



Optimal exploitation model of water resources in the Hendijan plain using the multi-objective bargaining method

Feizollah Mortezaazadeh¹, Mohammad Hossein Pourmohammadi¹, Saeb Khoshnavaz^{1*}, Ebrahim Nohani², Hossein Eslami¹

1- Department of Water Sciences, sho. C., Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

2- Department of Civil Engineering, Materials and Energy Research Center, Dez.C., Islamic Azad University, Dezful, Iran.

*Corresponding Author: Saeb.khoshnavaz@iau.ac.ir

Keywords:

Irrigation optimization, rainfed farming, bargaining, Hendijan.

Extended Abstract

Introduction

In this study, a multi-objective bargaining approach, the Gravitational Search Algorithm (GSA), and Support Vector Regression (SVR) were employed to develop an optimal water allocation and irrigation planning framework for rainfed crops in the Hendijan Plain. The main objectives of the study were to improve water-use efficiency, enhance crop productivity, evaluate water carrying capacity, and promote sustainable agricultural development in the region.

Materials and Methods

Water resources are among the most important limiting factors for agricultural development in arid and semi-arid regions.. Therefore, the optimal utilization and efficient allocation of water resources among different sectors, particularly agriculture, are of great importance. The Hendijan Plain, one of the major agricultural areas in Khuzestan Province, has experienced declining water resources, increasing drought events, and growing pressure on groundwater reserves in recent years.

This study was conducted using a simulation–optimization approach. The Gravitational Search Algorithm (GSA) was applied to determine the optimal water allocation, while

Received:

20 Mar 2025

Revised:

21 May 2025

Accepted:

25 Jun 2025

How to cite this article:

Mortezaazadeh, F; Pourmohammadi, M.H; Khoshnavaz, S; Nohani,E & Eslami, H. (2025). Optimal exploitation model of water resources in the Hendijan plain using the multi-objective bargaining method. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(13), 19-40. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9141.1131>



Support Vector Regression (SVR) was used to predict changes in the water footprint during the period 2010–2020. Required data were collected from documentary sources, questionnaires, field measurements, and meteorological records. Water resource conditions were evaluated using the EFW, ECw, EDw, and DEPI indices, and all simulations, optimizations, and analyses were performed using MATLAB software.

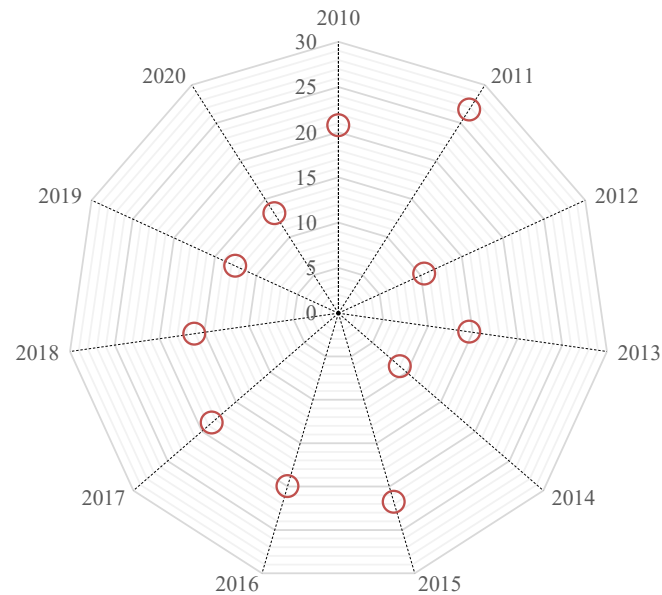


Fig 2. Comparison of water consumption in different years

Result and Conclusion

The results of the water footprint assessment indicated that the agricultural sector accounted for the largest share of water consumption in the study area. The agricultural water footprint remained above 48% throughout the period from 2010 to 2020 and reached approximately 64% in some years, whereas the shares of industrial, urban, and natural-resource sectors showed a declining trend. These findings highlight the dominant role of agriculture in regional water consumption and the considerable pressure exerted on available water resources.

Analysis of water-related economic indicators revealed decreasing trends in both EPw and EPI during the study period. The lower values of EPI compared with EPw indicate an improvement in the economic efficiency of water utilization. However, the results also suggest that substantial opportunities remain for improving the economic structure and enhancing the value generated from water consumption.

The SVR model demonstrated superior predictive performance compared with conventional approaches and provided lower prediction errors. Forecasts suggested that agricultural water

footprints in semi-arid regions have shown an increasing trend in recent years, indicating that pressure on water resources is likely to persist if current management practices continue. These results confirm the applicability of machine-learning techniques as reliable tools for supporting long-term water resources planning.

In the irrigation optimization stage, four crops, namely wheat, barley, canola, and lentil, were evaluated. The cultivated area of rainfed wheat farms ranged from 2 to 76 hectares under existing conditions. By applying the optimization model with the objective of maximizing water-use efficiency, increasing cultivated areas in certain locations was proposed as a strategy to mitigate drought impacts and improve resource utilization.

The analysis of supplementary irrigation revealed that wheat water productivity ranged from 0.23 to 0.57 kg m⁻³. Supplementary irrigation applied during critical growth stages, particularly in May, significantly improved crop performance and water-use efficiency. Under the optimized scenario and without increasing cultivated area, crop yields increased by approximately 17% on average. This finding demonstrates the effectiveness of optimized irrigation scheduling in enhancing agricultural productivity while maintaining sustainable water use.

Comparison with previous studies showed that the yield improvement obtained in this study was consistent with findings reported for Malathani County, where crop performance increased by approximately 23%. Furthermore, water balance analysis indicated that lentil exhibited the highest evapotranspiration ratio, whereas canola showed the lowest. These differences can be attributed to variations in crop water requirements, growth characteristics, and responses to irrigation management scenarios. Overall, the results demonstrate that optimized water allocation and supplementary irrigation can substantially improve water-use efficiency and agricultural productivity under semi-arid conditions.

Conclusion

The findings of this study demonstrated that integrating the multi-objective bargaining approach with the Gravitational Search Algorithm provides an effective framework for agricultural water resources management in semi-arid regions. The dominant share of agricultural water consump



مدل بهره‌برداری بهینه از منابع آب دشت هندیجان با روش چانه‌زنی چندهدفه

فیض‌اله مرتضی زاده^۱، محمدحسین پورمحمدی^۱، صائب خوشنواز^۲، ابراهیم نوحانی^۲، حسین اسلامی^۱

۱- گروه علوم آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.
 ۲- گروه عمران و مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.
 *نویسنده مسئول: Saeb.khoshtnavaz@iau.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

بهینه‌سازی آبیاری، کشت دیم، چانه‌زنی، هندیجان

چکیده

مدیریت منابع آب در کشاورزی یکی از مؤلفه‌های اصلی توسعه پایدار اقتصادی و امنیت غذایی است. گیاهان زراعی از نظر فصل رشد به دو گروه گیاهان بهاره و زمستانه تقسیم می‌شوند. به گیاهان زمستانه در حالت کلی کشت دیم گفته می‌شود. کشت دیم از بارندگی فصل زمستان برای تأمین نیاز آبی استفاده می‌کند. در ابتدای فصل کشت برای تأمین رطوبت خاک چند مرحله آبیاری توصیه می‌شود و در انتهای فصل رشد نیز برای پر شدن دانه برنامه‌ریزی آبیاری تکمیلی انجام می‌شود. تولید گیاهان دیم کمتر از حد پتانسیل است؛ اما بهره‌وری کشت آبی بیشتر است. با توجه به اینکه برخی محدودیت‌ها به علت بارش کم، میزان آب موجود در سد تکاپوی کاشت آبی سطح کشت موجود را نمی‌دهد پس بنابراین در اراضی با کشت آبی ضمن ایجاد کشت دیم از آبیاری تکمیلی در مراحل نیاز آبی گیاه استفاده می‌کنیم هدف از این تحقیق تعیین مدل بهره‌برداری بهینه از منابع آب با روش چانه‌زنی چندهدفه هست که بتوان کاهش سطح کشت به هدف مطلوب رسید.

روش کار به این صورت است که ابتدا به مسئله انتقال آب کشاورزی در دشت هندیجان از استان خوزستان به منظور ارزیابی منابع آب برای کشت دیم پرداخته شده است و سپس مقادیر بهینه آب موردنیاز برای کشت دیم چهار محصول گندم، جو، کلزا و عدس با رویکرد فازی و روش چانه‌زنی چندهدفه و با استفاده از نرم‌افزار محاسبه شده است. بدین ترتیب که ابتدا با تشکیل توابع هدف با متغیرهای تصمیم مسئله به دست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانشی برای یافتن پاسخ‌های فازی حل می‌شود. که در قالب یک مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گردید. علاوه بر این در شرایط کم‌آبی کاهش آبیاری پاییز و تأمین نیاز آبی گیاه در مراحل حداکثر پوشش گیاه ضروری است. حداکثر پوشش گیاه برای گیاهان مطالعه شده از اواخر اسفند تا اواسط اردیبهشت است.

با توجه به نتایج به دست آمده راندمان نسبی تولید محصول در این منطقه برای گندم بین ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بوده است. سهم آبیاری در منطقه تقریباً ۲۲ درصد بوده است. منظور از آبیاری بهینه رسیدن به سطحی از حجم آبیاری تکمیلی است که میزان محصول تولیدی را بدون افزایش سطح زیر کشت بهبود بخشد. با اجرای مدل بهینه با ثابت نگه داشتن سطح زیر کشت تولید محصول به صورت میانگین تا ۱۷ درصد رشد پیدا می‌کند.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۲/۳۰

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۲/۳۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۳/۲۵

مقدمه

پراکنش نامنظم بارندگی در ابعاد زمانی و مکانی موجب افزایش ریسک ناشی از بهره‌برداری آب در تابستان و دیم‌کاری در پاییز و زمستان شده‌است. علاوه بر این بهره‌برداری غیر بهینه از منابع آبی به‌ویژه آب زیرزمینی، خشک‌سالی، عدم رعایت اصول حفاظت در بهره‌برداری و رشد جمعیت، حجم آب در دسترس را به‌شدت کاهش داده و موجب خشک شدن رودخانه‌ها، نشست زمین، از بین رفتن محصولات کشاورزی و مراتع شده‌است. از سوی دیگر سیاست‌های امنیت غذایی و لزوم تسریع در رشد اقتصادی، برنامه‌های مدیریت منابع آب را از دیدگاه تصمیم‌گیرنده و بهره‌بردار وارد رقابت جدیدی کرده است؛ بنابراین بهره‌وری آب یکی از مهم‌ترین عوامل مدنظر تصمیم‌سازان در مدیریت منابع محدود آب است. بهره‌وری آب از دو جنبه قابل‌بررسی است. ابتدا آب موردنیاز گیاهان باید به‌اندازه کافی و در زمان مناسب از طرف سیستم تأمین شود. از دیدگاه تصمیم‌ساز بایستی آب تخصیص‌یافته به‌ازای مساحت تحت کشت کاهش یابد. نهادهای تصمیم‌گیرنده تمایل دارند که آب مورداستفاده در بخش کشاورزی را تا حد ممکن کاهش داده و به مصارف دیگر یا افزایش سطح زیر کشت اختصاص دهند. این مفهوم از بهره‌وری ممکن است موجب کاهش عملکرد در سطح یک هکتار شود که متضاد با دیدگاه بهره‌بردار است. از دیدگاه بهره‌بردار بایستی به‌ازای آب موجود برنامه‌های تنظیم گردد تا نیازهای واقع‌گیا برای تعرق در زمان درست تأمین گردد و نقش تبخیر، رواناب و نفوذ عمقی کاهش یابد. علاوه بر این از نظر زمان‌بندی، آب موردنیاز گیاه در مراحل حساس رشد تأمین گردد تا از اثرات تنش به عملکرد محصول جلوگیری شود. در این شرایط به هر میزان آب اختصاص‌یافته به محصول افزایش پیدا کند عملکرد بیشتری را در پی خواهد داشت. از آنجاکه این موضوع نقش اساسی در اقتصاد خانوار روستایی و اصلاح الگوی مصرف دارد، باید به‌نحوی مدیریت شود تا ضمن تأمین منافع مادی بهره‌برداران، ذخایر آب را در مقابله با پدیده کم‌آبی محافظت نماید (Abedshahi et al., 2020).

بنابراین، مدیریت بهینه آب در تخصیص نیاز آبی کشاورزی برای محصولات پاییزه در دشت هندیجان برای سیاست امنیت غذایی موردتوجه قرار گرفته است.

محدودیت منابع آب، تخریب زمین، تغییر اقلیم و مسائل اقتصادی معضلات پیش روی توسعه کشاورزی به‌عنوان

چالش‌های امنیت غذایی در کشورهای درحال توسعه محسوب می‌شوند؛ بنابراین برنامه‌ریزی برای تخصیص پایدار منابع آب از مؤلفه‌های اصلی سیاست‌گذاران بخش کشاورزی در حفظ امنیت غذایی به‌شمار می‌رود. از بین پارامترهای یادشده راهکار مقابله با تغییر اقلیم، سازگاری و روش مواجهه با تخریب زمین کاهش سطح زیر کشت است؛ اما محدودیت منابع آب می‌تواند با برنامه‌ریزی بهینه در راستای اهداف اقتصادی منجر به کاهش تخریب زمین و سازگاری با تغییرات اقلیمی گردد. لذا توسعه یک مدل چند هدفی که پارامترهای لازم در حفظ منابع آب، خودکفایی و کاهش دخالت در چرخه منابع آب را در پی داشته باشد ضروری است.

در توسعه یک مسئله تخصیص آب در شرایط پایدار اهداف، متغیرها، محدودیت‌ها، اولویت‌ها و ابزارهای مختلفی دخالت دارند، عباسی و همکاران. (Abbasi et al., 2019) اهداف مسئله می‌توانند شامل بهره‌وری تولید، کاهش بهره‌برداری از منابع آب، افزایش درآمد، کاهش هزینه‌ها یا نیروی کار، کمینه‌سازی نوسانات سطح ایستابی، کاهش اختلاف بین عرضه و تقاضای آب و بسیاری موارد دیگر باشند. اهداف مسئله از دیدگاه‌های نهاد تصمیم‌ساز، تشکلهای آب‌بران و یا کشاورزان قابل‌بررسی است. در فرایند تصمیم‌گیری گاهی تقابل یا تضاد بین منافع هر یک از دیدگاه‌ها موجب ایجاد مناقشه در نحوه و میزان تحویل آب می‌گردد. روش‌های مختلفی در این شرایط قابل‌ارزیابی است که با توجه به ابعاد مسئله بایستی منجر به راه‌حل گردد.

اقتصاد هند عمدتاً به کشاورزی وابسته است که ۲۱ درصد از تولید ناخالص داخلی و ۶۰ درصد از اشتغال را تشکیل می‌دهد. کشاورزی دیم ۶۷ درصد از سطح زیر کشت خالص را به خود اختصاص داده است که ۴۴ درصد غلات غذایی را شامل می‌شود و ۴۰ درصد جمعیت را پشتیبانی می‌کند. با توجه به تقاضای فزاینده غلات غذایی در این کشور، نیاز به افزایش بهره‌وری دیم از یک‌تن در هکتار فعلی به دو تن در هکتار در دو دهه آینده احساس می‌شود. کیفیت منابع طبیعی در زیست‌بوم دیم به‌دلیل بهره‌برداری بیش‌ازحد در حال کاهش است. مناطق دیم از محدودیت‌های زیست‌فیزیکی و اقتصادی اجتماعی رنج می‌برند که بر بهره‌وری محصولات زراعی و دام‌تأثیر می‌گذارد. در این زمینه، تعدادی از فناوری‌های دیم مقرون‌به‌صرفه بررسی شده است. این اقدامات شامل اقدامات حفاظتی خاک و آب باران، محصولات

آینده برای پانزده محصول دیم از طریق یک شاخص نشان‌دهنده تعادل آب معروف به شاخص خشک‌سالی با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق SPEI⁴ (به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده) استفاده کردند.

بهینه‌سازی الگوی کشت محصول‌های زراعی راهکاری عملیاتی در جهت بهره‌برداری بهینه و کارآمد از آب‌های سطحی و زیرزمینی و حفظ معیشت کشاورزان و امنیت غذایی کشور به‌شمار می‌آید. با توجه به این‌که هدف‌های یادشده در تضاد با یکدیگر هستند، در تحقیق دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 1998) با استفاده از قابلیت مسئله کوله‌پشتی باینری در قالب الگوریتم جامعه مورچگان و باهدف افزایش سود ناخالص و کاهش آب مصرفی کشاورزان به تعیین الگوی کشت بهینه در منطقه شهداد پرداخته شد. داده‌های موردنیاز از طریق توزیع پرسش‌نامه بین ۱۰۶ نفر از کشاورزان منطقه گردآوری شد. نتایج نشان داد که تغییر الگوی کشت از محصول‌های گندم آبی، جو آبی، سیر و یونجه با سطح زیر کشت ۴۰۸، ۵۰۹، ۶۱۷ و ۱۱۲۴ هکتار به‌سمت الگوی کشت بهینه، شامل محصول‌های گندم آبی، جو آبی، سیر و یونجه با سطح زیر کشت ۵۸۸، ۴۲۱، ۹۹۸ و ۶۵۱ هکتار، سود ناخالص کشاورزان را بیش از ۲۸۲ درصد، افزایش و مصرف آب را نیز به میزان ۵ درصد، کاهش می‌دهد.

در مطالعه عبدشاهی و همکاران (Abedshahi et al., 2020) برای تعیین الگوی بهینه کشت اراضی شهرستان ملاثنانی واقع در استان خوزستان، از مدل برنامه‌ریزی چندهدفه خطی شامل اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی با در نظر گرفتن عدم اطمینان به‌صورت مجزا و توأم در دو مرحله جداگانه، استفاده شد. نتایج پژوهش می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان بخش کشاورزی در دستیابی به هدف کسب بیشترین سود (که به‌طور متوسط، پنج درصد بیشتر از الگوی کشت فعلی برآورد شده است)، با در نظر گرفتن چند هدف متفاوت کمک کرده، از هدر رفت منابع کمیاب و باارزش جلوگیری کند.

زراعت دیم ضمن گستردگی، در مقایسه با کشت آبی وابستگی بیشتری با عوامل آب و هوایی نظیر بارش و دما دارد. گندم مهم‌ترین گیاه زراعی کشور است و گندم دیم با ۶۲/۱ درصد بیشترین سهم اراضی زیر کشت گندم را به خود اختصاص داده است؛ بنابراین تعیین زمان مناسب کشت این محصول از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل‌های

زراعی کارآمد و دستگاه‌های زراعی متناسب با فصل رشد، ابزار مناسب برای کاشت به‌موقع و صرفه‌جویی در نیرو و مدیریت یکپارچه مواد مغذی و آفات است (Mondal et al., 2023) کارایی مصرف آب¹ (WUE) محصولات دیم را می‌توان به‌عنوان مقدار ماده خشک² (DM) تولید شده در واحد تبخیر و تعرق³ (ET) تعریف کرد. تبخیر و تعرق شامل دو جزء است، تعرق از محصول (T) و تبخیر از خاک زیر تاج گیاه (E). روابط بین E، DM، E، T، WUE و بیانگر عملکرد بهینه محصول در ارتباط با تولید است. در یک تحقیق روش‌های اندازه‌گیری مصرف آب محصول و روش‌هایی که در آن شیوه‌های مدیریت محصول و ویژگی‌های محصول می‌توانند بر مصرف آب مصرفی تأثیر بگذارند توسط کوپر و همکاران (Coper et al., 1998) مورد بحث قرار گرفته‌اند. نمونه‌های مناسبی برای محصولات نخود، عدس، باقلا و نخود ذکر شده است که در مناطقی که منابع آب اغلب محدود و نامنظم است، رشد می‌کنند.

گای و همکاران (Gay et al., 2017) روشی را برای جداسازی سطح برداشت و عملکرد محصولات آبی از محصولات دیم در یک منطقه، با توجه به سطح برداشت ناخالص و عملکرد و داده‌های اقلیمی، زراعی و اقتصادی برای محصولات ارائه دادند. این روش بر اساس اصل حداکثر آنتروپی عمومی است که داده‌های ناقص، دانش تجربی و اطلاعات پیش‌بینی را برای استخراج اطلاعات مورد نظر ترکیب می‌کند. این مدل برای سه حوضه بزرگ با شرایط آب و هوایی و کشاورزی جمع‌آوری شده و در پنج شهرستان در تگزاس و کالیفرنیا اعمال شد. نتایج مدل‌سازی و مقادیر ارزیابی‌شده در این مناطق مورد مطالعه مقایسه شد. درحالی‌که قابلیت اطمینان خروجی‌های مدل به دانش تجربی و برآورد پارامتر منطقی متکی است، مدل حتی برای سطح قابل توجهی از عدم قطعیت تولید شده توسط پارامترهای اصلی از پیش تعیین‌شده ذهنی قابل‌اعتماد باقی ماند.

علی‌رغم نگرانی‌های فراوان در مورد اثرات تغییر اقلیم بر محصولات دیم، مطالعات کمی در مورد تغییرات عملکرد محصولات مختلف ناشی از تغییرات آب و هوایی در ایران انجام شده است. قمقمی و بیرانوند (Qomqomi and Beiranvand., 2022) باهدف تعیین کمیت عدم قطعیت ناهنجاری‌های عملکرد (به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده‌ها) در

1. Water Use Efficiency
2. Dry Matter
3. Evapotranspiration

4. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

بهینه بر شاخص پایداری آبیاری از منظر قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و آسیب‌پذیری استفاده کرد. نتایج نشان داد که الگوی کشت پیشنهادی باعث کاهش ۲۱ درصدی مصرف آب آبیاری بدون ادامه توسعه کشاورزی شد.

ظرفیت انتقال منابع آب^۱ (WRCC) یک عامل مهم برای پایداری مدیریت کشاورزی است. فراتر از ظرفیت تحمل منابع آب باعث اثرات مخرب زیست‌محیطی و کشاورزی مانند فرسایش، کاهش منابع آب، افزایش تغییرات آب و هوایی، آلودگی و خطر سلامت، تخریب زمین، کاهش تنوع زیستی، تخریب خدمات زیست بومی و کاهش بهره‌وری می‌شود. در بخش کشاورزی، کاهش راندمان تولید و افزایش ریسک برنامه‌ریزی از مهم‌ترین پیامدهای ظرفیت انتقال منابع آب است. در شرایط عادی این خسارات جبران‌ناپذیر بوده و یا با تخریب زیست‌محیطی و شکست اقتصادی همراه خواهد بود؛ بنابراین لازم است WRCC را در برنامه‌ریزی برای توسعه بلندمدت کشاورزی در نظر گرفت.

ظرفیت انتقال منابع آب کشاورزی به‌طور گسترده برای تدوین سیستم‌های ارزیابی برای توسعه پایداری منابع آب استفاده می‌شود (Kang et al., 2019)

ایده اصلی این است که یک نقشه‌برداری غیرخطی می‌تواند داده‌ها را در یک فضای ویژگی با ابعاد زیاد ترسیم کند که در آن رگرسیون خطی انجام می‌شود. ماشین‌های بردار پشتیبان^۲ (SVM) ماشین‌های یادگیری هستند که می‌توانند به تعمیم بهتری در تعداد محدودی از الگوهای یادگیری دست یابند. این دارای دودسته است: یکی طبقه‌بندی بردار پشتیبان (SVC) حل مسائل طبقه‌بندی و دیگری رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) حل مسائل رگرسیون. در این مقاله ردپای منابع آب و ظرفیت‌های انتقال تحلیل شده و بهبود کشاورزی دیم در اثر کمبود آب بررسی شده است. ظرفیت انتقال آب، بارش، میزان گسترش زمین و آبیاری تکمیلی به‌عنوان محدودیت‌های این شیوه از تولید محصولات کشاورزی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق ابتدا به مسئله انتقال آب کشاورزی در دشت هندیجان از استان خوزستان به‌منظور ارزیابی منابع آب برای کشت دیم پرداخته شده است و سپس مقادیر بهینه آب موردنیاز برای کشت دیم چهار محصول گندم، جو، کلزا و عدس با رویکرد فازی و روش چانه‌زنی چندهدفه و با استفاده

مبتنی بر رویکرد فازی ابزاری مفید برای یافتن پاسخ مناسب و افزایش قدرت تصمیم‌گیری و بهبود مدیریت منابع آب داشته و اطمینان‌پذیری بیشتری برای بررسی گزینه‌های پیش روی اجرا در اختیار قرار می‌دهد. استفاده از منطق فازی در مدیریت منابع آبی به‌ویژه در شرایط خشک‌سالی بسیار حائز اهمیت است. این سیستم ابزار مناسبی برای مدیریت بهینه، سهمیه‌بندی و بررسی سناریوهای مختلف استفاده از منابع با توجه به محدودیت‌های آن‌ها هست (Lalehzari and Karachian 2020).

تحلیل فازی می‌تواند از اطلاعات و داده‌های به‌دست‌آمده در هر گام زمانی و با در نظر گرفتن مقادیر حدی، مفهوم تصمیم‌گیری گسترده را در فرآیند تخصیص و توزیع بهینه آب که به تخمین اطلاعات در طول زمان بستگی دارد، با دقت بیشتر ارائه دهد (Wang et al., 2022)

اکبری و همکاران (Akbari et al., 2020) کارایی بهینه مصرف آب الگوی کشت در حوضه آبخیز اشتهارد ایران بررسی کردند. یک رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی هیدرو-زراعتی با استفاده از ابزار ارزیابی خاک و آب شبیه‌سازی شد و الگوی کشت بهینه توسط بهینه‌ساز ازدحام ذرات جستجو شد. میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2022) از برنامه‌ریزی بهینه الگوی کشت برای در نظر گرفتن نوسانات فصلی آب‌های سطحی در شبکه آبیاری دشت جیرفت در استان کرمان استفاده کرد. مدلی از تخصیص آب آبیاری بر اساس الگوی کشت با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای مطابق با نوسانات تأمین آب سطحی ایجاد شد. نتایج حاکی از مزایای بیشتر بر اساس چارچوب پیشنهادی برای کشاورزان بود. لی و همکاران (Lee et al., 2022) یک روش پویا برای ارائه یک مدل‌سازی بهینه‌سازی مشارکتی چندبعدی برای الگوهای کشت پیشنهاد کرد. روش توسعه‌یافته به ترویج استفاده پایدار از زمین‌های زیر کشت کمک می‌کند. علاوه بر این، بهینه‌سازی تنوع محصول را با انواع محصولات غذایی کاشته شده در بیشتر مناطق بهبود بخشید. دزیکتی و همکاران (Dezikti et al., 2021) نیازهای انرژی و آب مزارع را برای افزایش عملکرد محصول بررسی کرد. مدل توسعه‌یافته افزایشی را در تبخیر و تعرق سالانه و بازده بین ۸ تا ۱۶ درصد پیش‌بینی کرد. فن و همکاران (Fan et al., 2020) از یک مدل یادگیری ماشینی حداکثر آنتروپی برای تعیین الگوی بهینه کشت بر اساس تناسب محصول و کشف مکانیسم تأثیر الگوی کشت

1. Water Resources Carrying Capacity
2. Support Vector Regression

ابتدا به منطقه مورد مطالعه معرفی و سپس در سه‌بخشی مدل‌سازی احتمالاتی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی به مکانیزم‌های در نظر گرفته شده برای ایجاد سیستم تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب پرداخته می‌شود.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه شبکه آبیاری و زهکشی منطقه هنديجان به مساحت تقریبی ۵۰ هزار هکتار در فاصله ۱۳۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان اهواز مرکز استان خوزستان است (شکل ۱). ساحل راست محدوده در مختصات جغرافیایی طول شرقی ۳۲ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۴۹ دقیقه و عرض شمالی ۳۱ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه واقع شده است. ساحل چپ محدوده در موقعیت ۱۵ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۳ درجه ۱۱ دقیقه طول شرقی و مابین ۴۰ درجه و ۸ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. زمین‌های کشاورزی نسبتاً مسطح در اطراف رودخانه هنديجان بوده که حدفاصل شهرهای امیدیه و هنديجان و در نزدیکی خلیج قرار گرفته است. از بین محصولات کشاورزی مختلفی که در این محدوده کشت می‌شود سه محصول راهبردی گندم، جو و رده که بیش از ۶۰ درصد سطح زیر کشت را به خود اختصاص داده‌اند برای مطالعه و شبیه‌سازی انتخاب شد.

از نرم‌افزار محاسبه‌شده است. بدین ترتیب که ابتدا با تشکیل توابع هدف با متغیرهای تصمیم مسئله به‌دست‌آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانشی برای یافتن پاسخ‌های فازی حل می‌شود. که در قالب یک مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار MATLAB انجام گردید.

نتایج نشان داد وضعیت بحران آب در دشت مورد مطالعه به‌طور فزاینده‌ای جدی بوده و نیاز به کشت دیم و آبیاری تکمیلی توصیه می‌شود. علاوه بر این در شرایط کم‌آبی کاهش آبیاری پاییزه و تأمین نیاز آبی گیاه در مراحل حداکثر پوشش گیاه ضروری است. حداکثر پوشش گیاه برای گیاهان مطالعه شده از اواخر اسفند تا اواسط اردیبهشت است. پس‌ازاین مرحله تاج پوشش گیاه به‌تدریج فرسوده شده و محصول نهایی برداشت می‌گردد. بر اساس مطالعه صورت گرفته و با تنش‌های آبی موجود در کشور روش‌های بهینه‌سازی مدیریت آب در کشاورزی ضرورتی انکارناپذیر است.

مواد و روش‌ها

طی سال‌های گذشته نرم‌افزارها و روش‌های زیادی برای مدیریت منابع آب توسعه داده شده است. ابزاری که به دو دسته مدل‌های شبیه‌سازی و مدل‌های بهینه‌سازی تقسیم می‌شوند. علاوه بر این در دستگاه‌های تصمیم‌گیری توجه به عدم قطعیت در برنامه‌ریزی نیز یکی از عوامل تأثیرگذار برای تعیین میزان اعتمادپذیری نتایج است؛ بنابراین در این مبحث



شکل ۱. دشت هنديجان در استان خوزستان، جنوب غربی ایران

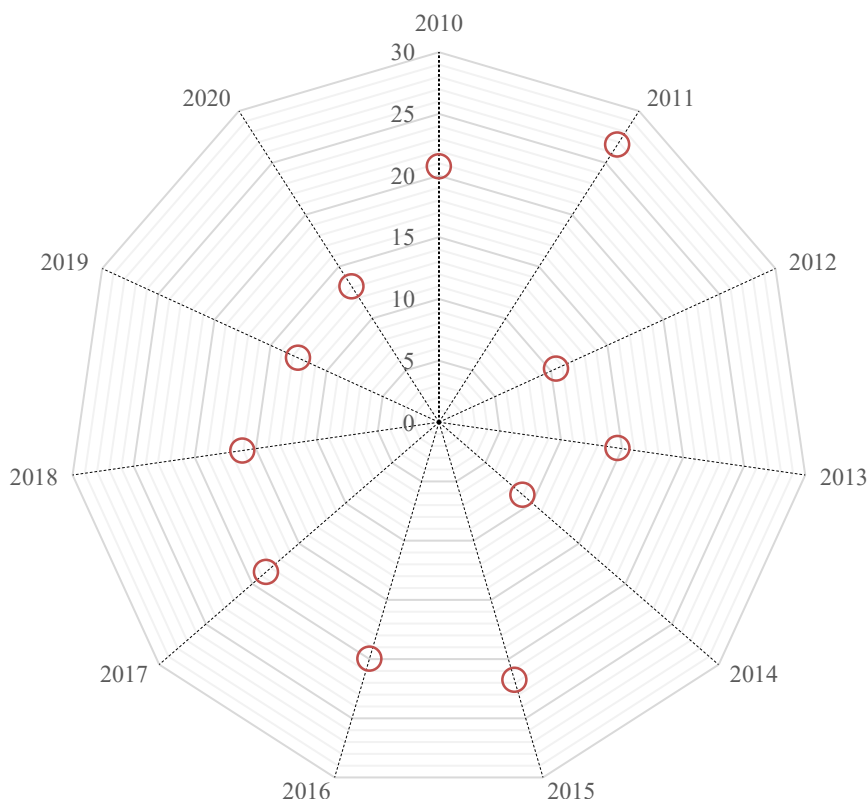
Fig 1. Handijan Plain in Khuzestan Province, southwestern Iran

به‌طور تقریبی به دو مرحله تقسیم کرد: از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ نسبتاً پایدار است و به‌طور کلی در مقایسه با قبل از سال ۲۰۱۰ رو به کاهش است. این روند که تغییر کمی دارد

رد پای کشاورزی

همان گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، تغییر ردپای سرانه کشاورزی در منطقه مورد مطالعه را می‌توان

به‌جز برخی از سال‌ها مانند سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ که به وضوح از سال‌های دیگر کوچک‌تر هستند.



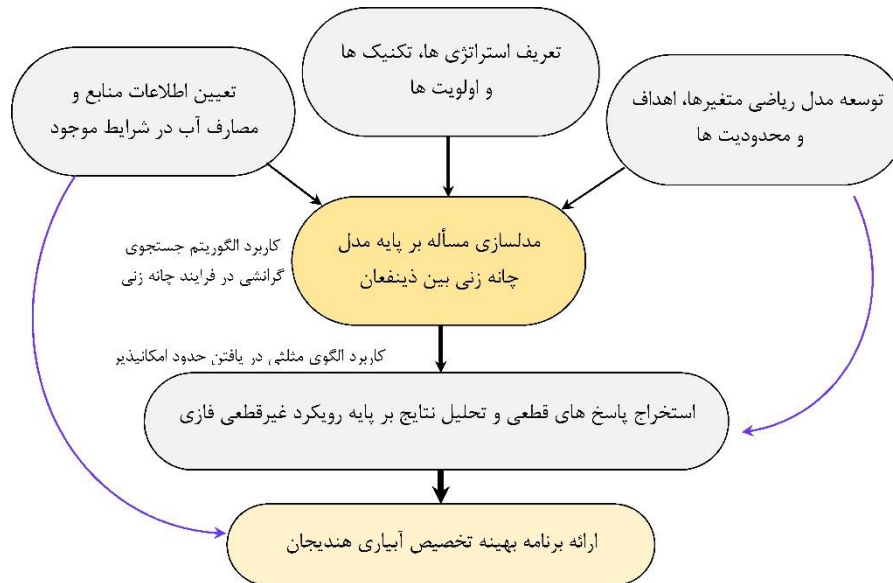
شکل ۲. مقایسه مصارف آب در سال‌های مختلف

Fig 2. Comparison of water consumption in different years

در مطالعه حاضر از طریق چانه‌زنی گام‌به‌گام بین اهداف یک فرایند خود یادگیری تشکیل خواهد شد و پاسخ نهایی محاسبه می‌گردد.

مفهوم رویکرد برنامه‌ریزی فازی در این تحقیق که فن پرکاربرد برای یافتن راه‌حل کاربردی در مسائل تصمیم‌گیری چندهدفه است به کار گرفته خواهد شد. در این فن، هدف یافتن راه‌حل سازشی است که بعد از ساختن توابع عضویت اهداف، میزان رضایت همه توابع عضویت را بیشینه کند. با این ساختار، پاسخ نهایی مدل تصمیم‌گیری در بازه‌ای از حدود اطمینان محاسبه می‌گردد و میزان ریسک حاصل از برنامه‌ریزی از پیش تعیین شده است. مدل توسعه یافته برای یک دوره برنامه‌ریزی شامل فصل زراعی از مهرماه ۱۴۰۱ تا تیرماه ۱۴۰۲ اجرا خواهد شد. محصولات پاییزه گندم، جو و کلزا که سطح زیر کشت زیاد و اهمیت راهبردی در این منطقه دارند بدین منظور شبیه‌سازی شدند. محدودیت‌های اقلیمی، اراضی، اقتصادی و تکنیکی در این راستا مورد نظر و ارزیابی قرار می‌گیرد.

فرآیند کلی بهبود شاخص‌های تولید محصولات دیم در شکل ۳ نشان داده شده است. در این مطالعه، کاربرد نظریه چانه‌زنی بر پایه توازن بین دو هدف بهره‌وری و بازده اقتصادی منجر به تشکیل دو گروه از ذی‌نفعان به‌عنوان تصمیم‌سازان و بهره‌برداران می‌گردد. هدف گروه تصمیم‌ساز بر اساس کاهش برداشت از منابع آب و جبران آن از طریق افزایش بهره‌وری تأمین می‌شود و هدف گروه بهره‌برداران بر بیشینه‌سازی عملکرد محصول درازای بیشترین آب دریافتی تأکید دارد. نظریه چانه‌زنی در این تحقیق بر اساس دو گروه ذی‌نفعان شامل بازیگر تخصیص دهنده آب و گروه دریافت‌کننده آب برنامه‌ریزی می‌گردد؛ بنابراین هدف گروه اول کاهش حبابه بهره‌برداران برای افزایش سطح زیر کشت شبکه آبیاری و هدف گروه دوم افزایش عملکرد محصولات در سطح زیر کشت ثابت درازای دریافت حبابه و مدیریت آن در سطح مزرعه است. در گذشته هر یک از اهداف به‌صورت جداگانه به حصول حداکثر و حداقل کران پاسخ‌ها به‌دست آمده و سپس در یک تعادل بین اهداف پاسخ نهایی به‌دست می‌آید؛ اما



شکل ۳. فرآیند توسعه مدل برنامه‌ریزی تخصیص آب شبکه آبیاری هندیشان

Fig 3. The development process of the water allocation planning model for the Hendijan irrigation network

که در آن $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_k)$ بردار توابع هدف با اجزای تابع هدف انفرادی $Z_i, i = 1, 2, \dots, k$ ، متغیرهای تصمیم $X_i, i = 1, 2, \dots, n$ ، متغیرهای تصمیم مسئله، (n) تعداد متغیرهای تصمیم می‌باشند. مسئله به‌دست‌آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی گرانشی برای یافتن پاسخ‌های فازی حل می‌شود.

روش حل مسائل به ساختار ریاضی آن‌ها بستگی دارد و یک‌راه حل عمومی برای حل مسائل بهینه‌سازی وجود ندارد؛ بنابراین مدل‌سازان مسئله را طوری فرموله می‌کنند که با یکی از روش‌های قابل‌حل باشد؛ بنابراین برای چنین فرمولاسیونی باید واقعیت را در ابعاد مکانی و زمانی بسیار ساده‌سازی نمود. به‌عبارت‌دیگر یکی از دشواری‌های استفاده از بهینه‌سازی جهت مدل‌سازی عدم توانایی کمی کردن و بیان ریاضی تمامی اهداف برنامه‌ریزی و محدودیت‌ها است و بنابراین جوابی هم که به‌دست می‌آید جواب بهینه مسئله است نه جواب بهینه دنیای واقعی.

بر این اساس دو تابع هدف برای ساختار اولیه مسئله تعریف شده است که در ادامه هر یک از اهداف بر اساس دیدگاه‌های مطرح‌شده به‌روزرسانی خواهند شد. لازم به توضیح است که در حالت کلی کارایی توابع هدف برای یک گیاه محاسبه خواهند شد. همچنین به‌منظور مقایسه بهتر اهداف در شرایط مختلف هر دو تابع به‌صورت بدون بعد تعریف شده است. با این توضیح تابع هدف اول موردبررسی بیشینه‌سازی کارایی نسبی

دو تابع ذیل که دیدگاه سیستم تصمیم‌گیری و بهره‌بردار موردتوجه هستند به‌صورت ذیل نوشته می‌شود.

(۱)

$$\mu_1(F_1(x)) = \begin{cases} 0 & F_1(x) \leq CWR_{min} \\ \frac{CWR_{max} - F_1(x)}{CWR_{max} - CWR_{min}} & CWR_{min} \leq F_1(x) \leq CWR_{max} \\ 1 & CWR_{max} \leq F_1(x) \end{cases} \quad \forall$$

(۲)

$$\mu_2(F_2(x)) = \begin{cases} 0 & F_1(x) \leq WA_{min} \\ \frac{WA_{max} - F_1(x)}{WA_{max} - WA_{min}} & WA_{min} \leq F_1(x) \leq WA_{max} \\ 1 & WA_{max} \leq F_1(x) \end{cases} \quad \forall$$

در روابط فوق CRW نیاز آبی گیاه است که در بازه حداکثر و حداقل مقادیر ممکن متغیر است. تابع پاسخ فازی برای یافتن این حدود اجرا می‌شود. WA آب تخصیص‌یافته به هر بهره‌بردار است که در تقابل با نیاز آبی گیاه بهینه خواهد شد. حل این مسئله چندهدفه توسط رابطه ذیل امکان‌پذیر است.

(تابع شماره ۳)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z(x) &= (Z_1(x), Z_2(x), \dots, Z_h(x), \dots, Z_k(x)), \\ Z_1(x) &= Z1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ Z_2(x) &= Z2(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ Z_h(x) &= Zh(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ &\vdots \\ Z_k(x) &= Zk(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \text{Subject to: } & X \in F, \\ & x \geq 0. \end{aligned} \quad (۳)$$

خواهد بود و اگر در بازه کوتاه در نظر گرفته شود منجر به یافتن بهترین پاسخ نخواهد شد. لذا انتخاب محدودیت‌ها با نظر کارشناسی و مطالعات مشابه صورت گیرد (Jive et al., 2021)

الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی بر اساس قانون گرانش نیوتن که در آن تمامی ذرات موجود در جهان یکدیگر را با نیرویی که با حاصل ضرب جرم‌های آن ذرات رابطه مستقیم و با مربع فاصله آن‌ها رابطه معکوس دارد ارائه شده است. در الگوریتم یادشده، عوامل جستجو مجموعه‌هایی از اجرام هستند که بر اساس قانون جاذبه نیوتنی و قوانین حرکت با یکدیگر فعل‌وانفعال دارند.

دو جنبه اساسی برای برتری این الگوریتم کاوش^۱ و استثمار^۲ هستند.

کاوش، قابلیت بسط فضای حافظه است. درحالی‌که استثمار، توانایی پیدا کردن پاسخ در پیرامون یک راه‌حل مناسب است. در تکرارهای ابتدایی، الگوریتم به‌منظور یافتن پاسخ‌های جدید فضای جستجو را مورد تفحص قرار می‌دهد و برای فرار از نقاط محلی، الگوریتم باید کاوش را در حلقه‌های ابتدایی خود انجام دهد با سپری شدن حلقه، از دامنه کاوش کاسته شده و استثمار حضور پررنگ‌تری پیدا می‌کند. لذا الگوریتم خود را در نقاط شبه بهینه تنظیم می‌کند.

از دیدگاهی متفاوت، اعضای یک الگوریتم جستجوی مبتنی بر جمعیت سه‌گام را در هر حلقه را به‌منظور تحقق بخشیدن به جنبه‌های کاوش و استثمار، طی می‌کند: خود تطبیقی، همکاری و رقابت. در مرحله خود تطبیقی، هر عضو (عنصر) عملکرد خود را بهبود می‌بخشد. در مرحله همکاری، اعضا با تبادل اطلاعات با یکدیگر تعامل می‌کنند. در گام نهایی، اعضا به‌منظور ادامه حیات به رقابت با یکدیگر روی می‌آورند. در واقع این گام‌ها هستند که الگوریتم را به‌سمت یافتن جواب راهنمایی می‌کنند (Rashedi et al., 2019)

قانون گرانش

گرانش به‌معنای تمایل اجسام برای شتاب گرفتن به‌سوی یکدیگر است. در قانون گرانش نیوتن، هر ذره، ذره دیگر را

مصرف آب خواهد بود که توسط رابطه ذیل تعریف می‌گردد. (۴)

$$Max RE = \sum_{z=1}^{Nz} \sum_{c=1}^{Nc} \left(\frac{\sum_{t=1}^{Nt} k_{ct} \times ETO_t}{\sum_{z=1}^{Nz} (\sum_{t=1}^{Nt} R_t + w_s)} \times \sum_{z=1}^{Nz} \left(\prod_{s=1}^4 (1 - Ky_s (1 - R_{ts} + w_s / k_{ct} \times ETO_t)) \right)_s \right)_{z,c}$$

که RE، کارایی مصرف آب نسبی؛ Ya و Ym به‌ترتیب عملکرد واقعی و حداکثر عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار)، ETO تبخیر و ترقق بیشینه، Kc ضریب گیاهی در هر دوره تنش t است. هدف دوم بیشینه‌سازی نسبت سود به هزینه در نظر گرفته شده است. توابع سود و هزینه محصولات در گذشته به‌صورت جداگانه و تنها تابع میزان آب مصرفی بدون لحاظ کردن ارزش فرعی محصولات، هزینه‌های ثابت و متغیر، نوع سیستم آبیاری و تلفات آن بوده است. رابطه ذیل وابستگی بین پارامترهای تولید را به‌صورت نسبت بدون بعد درآمد ناخالص (Income) و هزینه (Cost) نشان می‌دهد.

$$Max \frac{Benefits}{Costs} = \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^{Nc} \left(\frac{\sum_{z=1}^{Nz} \left((\sum_{i=1}^{Ni} (MY_c \times RY_c)_i) \times YB_c + \varphi_P \right)}{\sum_{z=1}^{Nz} \left((\sum_{i=1}^{Ni} (S_i \times (CC_i + E_i \times CW_i \times \sum_{s=1}^4 W_s \times 10)) \right)_i \right)_{z,c}}$$

در این معادله MY و RY به‌ترتیب حداکثر عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و عملکرد نسبی برای محصول P به‌زای کاربرد هر سیستم آبیاری، YB قیمت فروش محصول (ریال بر کیلوگرم) و φ ارزش محصول فرعی (ریال در هکتار) می‌باشند. S درصدی از زمین که تحت پوشش سیستم آبیاری IS قرار دارد، CC و CW به‌ترتیب هزینه ثابت کشت و سیستم آبیاری (ریال در هکتار) و آب‌بها (ریال بر مترمکعب)، E، تلفات انتقال و توزیع برای هر سیستم آبیاری و x_w نیاز آبی تأمین‌شده (متغیر تصمیم اول) در گام‌های زمانی برای دوره رشد s است. در مطالعات گذشته محدودیت‌هایی نظیر رشد گیاه، تغییرات اقلیمی، معیارهای اقتصادی، شرایط اجتماعی، پارامترهای حل مسئله اشاره شده است تعریف محدودیت‌ها از دو جنبه حائز اهمیت است.

۱. مسئله را به‌سمت خواسته‌ها و ایده آل‌های موردنظر بهره‌بردار هدایت می‌کند و از پرداختن به نقاط بهینه موضعی اجتناب خواهد نمود.

۲. دستورالعمل‌های نهاد تصمیم‌گیری و محدودیت‌های حاکم را دریافتن پاسخ اعمال می‌کند. انتخاب دامنه محدودیت‌ها اگر در یک بازه گسترده تعریف شود یافتن راه‌حل بهینه دشوار

1. Exploration
2. Exploitation

با اندازه‌گیری جرم آن عناصر سنجیده می‌شود. تمامی این اشیا به واسطه نیروی گرانشی، یکدیگر را جذب می‌کنند و این نیرو منجر به حرکت سراسر تمامی اشیا به سوی شیء با جرم بزرگ‌تر می‌گردد. اجرام سنگین که مرتبط با پاسخی خوب هستند، به مراتب کندتر از اشیا سبک‌تر حرکت می‌کنند. این عامل متضمن گام استعمار از الگوریتم است. هر جرم دارای چهار مشخصه است: موقعیت، جرم اینرسی، جرم گرانشی فعال، جرم گرانشی غیرفعال (که هر سه جرم با هم برابرند) موقعیت جرم مرتبط با یک پاسخ برنامه است. جرم اینرسی و گرانشی با استفاده از یک تابع برازندگی تعیین می‌گردد. حال دستگاهی را با عنصر i جرم (در نظر بگیرید. موقعیت عنصر i را بدین گونه تعریف می‌شود:

$$(10)$$

$$X_i = (X_i^1 + X_i^2 + \dots + X_i^d + \dots + X_i^n) \text{ for } i = 1, 2, \dots, N$$

در رابطه فوق X_i^d بیانگر موقعیت عنصر i در بعد d است. در یک‌زمان مشخص همانند t ، نیروی اعمال شده بر جسم i از سوی جرم j به صورت ذیل تعریف می‌گردد:

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) * M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (X_j^d(t) - X_i^d(t)) \quad (11)$$

$$R_{ij}(t) = \|X_j(t) - X_i(t)\|_2 \quad (12)$$

در رابطه فوق، M_{aj} جرم گرانشی فعال عنصر j ، M_{pi} جرم رانشی غیرفعال عنصر i ، $G(t)$ ثابت گرانشی در زمان t ، ϵ ثابتی کوچک، و $R_{ij}(t)$ فاصله اقلیدسی بین دو عنصر i و j است. به منظور ایجاد خاصیت تصادفی به الگوریتم، فرض شده است که برآیند نیروی مؤثر بر عنصر i در بعد d به صورت جمع مؤلفه‌های d ام نیروی‌های اعمال شده توسط سایر عناصر با وزنی تصادفی است:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_i F_{ij}^d(t) \quad (13)$$

در رابطه فوق، $rand_i$ عددی تصادفی در بازه $[0,1]$ است. از این‌روی، با توجه به قانون حرکت، شتاب عنصر i در زمان t و در جهت d ، $a_i^d(t)$ به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (14)$$

که در رابطه فوق M_{ii} جرم اینرسی عنصر i است. همچنین، سرعت بعدی یک عنصر به‌عنوان حاصل جمع کسری از سرعت فعلی آن و شتاب آن است. لذا موقعیت و سرعت ذره به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

با یک (نیروی گرانشی) جذب می‌کند. نیروی گرانش بین دو ذره به صورت مستقیم با حاصل ضرب اجرام آن‌ها و به صورت معکوس با مربع فاصله بین آن‌ها رابطه دارد:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{R^2} \quad (6)$$

در رابطه فوق F ، اندازه نیروی گرانشی، G ثابت گرانشی، M_1 و M_2 جرم ذره اول و دوم و R فاصله بین دو ذره است. با توجه به قانون دوم نیوتن، زمانی که نیروی F به یک ذره اعمال می‌گردد شتاب آن؛ a ، تنها به جرم ذره؛ M و نیروی اعمال شده بر آن بستگی دارد:

$$a = \frac{F}{M} \quad (7)$$

بر مبنای روابط فوق نیروی گرانش جذب‌کننده‌ای بین تمامی ذرات موجود در جهان وجود دارد که نیروی اجرام بزرگ‌تر و نزدیک‌تر بیشتر است.

سه نوع جرم در فیزیک نظری تعریف می‌شود:

جرم گرانشی فعال، Ma ، میزان قدرتمندی میدان گرانشی ناشی از یک ذره خاص است.

جرم گرانشی غیرفعال، Mp ، میزان قدرتمندی فعل و انفعالات یک ذره با میدان گرانشی است.

جرم اینرسی، Mi ، میزان قدرتمندی مقاومت یک شیء به تغییر حالت حرکت خود در زمان اعمال یک نیرو است.

حال با در نظر گرفتن این تعاریف، قانون نیوتن را بازنویسی می‌کنیم:

$$F_{ij} = G \frac{M_{ai} * M_{pi}}{R} \quad (8)$$

$$a_i = \frac{F_{ij}}{M_{ii}} \quad (9)$$

در روابط فوق، M_{aj} و M_{pi} بیانگر جرم گرانشی فعال ذره i و جرم گرانشی غیرفعال جرم j است M_{ii} نیز بیانگر جرم اینرسی ذره i است. F_{ij} ، نیرویی که بر جرم i توسط جرم j اثر می‌کند. هرچند که جرم اینرسی، جرم گرانشی فعال و جرم گرانشی غیرفعال مفهومی مجزا هستند، هیچ آزمایشی تمایزی را بین این اجرام آشکار نساخته است (Halidi and Rezenik et al., 2001)

فرآیند عمل الگوریتم جستجوی گرانشی

در این الگوریتم، عناصر به‌عنوان اشیا فرض شده و کارایی آن‌ها

کاسته شده به استثمر افزوده گردد. برای افزایش عملکرد با کنترل کاوش و استثمر، تنها $Kbest$ عنصر سیار عناصر را جذب می‌کنند. $Kbest$ تابعی از زمان و با مقدار اولیه K_0 در آغاز کار بوده و به تدریج از مقدار آن کاسته می‌شود. در زمان شروع، تمامی عناصر نیرو اعمال می‌کنند و با گذشت زمان، $Kbest$ به صورت خطی کاهش و در پایان تنها یک عنصر باقی می‌ماند که به سایر عناصر نیرو وارد می‌کند. از این روی، الگوریتم می‌تاند به صورت زیر اصلاح گردد:

$$F_i^d(t) = \sum_{j=Kbest, j \neq i}^N rand_i F_{ij}^d(t) \quad (25)$$

در رابطه فوق مجموعه‌ای از عنصر اول با بهترین مقدار برازش و بیشترین جرم است. گام‌های مختلف الگوریتم پیشنهاد شده به صورت زیر است ۱. شناسایی فضای جستجو؛ ۲. مقداردهی تصادفی؛ ۳. ارزیابی برازش عناصر؛ ۴. به‌روزرسانی و برای ۵. محاسبه نیروی برآیند در جهات مختلف؛ ۶. محاسبه شتاب و سرعت؛ ۷. به‌روزرسانی موقعیت‌های عناصر؛ ۸. تکرار گام‌های ۳ تا ۷ تا برقراری شرایط توقف؛ در این تحقیق دو گونه متغیر مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۱. متغیر تصمیم: این متغیر آب تخصیص یافته به هر واحد زراعی است که در فرایند بهینه‌سازی در یک محدوده امکان‌پذیر طبق الگوریتم جستجوی گرانشی تغییر مواد داشت تا به بهترین مقدار خود برسد.

۲. متغیرهای شبیه‌سازی این متغیرها شامل پارامترهای رشد گیاه هستند که در الگوی شبیه‌سازی تاج پوشش گیاه و توسعه ریشه به کار می‌روند. تخمین این متغیرها از طریق تجارب کشاورزی در منطقه و ضرایب واسنجی شده در فرایند شبیه‌سازی صورت می‌گیرد.

دو گروه از اطلاعات در این پژوهش مورد نیاز است:

۱. اطلاعات کتابخانه‌ای نظیر ضرایب بهینه‌سازی و مدل چانه‌زنی

۲. اطلاعات مشاهده‌ای: این اطلاعات به منظور واسنجی ضرایب شبیه‌سازی رشد گیاه مورد نیاز است که از طریق پرسش‌نامه و اندازه‌گیری میدانی به دست خواهد آمد. اطلاعات پرسشنامه‌ای شامل تاریخ‌های چهارگانه رشد محصول، برنامه آبیاری، نوع و سطح زیر کشت محصول، کود و اطلاعات عملیات زراعی است.

اطلاعات قابل‌اندازه‌گیری شامل عملکرد، شاخص برداشت،

$$V_i^d(t+1) = rand_i * V_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (15)$$

$$X_i^d(t+1) = X_i^d(t) + V_i^d(t+1) \quad (16)$$

در روابط فوق، $rand_i$ ، یک متغیر تصادفی یکنواخت در بازه $[0,1]$ است. از عدد تصادفی مذکور به منظور وجه تصادفی بخشیدن به جستجو استفاده می‌شود. ثابت گرانشی، G ابتدا مقداردهی اولیه شده و به مرور زمان به منظور کنترل دقت جستجو کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، G تابعی از مقدار اولیه (G_0) و زمان (t) است:

$$G(t) = G(G_0, t) \quad (17)$$

جرم‌های گرانشی و اینرسی، به سادگی با استفاده از ارزیابی برازش قابل‌محاسبه است. یک جرم سنگین‌تر به معنای یک عنصر کارا تر است. این عبارت به معنای جذابیت بیشتر و حرکت کندتر اجرام سنگین‌تر است. با فرض برابری جرم گرانشی و اینرسی، مقادیر جرم‌ها با استفاده از نگاشت کردن برازش محاسبه می‌گردند. جرم‌های گرانشی و اینرسی با استفاده از معادلات زیر به‌روزرسانی می‌گردند.

$$M_{ni} = M_{pi} = M_{ji} = M_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (18)$$

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (19)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (20)$$

در روابط فوق $fit_i(t)$ بیانگر مقدار برازش عنصر در i زمان t است. $worst(t)$ و $best(t)$ برای یک مسئله کمینه‌سازی به صورت زیر رتبه‌بندی می‌گردند:

$$best(t) = \min_{j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (21)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (22)$$

و در مسائل بیشینه‌سازی معادلات بالا به معادلات زیر تبدیل می‌شوند:

$$best(t) = \max_{j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (23)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, 2, 3, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (24)$$

یک‌راه مناسب به منظور برقرار مصالحه بین کاوش و استثمر کاهش تعداد عناصر با گذشت زمان است. از این روی، پیشنهاد می‌شود تنها مجموعه‌ای از عناصر با جرم بیشتر، نیروهای خود را به یکدیگر اعمال نمایند. باین حال، باید در مورد استفاده از این سیاست به دلیل قدرت کاوش و توانایی استثمر محتاط بود. خاطرنشان می‌شود که به منظور جلوگیری از به دام افتادن در بهینه‌های محلی، الگوریتم باید از کاوش در آغاز کار استفاده نماید. با سپری شدن تکرارها، باید از کاوش

تلفات غیر حساس ε -، به نام SVR - ε ، هدف تلاش برای یافتن یک تابع $f(X)$ در فضای ویژگی با ابعاد بالا است که حداکثر خطاهای ε از مقادیر هدف واقعی y_i برای همه داده‌های آموزشی در همین حال، عملکرد موردنظر تا حد امکان موردنیاز است. خطاهای مطلق که کمتر از ε هستند در SVR - ε مجاز هستند، درحالی‌که انحراف بزرگ‌تر از ε را نمی‌پذیرد. تابع هدف خطی $f(X)$ به صورت زیر به دست می‌آید:

$$f(X) = \langle W \cdot \phi(X) \rangle + b, \text{ with } b \in R \quad (30)$$

که در آن $\langle W \cdot \phi(X) \rangle$ نشان‌دهنده حاصل ضرب نقطه در فضای ویژگی ϕ است و W جهت بردار نرمال ابر صفحه به دست آمده است.

بدیهی است که $f(X)$ ممکن است تمام جفت‌ها (X_p, y_p) را با دقت ε تقریب نکند؛ یعنی $f(X)$ ممکن است در برخی شرایط واقعاً وجود نداشته باشد. برای مقابله با این مشکل، می‌توان شرایط را آرام کرد. با معرفی متغیرهای ζ_i^+ و ζ_i^- و ثابت $C > 0$ برای مقابله با این مورد، می‌توانیم مسئله بهینه‌سازی زیر را به دست آوریم.

$$\min\{2\|W\| + C \sum mX_i = 1 (\zeta_i^+ + \zeta_i^-)\} \quad (31)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} y_i - \langle W \cdot \phi(X) \rangle - b \leq \varepsilon + \zeta_i^+ \\ \langle W \cdot \phi(X) \rangle + b + y_i \leq \varepsilon + \zeta_i^- \\ \zeta_i^+ \cdot \phi_i \geq \varepsilon + \zeta_i^- \end{cases} \quad (32)$$

با استفاده از روش انحراف معیار، رویکرد هسته و از طریق یک سری اشتقاق و تبدیل، تابع تخمین رگرسیون نهایی به دست می‌آید.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{nsw} r w^2 \sum_{j=1}^{nf} K(X, X_j) + b - \|W\| + C \sum mX_i \quad (33)$$

که ζ_i^+ ضریب لاگرانژی، K تابع هسته، nsw تعداد بردارهای پشتیبانی است.

سه پارامتر SVR باید بهینه شوند که عبارت‌اند از تابع هسته، C و ε . اشکال مختلفی از توابع هسته وجود دارد، مانند تابع پایه شعاعی گاوسی، تابع پایه شعاعی نمایی، پرسپترون چندلایه و تابع هسته‌های افزایشی. در میان این توابع هسته، تابع پایه شعاعی گاوسی معمولاً در مسائل عملی ارجح است. (Xhang et al., 2022)

سطح پوشش سایه‌انداز، عمق ریشه و اطلاعات هواشناسی خواهد بود.

کلیه اطلاعات جمع‌آوری شده در قالب یک مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی شده و اجرا گردید. (Rashedi et al., 2009)

محدودیت ظرفیت انتقال آب

در این تحقیق ظرفیت انتقال آب به حداکثر مقیاس توسعه کشاورزی-اقتصادی اشاره دارد که منابع آب کشاورزی می‌توانند در سطح معینی از بهره‌وری حفظ کنند و معیاری برای سنجش منابع آب با مقیاس‌های مکانی و زمانی از پیش تعیین شده است. ظرفیت انتقال منابع آب کشاورزی یک شاخص کلیدی برای قضاوت در مورد توسعه پایدار کشاورزی و یک عامل اصلی برای اطمینان کمی از ایمنی توسعه اقتصادی منطقه‌ای است (ژانگ و همکاران ۲۰۲۳). ظرفیت انتقال منابع آب EC_w توسط رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$EC_w = 0.4 \times \beta \times \gamma \times Q/p \quad (26)$$

که در آن EC_w ظرفیت انتقال منابع آب کشاورزی با سرانه p است، β ضریب بازده منابع آب، γ ضریب ثابت منابع آب، Q میانگین بهره‌وری منابع آب جهانی و Q حجم کل منابع آب است. I .

بیان منابع آب در منطقه مورد مطالعه به چهار دسته صنعت، کشاورزی، مصرف آب خانگی و عمومی تقسیم می‌شود. کل ردپای کشاورزی منابع آب به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$EF_w = N \times ef_w = \sum_{i=1}^4 N \times \gamma \times \frac{W_i}{p} \quad (27)$$

که EF_w ردپای کشاورزی منابع آب، N جمعیت و W_i نشان‌دهنده هر مصرف‌کننده آب از چهار دسته اشاره شده است. کمبود یا اضافه برداشت از منابع آب کشاورزی با ED_w نشان داده می‌شود

$$ED_w = EC_w - EF_w \quad (28)$$

در این تحقیق، شاخص اختلاف منابع آب $DEPI$ پیشنهاد شد که عددی بدون بعد است. به صورت فرموله شده است.

$$DEPI = (EC_w - EF_w)/EC_w \quad (29)$$

رگرسیون برداری پشتیبانی

رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) بر اساس تئوری یادگیری آماری ایجاد شده است. داده‌های آموزشی به صورت (x_i, y_i) در $x_i \in R^n, y_i \in R$ در نظر گرفته شده است. در SVR با تابع

اختصاص داده است. نسبت آن کمتر از ۰/۴۸ نیست. ردپای سرانه کشاورزی دومین نسبت بالاتر را به خود اختصاص داده است که مقدار اوج آن ۰/۶۴ است. نسبت سرانه منابع آب شهری تقریباً برابر با نسبت سرانه منابع آب خانگی در هر سال است.

نتایج و بحث:

کمبود منابع آب

تجزیه و تحلیل منابع آب از منظر محتوای ردپای آب در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. ردپای منابع آب کشاورزی بیشترین نسبت را در بین چهار دسته به خود

جدول ۱. ردپای کشاورزی در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰

Table 1. Agricultural Footprint 2010-2020

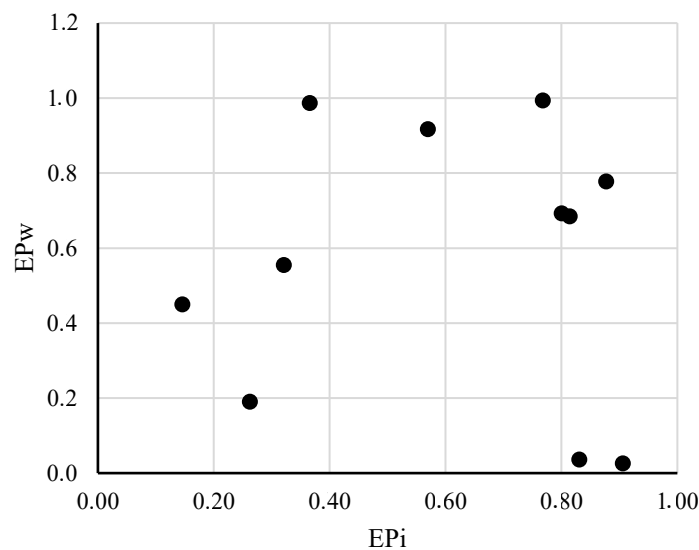
2020	2018	2016	2014	2012	2010	
0.64	0.62	0.56	0.49	0.51	0.48	کشاورزی (Agriculture)
0.18	0.19	0.23	0.25	0.21	0.22	صنعتی (Industrial)
0.1	0.1	0.11	0.14	0.15	0.16	شهری (Urban)
0.08	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	منابع طبیعی (Natural resources)

می‌شود. اگرچه E_{Pi} در منطقه مورد مطالعه به‌طور مداوم در حال کاهش بوده است، اما همچنان بیشتر از E_{Pi} است که میانگین ارزش خروجی اقتصادی منابع آب را اندازه‌گیری می‌کند که به این معنی است که فضا برای بهینه‌سازی ساختار صنعتی منطقه مورد مطالعه وجود دارد.

نتایج مقایسه ردپای منابع آب و خروجی اقتصادی

منابع آب EP_w , E_{Pi}

شکل ۴ نشان می‌دهد که EP_w و E_{Pi} به‌طور مداوم در منطقه مورد مطالعه کاهش یافته است. E_{Pi} در منطقه مورد مطالعه همیشه کمتر از EP_w بوده است که نشان می‌دهد استفاده از منابع آب در منطقه مورد مطالعه فشرده‌تر و اقتصادی‌تر



شکل ۴. روند طولی مقادیر تخمین زده شده E_{Pi} و EP_w

Fig 4. Longitudinal trend of estimated values E_{Pi} and EP_w

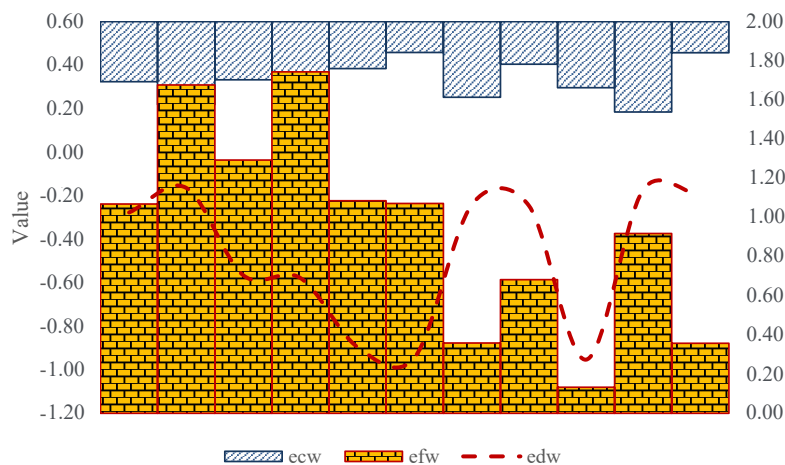
ML است، ردپای سرانه منابع آب از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از یک نمونه کوچک پیش‌بینی شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که SVR در مقایسه با روش‌های کلاسیک، خطاهای برآزش و پیش‌بینی کمتری دارد. اگرچه نمونه زیادی از منابع آب وجود ندارد، مدل SVR ایجاد شده، راهنمایی‌هایی را برای توسعه پایدار منابع آب در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهد.

نتایج مقایسه‌ای ظرفیت انتقال منابع آب و اضافه

برداشت آب

EF_w , EC_w , ED_w

در این تحقیق ردپای منابع آب و ظرفیت‌های انتقال از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه محاسبه و تحلیل شد. علاوه بر این، با معرفی SVR که متعلق به حوزه یادگیری ماشینی



شکل ۵. مقایسه زمانی پارامترها EFw , ECw , Edw

Fig 5. Time comparison of parameters

تابع هدف کارایی مصرف آب بیانگر افزایش تولید به‌ازای کاهش مصرف آب است. در گیاهان آبی افزایش تولید می‌تواند با برنامه‌ریزی آبیاری به‌صورت تغییر زمان یا عمق آبیاری مدیریت‌شده و افزایش سطح عملکرد در واحد سطح را در پی داشته باشد؛ اما در کشاورزی دیم، افزایش بهره‌وری به‌صورت کاهش آب مصرف با حفظ تولید تعریف می‌شود. کاهش تعداد دفعات آبیاری تکمیلی مهم‌ترین گزینه انتخابی است که از نظر اقتصادی و انرژی و تخریب زمین اولویت اول برنامه‌ریزی است. شکل ۵ سطح زیر کشت پیشنهادی به‌ازای معیار قرار دادن تابع هدف حداکثرسازی نسبت عملکرد به آب دریافتی محاسبه و ترسیم‌شده است. افزایش سطح زیر کشت متناسب به عملکرد گیاهان برای مقابله با اثرات خشک‌سالی در تقابل با امنیت غذایی با توجه به این شکل توصیه می‌شود.

افزایش تولید منجر به افزایش درآمد حاصل از کشت می‌شود و در نتیجه به افزایش درآمد خواهد رسید. نتایج به‌دست‌آمده پس از تحلیل فازی پاسخ‌ها بر مبنای حداکثر امکان به‌دست‌آمده است. بیشینه سطح تولید گندم به ۹۹ هکتار و کمترین آن به ۳ هکتار رسیده است. در حالت کمترین امکان فازی، چهار نقطه ۱۵، ۲۱، ۲۳ و ۲۹ به صفر نزدیک شده‌اند. در استخراج نتایج در تحلیل فازی باید به این معیار توجه داشت که هدف مطلوب گزینه اولویت‌دار در انتخاب پاسخ باشد.

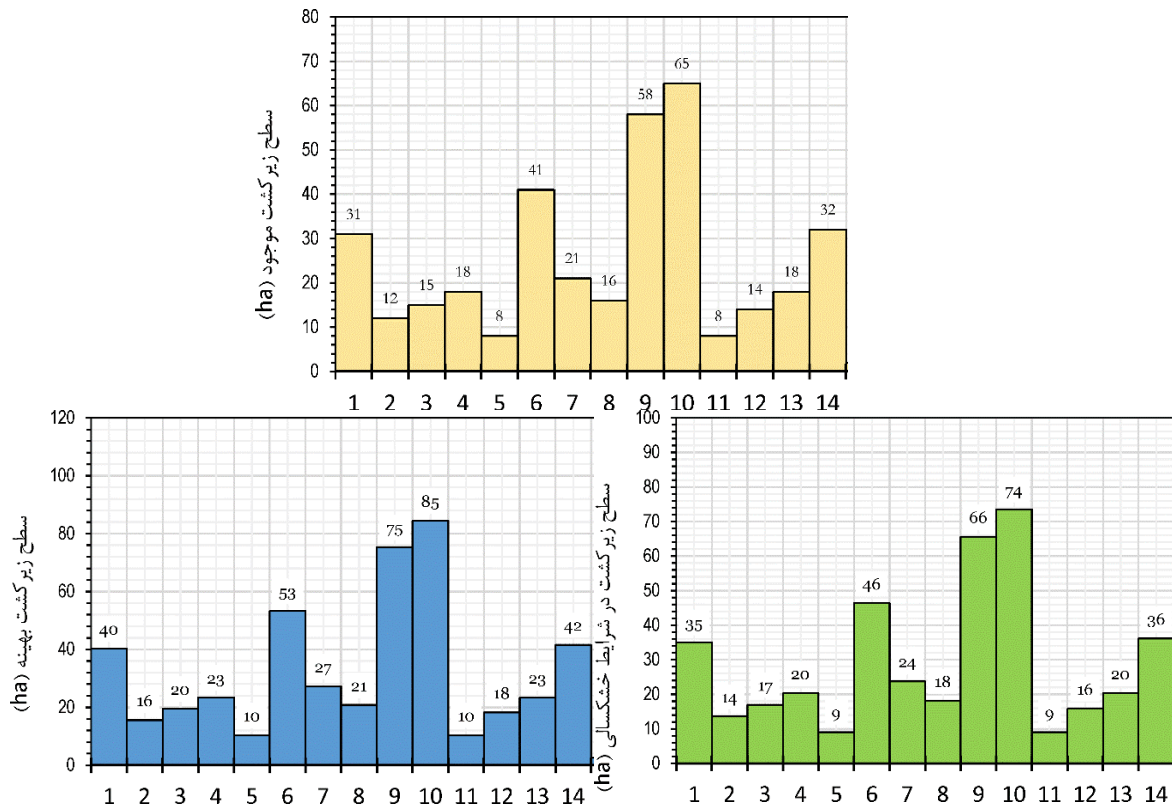
آبیاری

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد متغیرهای تصمیم علاوه بر سطح زیر کشت به آبیاری نیز اختصاص پیدا می‌کند. شکل

برنامه‌ریزی آبیاری با دو هدف افزایش بهره‌وری آب یا درآمد خالص در این مطالعه با توجه به محدودیت‌ها و شرایط مختلف ارزیابی شده است. در کشت دیم، سطح زیر کشت اهمیت بیشتری نسبت به اراضی آبی دارد. انجام عملیات زراعی بدون تحلیل فنی یا اقتصادی موجب کاهش بهره‌وری و اتلاف زمان و انرژی می‌گردد. امروزه آبیاری گیاهان دیم نیز بخش مهمی از فرایند تولید به‌شمار می‌رود که بهره‌برداران با توجه به اقلیم، خاک، محصول و سطح انتظار اقتصادی باید برای تأمین رطوبت خاک به‌ویژه در بهار اقدام کنند. در ادامه به بررسی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی چهار محصول گندم، جو، کلزا و عدس در سال آبی ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۳ پرداخته شده است.

سطح زیر کشت

با توجه به گستردگی اراضی کشت دیم، ۱۴ نقطه از منطقه مورد مطالعه تحت کشت گندم به‌عنوان الگوی گیاهان دیم قرار داشت. برای تحلیل سطح زیر کشت و آب موردنیاز بر اساس توابع هدف در نظر گرفته شد که نتایج آن در شکل‌های ذیل مقایسه شده است. سطح زیر کشت هر مزرعه دیم گندم در شرایط موجود در شکل ۶ نشان داده شده است که از ۲ تا ۷۶ هکتار دامنه مساحت اراضی را تشکیل می‌دهد. اندازه‌گیری مساحت تحت کشت به‌صورت رند شده از اطلاعات پرسشنامه‌ای کشاورزان به‌دست آمد. میزان بارندگی برای هر مزرعه در طول فصل رشد یکسان بوده است. عملیات زراعی که منجر به کاهش یا افزایش تولید می‌گردد نیز مشابه ثبت شده است. مالکیت یا منبع آب هر مزرعه به‌صورت واحد است که فرایند تصمیم‌گیری را قابل اجرا می‌کند.



شکل ۶. سطح زیر کشت موجود و شرایط بهینه برای گندم دیم در نقاط انتخابی

Fig 5. Existing cultivated area and optimal conditions for rainfed wheat in selected locations

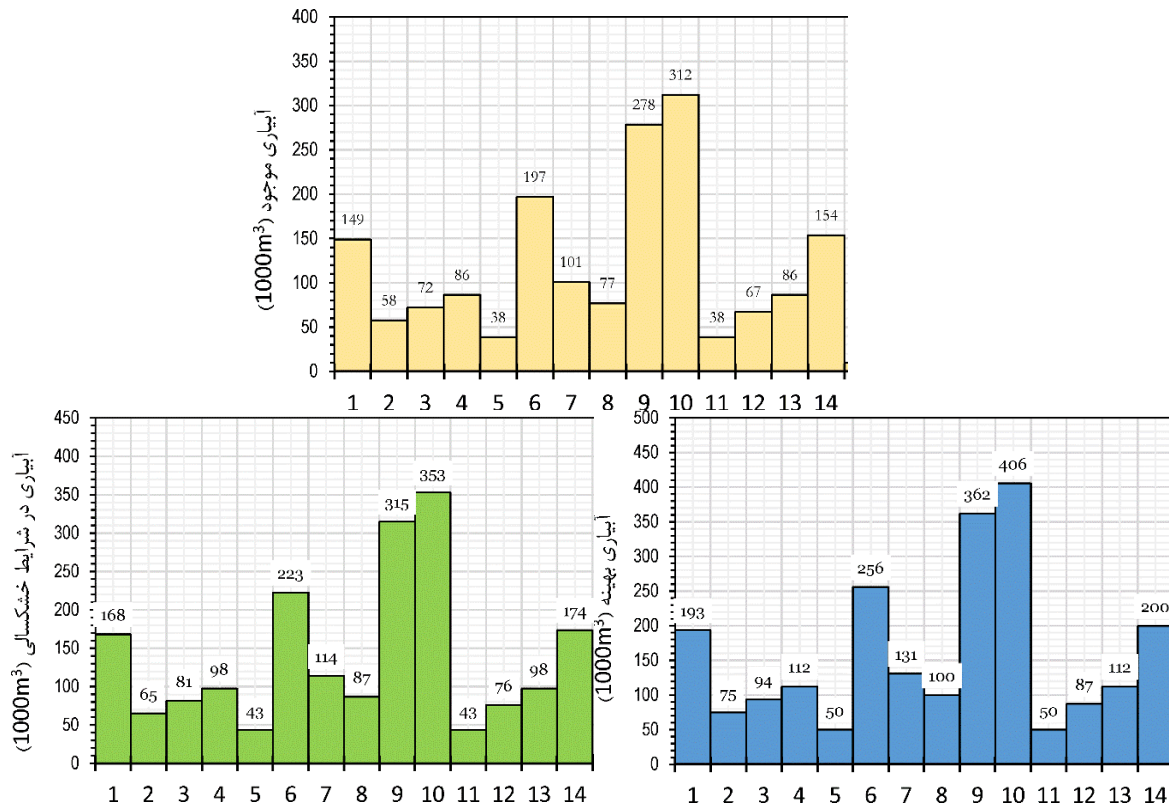
پتانسیل نزدیک کرد. در مطالعه انجام شده نسبت بارندگی در شرایط موجود از ۸۷ درصد به ۹۳ درصد به طور متوسط افزایش یافته است. منظور از آبیاری بهینه رسیدن به سطحی از حجم آبیاری تکمیلی است که میزان محصول تولیدی را بدون افزایش سطح زیر کشت بهبود بخشد. با اجرای مدل بهینه با ثابت نگه داشتن سطح زیر کشت تولید محصول به صورت میانگین تا ۱۷ درصد رشد پیدا می‌کند.

مقایسه نتایج با نتایج سایر محققین

حسب مطالعه تطبیقی به عمل آمده توسط عبدشاهی و همکاران (Abedshahi et al., 2020). با عنوان تعیین الگوی بهینه آبیاری محصولات کشاورزی در شهرستان ملاتانی با توجه به نزدیک بودن شرایط آب و هوایی و نوع خاک اراضی کشاورزی با دشت هندیجان (منطقه مورد مطالعه) میزان افزایش محصول کشاورزی به میزان ۲۳ درصد رشد را نشان می‌دهد که با رشد ۱۷ درصدی مطالعه حاضر در دشت هندیجان حدوداً نزدیک به هم هست.

در خصوص ردپای منابع آب با مقایسه تطبیقی با تحقیق صورت گرفته در منطقه یانگ چین مشاهده می‌گردد که با کاهش

۶ نشان‌دهنده حجم آبیاری موجود برای اراضی تحت کشت گندم است. لازم به توضیح است که این سطح از آبیاری با مقادیر بارش دریافتی محصولات جمع شده است. با توجه به نتایج به دست آمده راندمان نسبی تولید محصول در این منطقه برای گندم از ۰/۲۳ کیلوگرم بر مترمکعب تا ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب برای مزرعه شماره ۱۱ متغیر بوده است. سهم آبیاری در منطقه ۱۰ معادل ۳۲ درصد کل آبیاری و در منطقه ۱۱ حدود ۱۶ درصد بوده است؛ بنابراین نقش آبیاری تکمیلی در تولید محصول تایید می‌گردد. منظور از آبیاری بهینه رسیدن به سطحی از حجم آبیاری تکمیلی است که میزان محصول تولیدی را بدون افزایش سطح زیر کشت بهبود بخشد. نسبت بارش در شرایط موجود ۸۷ درصد بوده است که در شرایط برنامه‌ریزی بهینه به ۶۹ درصد کاهش داشته است. این کاهش به دلیل انجام آبیاری تکمیلی و افزایش سهم آبیاری در تأمین آب به‌ویژه در فصل اردیبهشت است. افزایش سطح زیر کشت موجب افزایش میزان آب دریافتی در مزارع دیم در شرایط خشک‌سالی شده است؛ بنابراین در شرایط خشک‌سالی به دلیل کاهش حجم آبیاری تکمیلی می‌توان با گسترش اراضی نسبت آب باران را افزایش داده و محصول تولیدی را به سطح



شکل ۷. آب تأمین‌شده برای کشت دیم گندم در شرایط موجود و بهینه

Fig 7. Water supplied for rainfed wheat cultivation under current and optimal conditions

تولید با شیب بیشتر در سناریوی بهینه است. تلفات آب در کلزا بیشتر از سناریوهای واقعی است زیرا تعرق گیاه کاهش و آبیاری افزایش داشته است.

نتیجه‌گیری

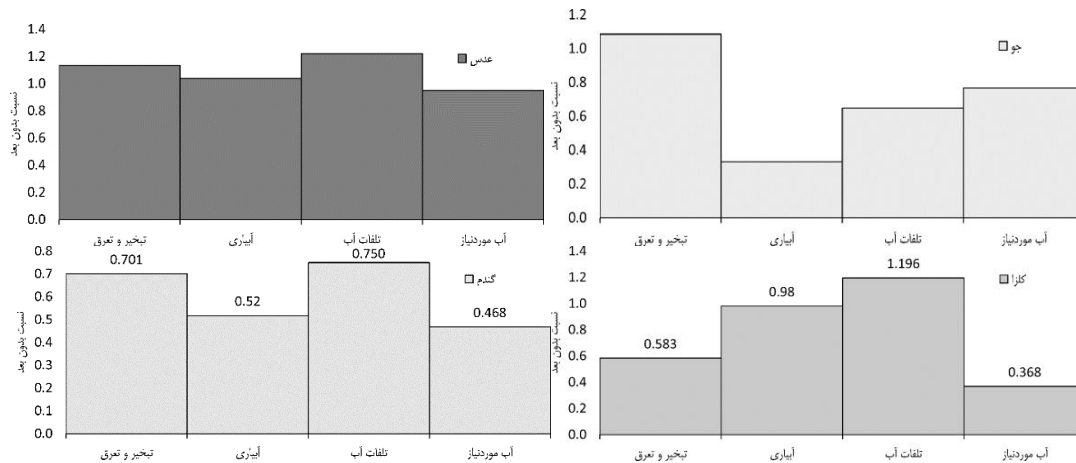
نتایج نشان داد که ردپای کشاورزی از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ با سطوح بالاتر ثابت مانده است، درحالی‌که از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ نسبت به سال‌های گذشته کاهش چشمگیری داشته است. ردپای پیش‌بینی‌شده کشاورزی برای ده سال اخیر همچنان در مناطق نیمه‌خشک کاهش می‌یابد. نتایج پیش‌بینی‌شده نشان داد که ردپای کشاورزی از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ روند رو به رشدی را داشته است. بهینه‌سازی آبیاری گیاهان دیم نشان داد که تأمین آب تحت سناریوی خشک‌سالی منجر به افزایش بهره‌وری آب و در سناریوی اقتصادی منجر به افزایش تولید می‌گردد. انجام یک آبیاری تکمیلی در اردیبهشت‌ماه بالاترین ضریب تأثیر را در بهبود راندمان مصرف آب داشته است. با اجرای مدل بهینه با ثابت نگه‌داشتن سطح زیر کشت تولید محصول به‌صورت میانگین تا ۱۷ درصد رشد پیدا می‌کند

سهم آب در کشاورزی رشد محصولات شاخص‌های مربوطه در حد فزاینده‌ای رشد دارد لیکن در منطقه مورد مطالعه با افزایش مصرف آب رشد تولید محصول همچنان پایدار نبوده و ب سمت پایین تنزل دارد.

ارزیابی معیارهای بیلان آب

چهار معیار بدون بعد برای ارزیابی بیلان رطوبتی گیاهان دیم در شکل ۷ مقایسه شده است. تبخیر و تعرق بدون بعد حاصل تقسیم تبخیر و تعرق واقعی به آبیاری واقعی یا محاسباتی است. نسبت بدون بعد آبیاری از تقسیم آب تأمین‌شده از طریق آبیاری تکمیلی به آبیاری کامل محصول در شرایط آبی به‌دست‌آمده است. میزان تلفات ارائه‌شده یک نسبت بدون بعد از تلفات آب در سناریوی بهینه به تلفات آب در شرایط واقعی است. آب موردنیاز به‌دست‌آمده در این شکل‌ها نیز حاصل تقسیم تعرق بر کل آب تأمین‌شده است.

با توجه به توضیحات ارائه‌شده عدس بیشترین نسبت تبخیر و تعرق را داشته و کلزا با ۰/۵۸ کمترین مقدار را داشته است. علت زیاد بودن نسبت تبخیر و تعرق در گیاه عدس و محصول جو به عملکرد کم آن‌ها در شرایط فعلی و نیاز به افزایش



شکل ۸. نسبت‌های بدون بعد بیلان آب محصولات

Fig 8. Dimensionless ratios of water balance of products

imagery. Agri. Water Manage. 88 : 99-109

Banjara, T.R., Pali, G.P. & Kumar, S. (2019) Tillage practices and *rabi* crops Affect energetics of rainfed rice-based Cropping System of Chhattisgarh. *Natl. Acad. Sci. Lett.* 42, 455–458. <https://doi.org/10.1007/s40009-019-00796-z>

Cai, X., De Fraiture, C. & Hejazi, M. (2007). Retrieval of irrigated and rainfed crop data using a general maximum entropy approach. *Irrig Sci* 25, 325–338. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0046-8>

Canovas-Molina, A., García-Frapolli, E., Ruggerio, C.A. (2023). A proposal of an Irrigation Sustainability Index for agricultural basins: application in a semi-arid river basin. *Irrigation Science* 41, 173–182. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00831-w>

Cooper, P. J. M., Campbell, G. S., Heath, M. C., & Hebblethwaite, P. D. (1988). Factors which affect water use efficiency in rainfed production of food legumes, and their measurement. In *World crops: Cool season food legumes: A global perspective*

منابع

Abbasi, F., Mohammadi, H., Bazgir, S. and Azadi, M. (2018). Estimation of optimal planting date and growth stages sensitive to water stress in major rainfed wheat cultivation areas of Iran <https://sid.ir/paper/240057/fa>. [In Persian]

Abdshahi, A, Mardani Najafabadi, M and Zeinali, M. (2019) Determining the Optimal Cropping Pattern of Agricultural Crops in Mollasani County of Iran: Application of Robust Multi-Objective Optimization Mode, 28(111), 175-203. <https://doi.org/10.30490/aead.2020.304989.1090>. [In Persian]

Ahmad, I., Zhang, F. (2022). Optimal agricultural water allocation for the sustainable development of surface and groundwater resources. *Water Resour Manage* 36, 4219–4236 <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03249-3>

Akbari, M., Toomanian, N., Droogers, P., Bastiaanssen, W., and Gieske, A. (2007). Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite

- algorithm. *Energy*, 237, 121621.
- Kang J, Zi X, Wang S, He L. (2019) Evaluation and optimization of agricultural water resources carrying capacity in Haihe River Basin, China. *Water*; 11(5) : 999. <https://doi.org/10.3390/w11050999>
- Lalehzari, R., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H., Haghghi, A. (2016). Multi-objective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. 142(1) : 05015008. [https://doi.org/10.1061\(ASCE\)IR.1943-4774.0000933](https://doi.org/10.1061(ASCE)IR.1943-4774.0000933). [In Persian]
- Li, X., Pu, X., Wang, W., Dong, X., Zhang, Y., Wang, J., Wang, Y., Meng, M. (2023). Surface water environmental carrying capacity and surface water quality based on economy-society-environment nexus—Evidence from China, *Water-Energy Nexus*, 6, 231-243, <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.11.003>.
- Lalehzari, R., Boroomand-Nasab, S., Moazed, H. and Haghghi, A. (2020). Simulation–optimization modelling for water resources management using NSGAI-OIP and MODFLOW. *Irrigation and Drainage*. <https://doi.org/10.1002/ird.2424>[In Persian]
- Lalehzari, R., Kerachian, R. (2021). Developing a framework for daily common pool groundwater allocation to demands in agricultural regions. *Agricultural Water Management*. 241. 106278[In Persian]
- Li A, Mu X, Zhao X, Xu J. (2021). Developing the non-dimensional framework for of the problems and prospects for crop improvement in pea, lentil, faba bean and chickpea (pp. 813-829). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Delghandi, m. Jorablo, S. (2023) Investigating the effects of climate change on the intensity, duration and amount of drought in Semnan region using two indices: SPI and RDI. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>[In Persian]
- Ghamghami, M., Beiranvand, J.P. (2022). Rainfed crop yield response to climate change in Iran. *Reg Environ Change* 22, 3. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01856-1>[In Persian]
- Gholami, A. Tahmasbi, A. (2022). Effects of salt distribution, nitrate and boron contamination at different soil depths on wheat and rice yield in Khuzestan region. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6523.1030>[In Persian]
- Helmi, M. Shahidi, A. (2023). Using SPI and SPEI indices to assess the impact of drought on the quality of surface water resources. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6023.1008>[In Persian]
- Hobbs, P. R., & Osmanzai, M. (2011). Important rainfed farming systems of South Asia. In *Rainfed Farming Systems* (pp. 603-641). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Hou, R., Li, S., Wu, M., Ren, G., Gao, W., & Khayatnezhad, M. (2021). Assessing of impact climate parameters on the gap between hydropower supply and electricity demand by RCPs scenarios and optimized ANN by the improved Pathfinder (IPF)

- Qi, P., Xia, Z., Zhang, G., Zhang, W., Chang, Z. (2021). Effects of climate change on agricultural water resource carrying capacity in a high-latitude basin, *Journal of Hydrology*, 597, 126328. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126328>.
- Rashedi, E., Nezamabadi-Pour, H., & Saryazdi, S. (2009). GSA: a gravitational search algorithm.. *Information Sciences*, 179(13), 2232–2248. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004>
- Rogé, P., Astier, M. (2015). Changes in Climate, Crops, and tradition: cajete maize and the rainfed farming systems of Oaxaca, Mexico. *Hum Ecol* 43, 639–653. <https://doi.org/10.1007/s10745-015-9780-y>
- Sattar, A., Khan, S. A., Banerjee, S., & Nanda, M. K. (2019). Assessing sowing window and water availability of rainfed crops in eastern Indian state of Bihar for climate smart agricultural production: A. Sattar et al. *Theor Appl Climatol* 137, no. 3 (2019): 2321-2334. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2741-9>
- Sanabria, J., Calanca, P., Alarcón, C., & Canchari, G. (2014). Potential impacts of early twenty-first century changes in temperature and precipitation on rainfed annual crops in the Central Andes of Peru. *Reg Environ Change* 14, 1533–1548. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0595-y>
- Sharda, V.N., Dogra, P. (2013). Assessment of productivity and monetary losses due to water erosion in rainfed crops across different states of India for prioritization and conservation planning. *Agricultural water distribution formulation to evaluate sprinkler irrigation. Irrigation and Drainage*. 70(4) : 659-667.
- Li, L., Zhou, Y., Li, M., Cao, K., Tao, Y., 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, 107808, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107808>.
- Mirzaei, A., Azarm, H., Naghavi, S. (2022) Optimization of cropping pattern under seasonal fluctuations of surface water using multistage stochastic programming. *Water Supply*. 22 (6) : 5716–5728. [In Persian]
- Mittal, S., Singh, P. (2009). Intercropping field crops between rows of *Leucaena leucocephala* under rainfed conditions in northern India. *Agroforest Syst* 8, 165–172. <https://doi.org/10.1007/BF00123119>
- Mondal, D., Majumder, D., Ghosh, A., Sen, S., Das, S. (2023). Energy Budgeting of Crops Under Rainfed Conditions. In: Rakshit, A., Biswas, A., Sarkar, D., Meena, V.S., Datta, R. (eds) *Handbook of Energy Management in Agriculture*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7736-7_7-1
- Pandey, P.K., van der Zaag, P., Soupir, M.L. et al. (2013). A new model for simulating supplemental irrigation and the hydro-economic potential of a rainwater harvesting system in humid subtropical climates. *Water Resour Manage* 27, 3145–3164. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0340-1>

Sci. 12, 301–304. <https://doi.org/10.1007/BF02837549>

Research, 2(4), 382-392. <https://doi.org/10.1007/s40003-013-0087-1>

Song, X. M., Kong, F. Z., & Zhan, C. S. (2011). Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China. *Water resources management*, 25(3), 857-873. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9730-9>

Sun N, Yao Z, Xie Y, Wang T, Yang J, Li X, Fu Q. (2023). Sustainability analysis of the water environment carrying capacity of Harbin City based on an optimized set pair analysis posture-deviation coefficient method evaluation model. *Water*. 15(8) : 1575. <https://doi.org/10.3390/w15081575>

Wang C, Li Z, Chen H, Wang M. (2023) Comprehensive evaluation of agricultural water resources' carrying capacity in Anhui Province Based on an improved TOPSIS model. *Sustainability*.; 15(18) : 13297. <https://doi.org/10.3390/su151813297>

Wang G, Xiao C, Qi Z, Liang X, Meng F, Sun Y. (2021). Water resource carrying capacity based on water demand prediction in Chang-Ji economic circle. *Water*. 13(1) : 16. <https://doi.org/10.3390/w13010016>

Wang, C., Shang, Y., & Khayatnezhad, M. (2021). Fuzzy stress-based modeling for probabilistic irrigation planning using Copula-NSPSO. *Water Resources Management*, 35(14), 4943-4959. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02981-6>

Zaman, A., Choudhuri, S.K. (2022) Water use, growth and yield of green gram under rainfed upland crop sequences in Gangetic plains of indian sub—tropics. *J. Geogr.*