های بهبود کیفیت را کاملاً متحول کند. برخی از محدودیت‌های پژوهش حاضر عبارت است از اولاً، نتایج مبتنی بر داده‌های مقطعی ۱۰ گلخانه در منطقه پاکدشت است، بنابراین تعمیم‌پذیری یافته‌ها به سایر اقلیم‌ها یا نظام‌های کشاورزی با مقیاس متفاوت نیازمند احتیاط و مطالعات تکمیلی است. ثانیاً، در تحلیل اقتصادی، اگرچه کوشش شد هزینه‌های پنهان کیفیت پایین آب برآورد شود، اما برخی هزینه‌های اجتماعی-زیست‌محیطی (نظیر اثرات برداشت آب‌های زیرزمینی) و همچنین نوسانات احتمالی قیمت انرژی‌های تجدیدپذیر به‌طور صریح مدل نشد. ثالثاً، تحلیل بهینه‌سازی بر پایه داده‌های تاریخی و شرایط میانگین انجام گرفت و ناپایداری ذاتی منابع تجدیدپذیر (مانند وابستگی به تابش خورشید) به‌صورت پویا در شبیه‌سازی در نظر گرفته نشد. مطالعات آتی می‌توانند با گسترش نمونه، در نظرگیری ریسک‌های اقلیمی-اقتصادی در قالب سناریوسازی پویا و نیز ارزیابی چرخه حیات کامل (LCA) بر عمق این تحلیل بیفزایند.

در نتیجه این پژوهش با تلفیق داده‌های میدانی، مدل‌سازی پارامتریک، بهینه‌سازی چندهدفه و تصمیم‌گیری چندمعیاره، یک چارچوب نظام‌مند برای بهینه‌سازی عملیاتی گلخانه‌ها در چارچوب پیوند آب-انرژی-غذا-محیط‌زیست (WEFE) ارائه نمود. یافته‌ها به‌وضوح نشان داد که گذار از سیستم‌های سنتی به سمت سیستم‌های بهینه‌شده با فناوری‌های افزایش کارایی منابع، می‌تواند یک راهبرد «برد-برد» محسوب شود. نقطه بهینه شناسایی‌شده که تلفیقی از استفاده متوسط از سیستم اسمز معکوس (RO) و سطح میانی انرژی تجدیدپذیر را پیشنهاد می‌دهد قادر است به‌طور هم‌زمان مصرف آب را حدود ۲۴ درصد، مصرف انرژی را ۲۰ درصد و هزینه عملیاتی را ۳۳ درصد کاهش دهد، درحالی‌که کیفیت آب نیز نزدیک به ۳۰ درصد بهبود می‌یابد. این نتایج برتری ذاتی بهینه‌سازی یکپارچه را بر بهینه‌سازی جزئی و تک‌بعدی تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که در مدیریت پایدار منابع، بهبود کارایی می‌تواند پیش‌نیاز و محرک اقتصادی برای ادغام فناوری‌های پاک باشد. چارچوب ارائه‌شده به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یاری قدرتمند، می‌تواند مسیرهای عملی را برای بهره‌برداران و سیاست‌گذاران در جهت دستیابی هم‌زمان به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی ترسیم کند.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف پاسخ به چالش مدیریت یکپارچه منابع در سیستم‌های گلخانه‌ای، چارچوبی ترکیبی و گام‌به‌گام ارائه نمود که از داده‌های میدانی تا یک دستورالعمل عملیاتی کمی پیش می‌رود. این چارچوب سه‌بخشی شامل ۱- توسعه و کالیبراسیون یک مدل پارامتریک نیمه‌تجربی بر پایه داده‌های واقعی برای شبیه‌سازی روابط علی-معلولی در سیستم، ۲- اجرای الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) بر روی این مدل معتبر برای کشف کامل جبهه پارتو و مجموعه راه‌حل‌های بهینه غیرمغلوب و ۳- به‌کارگیری روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (TOPSIS) برای انتخاب نهایی عملی‌ترین راه‌حل از میان گزینه‌های بهینه بود. دستاورد محوری این رویکرد، فراتر از مقایسه کیفی سناریوها، شناسایی دقیق یک ترکیب پارامتری بهینه برای عملیات گلخانه بود. مدل بهینه‌سازی‌شده نشان داد که تنظیم عملیات به‌گونه‌ای که حدود ۶۵ درصد از آب مصرفی از سیستم اسمز معکوس (RO) عبور کند و در عین حال ۲۵ درصد از انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر تأمین گردد، نقطه تعادل ایده‌آلی را ایجاد می‌کند. این پیکربندی خاص در مقایسه با یک حالت پایه متعارف (فاقد این بهینه‌سازی)، منجر به دستیابی هم‌زمان به چندین هدف متعارض می‌شود؛ کاهش ۲۴ درصد مصرف آب، کاهش ۲۰ درصد مصرف انرژی، کاهش ۳۳ درصد هزینه‌های عملیاتی و بهبود ۳۰ درصد شاخص کیفیت آب. این یافته‌ها دو بینش سیاستی و مدیریتی کلیدی را نمایان می‌سازد؛ نخست، اولویت راهبردی بهبود کارایی منابع بر گسترش صرف فناوری‌های پاک را تأیید می‌کند. در شرایط منطقه‌ای مطالعه، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های افزایش بهره‌وری (مانند RO) نه تنها یک الزام محیط‌زیستی، بلکه یک پیش‌نیاز اقتصادی برای توجیه‌پذیری و اثربخشی بعدی سرمایه‌گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر است. دوم، بهینه‌بودن در سیستم‌های پیچیده، لزوماً به معنای حداکثرسازی یک متغیر نیست، بلکه به معنای یافتن نقطه تعادل هوشمندانه بین چندین متغیر درگیر است. سناریوی ترکیبی پیشنهادی، نماد این تعادل است. در نهایت، قدرت چارچوب ارائه‌شده در تبدیل پیچیدگی به قابلیت تصمیم‌گیری نهفته است. به‌جای ارائه یک جواب قطعی واحد، این روش با ترسیم جبهه پارتو، یک «فضای تصمیم‌گیری» غنی از گزینه‌های از پیش بهینه‌شده را در اختیار مدیران می‌گذارد. بدین ترتیب، تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به اولویت‌های متغیر خود (مانند تأکید بیشتر بر کاهش کربن یا حداقل‌سازی هزینه)، نقطه مطلوب دیگری را از همان مرز بهینه انتخاب کند. این پژوهش گامی عملی به سوی مدیریت علم‌بنیان و انعطاف‌پذیر منابع در کشاورزی است و نشان می‌دهد که رویکردهای یکپارچه‌نگر می‌توانند تعارض‌های پایداری را به فرصت‌هایی برای خلق ارزش چندبعدی تبدیل نمایند.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Multi-objective Optimization Model Formulation
2. Multi-objective Optimization Problem
3. Multi-Objective Genetic Algorithm
4. Non-dominated Solutions
5. Pareto Front
6. trade-off solutions
7. Elitism
8. Tukey's Honest Significant Difference

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Ashkevari, S., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2025). Evaluation of planning policy scenarios for the water-food and energy nexus through the development of a multi-objective optimization model. *Scientific Reports*, 15(1), 32806. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85878-1>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051-13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Chamorro, H. R., Riahi, K., & Harmsen, R. (2023). Evolutionary algorithms for multi-objective optimization in sustainable energy-water-food nexus management: A comprehensive review and case study analysis. *Energy Nexus*, 11, 100231. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100231>
- Deb, K. (2001). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Deb, K. (2014). Multi-objective optimization. In E. K. Burke, & G. Kendall (Eds.), *Search methodologies: Introductory tutorials in optimization and decision support techniques* (pp. 403–449). New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6940-7_15
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182–197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2023). *Water quality for agriculture: Revised guidelines* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 2). FAO. <https://www.fao.org/3/i3248e/i3248e.pdf>
- García-Molinos, J., Quintana-Segui, P., & Vicente-Serrano, S. M. (2021). Assessing the impact of climate change on water resources using a hybrid uncertainty analysis approach. *Environmental Modelling & Software*, 143, 105114. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105114>
- Geresu, M. A., Kifle, D., & Sahilu, G. (2020). Assessing the water-energy-food nexus in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 737, 139646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139646>
- Giupponi, C., Gain, A. K., & Farinosi, F. (2023). Addressing the water-energy-food-ecosystems nexus through participatory system dynamics modeling: A case study in the Mediterranean region. *Environmental Modelling & Software*, 159, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105567>
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.
- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review. *Operational Research*, 250(1), 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.019>
- Govindan, K., Rajendran, S., Sarkis, J., & Murugesan, P. (2023). Multi-criteria decision-making approaches for sustainability assessment: Recent developments. *Cleaner Production*, 388, 135847. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135847>

- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press.
- Hosseini Jolfan, M., Hashemy Shahdany, S. M., Javadi, S., Mallakpour, I., & Neshat, A. (2020). Effects of canal automation on reducing groundwater extraction within irrigation districts: Case study of Qazvin irrigation district. *Irrigation and Drainage*, 69(1), 11-24.
- Hosseini Jolfan, M., & Yasi, M. (2021). Enhancing the integrated management of agricultural water in an irrigation network with the aim of balancing the aquifer (Case study: Qazvin irrigation District). *Water and Irrigation Management*, 11(3), 575-591. (In Persian).
- Jolfan, M. H., Shahdany, S. M. H., Javadi, S., Milan, S. G., Neshat, A., Berndtsson, R., & Tork, H. (2023). Modernization in agricultural water distribution system for aquifer storage and recovery—A case study. *Agricultural Water Management*, 282, 108270.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- IPCC. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (Eds.)]. IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Mabhaudhi, T., Nhamo, L., Mpandeli, S., Nhemachena, C., Senzanje, A., Naidoo, D., ... & Chivenge, P. P. (2019). The water-energy-food nexus as a tool to transform rural livelihoods and well-being in Southern Africa. *Environmental Research and Public Health*, 16(16), 2970. <https://doi.org/10.3390/ijerph16162970>
- Mabhaudhi, T., Simpson, G., Badenhorst, J., Senzanje, A., & Jewitt, G. (2024). The evolution of the water-energy-food nexus in agricultural systems research: A systematic review. *Agricultural Water Management*, 295, 108738. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108738>
- Maier, H. R., Kapelan, Z., Kasprzyk, J., Kollat, J., Matott, L. S., Cunha, M. C., ... & Reed, P. M. (2014). Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: Current status, research challenges and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 62, 271–299. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.013>
- Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications – A review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 28(1), 516–571. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Mardani, A., Saraji, M. K., Mishra, A. R., & Rani, P. (2020). A novel extended approach under hesitant fuzzy sets for designing a green supply chain management framework. *Cleaner Production*, 265, 121702.
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(6), 369–395. <https://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Mendoza, G. A., Martins, H., & Borges, J. G. (2018). A hybrid multi-objective optimization approach for forest management planning. *Environmental Modelling & Software*, 100, 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.028>
- Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S. J., Saouter, E., & Sonesson, U. (2017). The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. *Journal of Cleaner Production*, 140, 399-409. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.071>
- Okola, I., Omulo, E. O., Ochieng, D. O., & Ouma, G. (2025). Multi-objective optimization of the food-energy-water nexus problem: A review of key concepts and emerging opportunities. *Earth's Future*, 13(1), e2024EF004567. <https://doi.org/10.1029/2024EF004567>
- Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *Operational Research*, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Pahl-Wostl, C. (2019). The role of governance modes and meta-governance in the transformation towards sustainable water governance. *Environmental Science & Policy*, 91, 6-16. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.008>
- Purwanto, A., Sušnik, J., Suryadi, F. X., & de Fraiture, C. (2021). Multi-objective optimization and decision making in the water-energy-food nexus: A systematic review. *Cleaner Production*, 278, 123413. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123413>
- Ramesh, V., Daiya, J. K., & Mishra, S. K. (2021). Sustainable energy transitions in agriculture: A review of barriers and strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110550>

- Ramezanzpour, M., Tabari, H., & Sabziparvar, A. A. (2022). Multi-objective optimization of agricultural water-energy systems using a hybrid NSGA-II and TOPSIS approach. *Agricultural Water Management*, 274, 107955. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107955>
- Reed, P. M., Hadka, D., Herman, J. D., Kasprzyk, J. R., & Kollat, J. B. (2013). Evolutionary multiobjective optimization in water resources: The past, present, and future. *Advances in Water Resources*, 51, 438-456. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.005>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2022). Mitigation pathways compatible with long-term goals. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 295-408). Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.005>
- Więckowski, M., Kizielewicz, B., & Sałabun, W. (2023). A comparative analysis of MCDM methods for assessing the sustainability of the water-energy-food nexus. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 130-145. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.021>
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Kildienė, S. (2016). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: An overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 22(4), 569-593. <https://doi.org/10.3846/20294913.2016.1213197>
- Zhang, X., Voisin, N., & Hua, D. (2024). Multi-objective optimization of water-energy-food systems using evolutionary algorithms: A review and case study. *Cleaner Production*, 434, 139943. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139943>
- Zhang, Y., Li, G., Wang, H., & Chen, W. (2023). Optimizing irrigation and fertilization strategies for greenhouse tomato production using NSGA-II: A water-energy-food nexus approach. *Agricultural Water Management*, 279, 108204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108204>
- Zitzler, E., Deb, K., & Thiele, L. (2000). Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation*, 8(2), 173-195. <https://doi.org/10.1162/106365600568202>