



Application of Game Theory in the Reallocation of Agricultural Water to Improve Water Use Efficiency

Mohammadhashem Sarafha¹ | Sheyda Kakavand² | Masoumeh Hashemi³ | Hamed Mazandarani Zadeh⁴

1. Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail:

sarafha@gmail.com

2. Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail:

sheydakakavand10@gmail.com

3. Research Assistant, Department of Plants, Soils, and Climate, Utah State University, Logan, UT, USA. E-mail:

masoumeh.hashemi@usu.edu

4. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University,

Qazvin, Iran. E-mail: mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Oct. 1, 2025

Revised: Jan. 28, 2026

Accepted: May. 20, 2026

Published online: May. 2026

Keywords:

*Game Theory,
Genetic Algorithm,
Irrigation Network,
Water Reallocation*

ABSTRACT

In recent years the water allocated for the Qazvin irrigation network has reached a staggering level of reduction at half the agreed upon total. Rather than the original allocation of 250 million cubic meters per year, it has dropped below 120 million cubic meters per year. An assessment of the situation shows that in addition to the nearly 50% reduction of water flowing in, the actual distribution pattern of water to the farmers remains unchanged. The objective of this study is to reallocate water among farmers in the Qazvin irrigation network in order to resolve existing disparities among them. To this end, the income of each farmer was first calculated under the current non-cooperative condition. Then, assuming the establishment of full cooperation, a genetic algorithm was employed to optimize the allocation of 122 million cubic meters of water within the network. Subsequently, to encourage participation, the additional benefits generated through cooperation were redistributed among farmers using the Shapley value theory. The results demonstrate that if farmers cooperate in water extraction, not only will all of them earn higher profits compared to the current situation, but the total profit will also increase significantly by about 104% (from 8.902 to 18.233 million USD). The combined application of the genetic algorithm and Shapley value theory can serve as an effective approach in managing conflicts, enhancing equity in resource allocation, and improving the economic efficiency of irrigation networks.

Cite this article: Sarafha, M., Kakavand, Sh., Hashemi, M., Mazandarani Zadeh, H., (2026) Application of Game Theory in the Reallocation of Agricultural Water to Improve Water Use Efficiency, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (3), 589-610. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403271.670016>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403271.670016>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Iranian agriculture has been consistently threatened by frequent droughts, sudden groundwater level declines, and decreased surface flow. The Qazvin plain, It covers an estimated area of about 4,400–4,500 km² and plays a key role in supplying diverse agricultural products at the national level, has been subject to severe water shortages due to both climate-based and growing pressures by domestic, industrial, and environmental uses. Based on recent studies, it has been pointed out that risk concerns of farmers due to price fluctuation and unstableness of income have been a source of over-extraction of groundwater resources. Particularly, economic modeling of crop prices through artificial neural networks and inverse demand functions has pointed out that market uncertainty boosts rigid cropping behavior and additional pressures on aquifer systems. Since farmers' behavior during water shortage is very much determined by private economic incentives, cooperative game theory offers a sturdy analytical tool to eliminate conflict and distribute equitable reallocation of water. This is particularly relevant in semi-arid regions like Qazvin, where conflicts over water use are frequent and require equitable, transparent mechanisms to ensure stakeholder cooperation.

Purpose

This study aims to develop an integrated framework for optimizing the reallocation of water resources in the Qazvin irrigation network using a combination of genetic algorithms and cooperative game theory (Shapley value). The goal is to increase overall economic returns while ensuring fairness and motivating user participation in collective water management.

Method

We used a mixed-methods quantitative design. Using data from the 2015-2016 agricultural year, the net income of each secondary canal was first calculated, assuming the non-cooperative scenario was occurring. Then, under the cooperative scenario full cooperation by all stakeholders was assumed, we used a genetic algorithm to discover the optimal flow of 122 million cubic meters (MCM) of water across 11 secondary canals over a time period of 12 months. Finally, we applied the Shapley value to distribute surplus benefits of cooperation. Whatever each stakeholder "made" at a minimum would not be less than their current income

Results

The results showed the direct cooperative redistribution income led to a total income of 104% higher income than the current situation, however under the sequence of the optimized allocation some canals (for example, L6 and L8) had income that was lower than their current allocation. However, under the socially sustainable sequence of using the Shapley value for a fair redistribution meant that all users would have an income not less than their current income, with the surplus of each stakeholder distributed based on their marginal contribution. This led to fair benefit sharing, along with eliminating any significant incentives to conflict, and meant that the potential for realization in the 'real world' was a legitimate possibility.

Conclusions

This study supports the use of optimization techniques in conjunction with cooperative game theory as a way of resolving resource conflicts. By integrating cooperative game theory with optimization techniques, cooperative solutions can emerge for shared resources, enhancing total economic production and associated fairness to stimulate voluntary participation. It can also serve as a template for water allocation for example, and other semi-arid agricultural regions with similar socio-environmental contexts.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

Conceptualization, Mazandarani Zadeh H.; methodology, Mazandarani Zadeh H.; software, Sarafha M.; validation, Sarafha M., Mazandarani Zadeh H; formal analysis, Sarafha M., Mazandarani Zadeh H.; investigation, Sarafha M. and Mazandarani Zadeh H.; resources, Sarafha M.; data curation, Sarafha M.; writing—original draft preparation, Hashemi M. and kakavand Sh.; writing—review and editing, Mazandarani Zadeh H; kakavand Sh and Hashemi M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors did not use artificial intelligence during the preparation of this work and take full responsibility for the content of the publication.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous referees for their constructive comments.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

استفاده از تئوری بازی‌ها در باز تخصیص آب در میان بهره‌برداران بخش کشاورزی به منظور افزایش کارایی مصرف آب

محمد هاشم صرافها^۱ | شیدا کاکوند^۲ | معصومه سادات هاشمی^۳ | حامد مازندرانی زاده^۴

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: seyedmarziehosseini@edu.ikiu.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: sheydakakavand10@gmail.com

۳. دستیار پژوهشی، گروه گیاهان، خاک‌ها و اقلیم، دانشگاه ایالتی یوتا، لوگان، یوتا، ایالات متحده آمریکا. رایانامه: masoumeh.hashemi@usu.edu

۴. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

در سال‌های اخیر، آب اختصاص یافته به شبکه آبیاری دشت قزوین به حدود نصف حقایق مصوب آن کاهش یافته است، به گونه‌ای که از ۲۵۰ میلیون مترمکعب در سال، به حدود ۱۲۰ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. بررسی وضعیت فعلی نشان می‌دهد علاوه بر کاهش ۵۰ درصدی منابع ورودی، الگوی توزیع آب میان بهره‌برداران بدون تغییر باقی مانده است. هدف از این تحقیق، باز توزیع آب میان بهره‌برداران شبکه آبیاری قزوین با هدف رفع اختلاف میان بهره‌برداران است. برای این منظور ابتدا درآمد هر بهره‌بردار در شرایط فعلی (عدم همکاری) محاسبه شد. سپس با فرض شکل‌گیری همکاری کامل، الگوریتم ژنتیک برای توزیع بهینه ۱۲۲ میلیون مترمکعب آب در شبکه به کار گرفته شد. در ادامه، برای ترغیب بهره‌برداران به مشارکت، سود مازاد حاصل از همکاری با استفاده از تئوری ارزش شپلی میان آنان باز توزیع گردید. نتایج نشان می‌دهد در صورتی که بهره‌برداران با هم در برداشت از آب همکاری نمایند، نه تنها همگی سودی بیش از وضعیت فعلی کسب خواهند نمود، بلکه مجموع سودی که نصیب آن‌ها می‌شود افزایش چشمگیری داشته و حدود ۱۰۴ درصد (از ۸/۹۰۲ به ۱۸/۲۳۳ میلیون دلار) بیشتر از وضعیت فعلی خواهد شد. به کارگیری رویکرد ترکیبی الگوریتم ژنتیک و تئوری ارزش شپلی می‌تواند در مدیریت تعارضات، افزایش عدالت در توزیع منابع و ارتقای بهره‌وری اقتصادی شبکه‌های آبیاری مؤثر واقع شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۳۰
تاریخ انتشار: خرداد ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

الگوریتم ژنتیک،
باز تخصیص آب،
شبکه آبیاری،
تئوری ارزش شپلی.

استناد: صرافها؛ محمد هاشم، کاکوند؛ شیدا، هاشمی؛ معصومه سادات، مازندرانی زاده؛ حامد، (۱۴۰۵) استفاده از تئوری بازی‌ها در باز تخصیص آب در میان بهره‌برداران بخش کشاورزی به منظور افزایش کارایی مصرف آب، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۳)، ۵۸۹-۶۱۰.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403271.670016>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.403271.670016>

مقدمه

کاهش نزولات جوی و افت شدید سفره‌های آب زیرزمینی، خشک‌سالی و به حداقل رسیدن جریان‌های آب سطحی، آب چشمه‌ها و رودخانه‌ها از یک طرف و ازدیاد جمعیت در شهرها و توسعه بی‌رویه‌ی شهرنشینی، صنعت و کشاورزی از سوی دیگر بر مشکلات بخش آب کشور افزوده است. دشت قزوین به‌عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور شناخته می‌شود و تقریباً ۵ درصد تولیدات کشاورزی کشور را تأمین می‌کند (فخار و کاویانی، ۱۴۰۲). با توجه به خشک‌سالی‌های پی‌درپی اخیر و افزایش سهم بخش‌های مختلف مانند صنعت، محیط‌زیست و شرب، بخش کشاورزی با کمبود شدید منابع آب مواجه شده است و کشاورزان به‌منظور تأمین معیشت خود، برداشت از آب زیرزمینی را افزایش داده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بخش زیادی از برداشت آب، از طریق چاه‌های غیرمجاز و یا به‌صورت اضافه برداشت چاه‌های مجاز صورت می‌گیرد (Dastjerdi et al., 2022). بر اساس گزارش‌های رسمی، شاخص‌های کلان بخش آب کشور در سال‌های اخیر بیانگر تشدید تنش آبی و کاهش کارایی بهره‌برداری از منابع آب در بخش کشاورزی است (عبدالمنافی جهرمی و اسدی، ۱۴۰۳). مطالعات مروری نیز نشان می‌دهند که بحران آب در ایران با تأثیرات عمیق بر امنیت غذایی در ارتباط است، و گزارش‌های FAO نیز نقش منابع آب را به‌عنوان عامل کلیدی در تأمین غذا در سطح جهانی تأکید کرده‌اند (FAO, 2014). دشت قزوین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی کشور، در سال‌های اخیر با کمبود شدید منابع آب روبرو بوده است. افزایش سهم تخصیص آب به بخش‌های شرب، صنعت و محیط‌زیست، بخش کشاورزی را در تنگنای بیشتری قرار داده و کشاورزان برای تأمین معاش خود به بهره‌برداری فزاینده از منابع آب زیرزمینی روی آورده‌اند.

یکی از عوامل تشدیدکننده این وضعیت، نگرانی کشاورزان نسبت به نوسانات قیمت محصولات کشاورزی و عدم قطعیت در بازگشت سرمایه است. در شرایطی که بازار محصولات کشاورزی با بی‌ثباتی مواجه است، بهره‌برداران تمایل دارند با حفظ الگوهای کشت آشنا و کم‌ریسک، از تغییرات ناگهانی در تصمیمات تولیدی اجتناب کنند. نتایج پژوهش‌های اخیر در دشت قزوین نشان می‌دهد که این رفتار محافظه‌کارانه، ضمن تثبیت الگوی کشت، منجر به تداوم تقاضای بالای آب و تشدید برداشت از منابع آب زیرزمینی شده است (حسینی و مازندرانی زاده، ۱۴۰۴). در همین راستا، نتایج یک مطالعه مبتنی بر مدل‌سازی پویایی سیستم‌ها در شبکه آبیاری دشت قزوین نشان داد که با در نظر گرفتن پیش‌بینی قیمت محصولات و بهینه‌سازی الگوی تخصیص آب، میانگین افت سالانه تراز آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف به حدود ۱/۲ تا ۱/۶ متر کاهش یافته است، که بیانگر نقش مؤثر مدیریت هم‌زمان اقتصادی-آبی در کاهش فشار بر سفره‌های زیرزمینی است (مازندرانی زاده و حسینی، ۱۴۰۱).

از آنجاکه رفتار اقتصادی بهره‌برداران در شرایط کم‌آبی غالباً تابع انگیزه‌های فردی است، بهره‌گیری از رویکردهایی مانند نظریه بازی‌ها می‌تواند در تحلیل وضعیت‌های تعارض یا همکاری مؤثر باشد. هدف این پژوهش، ارائه یک چارچوب تلفیقی برای بازتخصیص بهینه آب سد طالقان در شبکه آبیاری دشت قزوین است؛ چارچوبی که ابتدا با استفاده از الگوریتم ژنتیک، الگوی توزیع آب را بهینه‌سازی می‌کند و سپس با بهره‌گیری از نظریه بازی‌های همکارانه و ارزش شپلی، به بازتوزیع منصفانه سود حاصل میان بهره‌برداران می‌پردازد؛ رویکردی که در پژوهش‌های جدید نیز در قالب تلفیق نظریه بازی‌ها با مدل‌سازی عامل‌محور به‌منظور شبیه‌سازی رفتار مشارکتی بهره‌برداران در سامانه‌های پیچیده تخصیص منابع آب بررسی شده است (Khorshidi et al., 2024). به این ترتیب در حالی که در مطالعات قبلی بر بهینه‌سازی تمرکز شده است، در این تحقیق علاوه بر بهینه‌سازی استفاده از منابع، به منظور حل تعارضات اقدام به باز توزیع منافع حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از تئوری ارزش شپلی شده است.

پیشینه پژوهش

در هر نظامی که چندین ذی‌نفع درگیر باشند، به دلیل تفاوت در منافع و ترجیحات، تعارض در تخصیص منابع اجتناب‌ناپذیر است. حل این تعارض‌ها نیازمند بهره‌گیری از چارچوب‌های تصمیم‌گیری مشارکتی است (Hemati & Abrishamchi, 2020). نظریه بازی‌ها به‌عنوان یکی از ابزارهای تحلیلی قدرتمند، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب موردتوجه قرار گرفته است (Yoosefdoost, Abrão, et al., 2021). بازی‌ها به‌طور کلی به دو دسته‌ی همکارانه و غیرهمکارانه تقسیم می‌شوند؛ در بازی‌های همکارانه، بازیگران با هدف دستیابی به منافع مشترک به توافق می‌رسند، درحالی‌که در بازی‌های غیرهمکارانه، هر بازیگر صرفاً در پی بیشینه‌سازی منافع فردی خود است (Bi et al., 2022). همچنین، ترکیب این نظریه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش‌های فرابتکاری

مانند الگوریتم ژنتیک، امکان تحلیل دقیق تر سناریوهای تخصیص منابع را ایجاد کرده است (V. Hashemi et al., 2024). اگرچه دو مطالعه قبلی کاربرد نظریه بازی ها و الگوریتم ژنتیک را در حوزه های ارزش گذاری زمین و تخصیص آب مرزی نشان داده اند، این مطالعات به مسئله بازتخصیص آب در مقیاس محلی کشاورزی و پیامدهای اقتصادی و توزیعی آن برای بهره برداران در شرایط کم آبی نپرداخته اند؛ موضوعی که در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته است.

مطالعات مقایسه ای اخیر نیز نشان داده اند که استفاده از نظریه بازی ها در کنار روش های بهینه سازی چندهدفه، می تواند در مدیریت منابع آب بین مرزی به تخصیص های عادلانه تری منجر شود (Fu et al., 2021). تحقیقات زیادی وجود دارد که استفاده از تئوری بازی ها را در تخصیص منابع آبی در سطوح محلی، ملی و بین المللی مورد بررسی قرار داده اند (Fu et al., 2021; Janjua et al., 2025; Khorshidi et al., 2024; Mehrparvar et al., 2019; Tharwat et al., 2024; Y. Zheng et al., 2022). این مجموعه مطالعات نشان داده اند که تحلیل استراتژیک کنش گران با بهره گیری از مفاهیم بازی های همکارانه نظیر ارزش شپلی و راه حل نش، می تواند مسیری پایدارتر برای تخصیص منابع فراهم آورد. با این وجود، سهم مطالعاتی که به طور هم زمان به بهینه سازی تخصیص آب و بازتوزیع منافع اقتصادی حاصل از آن در شرایط کم آبی شدید بپردازند، محدود است؛ از این رو پژوهش حاضر به تلفیق الگوریتم ژنتیک با ارزش شپلی، گامی در جهت پرکردن این خلأ برمی دارد. در مطالعه ای دیگر در شبکه آبیاری دشت قزوین، با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی هم زمان الگوی کشت و توزیع آب تحت سناریوهای مختلف قیمت گذاری آب بررسی شد و نتایج نشان داد که حتی در صورت اعمال قیمت واقعی، به شرط بهینه سازی مدیریت آب، می توان هم منابع را حفظ کرد و هم درآمد کشاورزان را به طور چشمگیری افزایش داد (مازندرانی زاده و حسینی، ۱۴۰۴). همچنین در پژوهشی، بازتخصیص آب در شبکه آبیاری دشت قزوین با هدف افزایش درآمد بهره برداران و ارتقای عدالت در توزیع، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی چندهدفه فازی انجام شد که نتایج آن نشان دهنده ی کارایی بالای این رویکرد در بهبود عملکرد اقتصادی و شاخص های عدالت بود (کاکاوند و همکاران، ۱۴۰۲).

اگرچه (Y. Zheng et al., 2022) با به کارگیری چارچوب نظریه ورشکستگی برای ارائه راهکارهای توزیع عادلانه منابع آب تحت شرایط کمبود تلاش کرده اند، این رویکرد بیشتر در زمینه ی توزیع کلی منابع با استفاده از قوانین تخصیص و بدون تلفیق با بهینه سازی ریاضی و داده های واقعی بهره برداران محلی ارائه شده است. در تحقیقی دیگر که در رودخانه ارس انجام شد، (Rashidi, Zarghami, et al., 2022) با استفاده از نظریه بازی همکارانه شپلی و تعادل نش، به مدل سازی ائتلاف هایی پرداختند که جریان محیطی مناسبی را تضمین می کردند. نتایج نشان داد که ترکیب این دو رویکرد می تواند هم عدالت و هم کارایی در تخصیص منابع آب را در شرایط رقابتی ارتقا دهد. اگرچه این روش ها در سطح بین المللی کارآمد است، کاربرد آن در شبکه های آبی محلی ایران نیازمند تطبیق با شرایط منطقه ای و ساختار شبکه های آبی موجود است.

در مطالعه ای در مرود سفره های زیرزمینی، (Moghaddam et al., 2022) با استفاده از مدل بازی چندشاخصی غیرهمکارانه، ویژگی های تعارض میان ذی نفعان را بررسی کرده و نشان داده اند که تحلیل تعارضات به این روش می تواند به بازسازی پایدار و مدیریت منصفانه سفره ها منجر شود. همچنین استفاده از مدل های چندسطحی و برابری با استفاده از تعادل نش تعمیم یافته به مدیریت نظام مند و منصفانه تخصیص منابع کمک کرده است (Boyd et al., 2023; Ghaffari Moghadam et al., 2023). برنامه کمبود آب فائو ۱۳؛ در واکنش به چالش های در حال ظهور و در مشورت دقیق با سازمان های قانونی مرتبط ایجاد شده است. این برنامه به طور خاص، در پی ارزیابی نقش فائو و فعالیت های مربوط به آب، در سال ۲۰۱۰ تاسیس شده است. همچنین طی این برنامه یک پیش نویس استراتژیک برای آب ایجاد شده که منعکس کننده اهمیت، اهداف و ماهیت متقابل ذاتی آب در مأموریت سازمان فائو است. (عابدی، ۱۳۹۹). در مطالعه ای که باهدف مدیریت هم زمان منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق نیمه خشک ایران انجام شد، (Kayhomayoon et al., 2022) از رویکرد مدل سازی ترکیبی شبیه سازی-بهینه سازی استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که به منظور افزایش کارایی آبیاری و حفظ پایداری منابع، برداشت تلفیقی از هر دو منبع آب ضروری است.

در تئوری بازی های همکارانه، روش های متعددی برای تخصیص عادلانه سود مازاد حاصل از همکاری میان بازیگران وجود دارد که هر کدام بر اساس معیارها و اصول متفاوتی عمل می کنند (Degefu et al., 2016; Madani, 2010). از جمله مهم ترین این روش ها

می‌توان به راه‌حل چانه‌زنی نش^۱ اشاره کرد که بر اساس حداکثرسازی حاصل ضرب سودهای حاشیه‌ای بازیگران نسبت به نقطه تهدید آن‌ها عمل کرده و پاسخی متقارن و کارا ارائه می‌دهد (Sechi and Zucca, 2015). این رویکرد در مطالعات تخصیص آب بین‌المللی و حوضه‌های مرزی به کار گرفته شده است (Wu and Whittington, 2006). همچنین راه‌حل هسته^۲ مجموعه‌ای از تخصیص‌ها را معرفی می‌کند که در آن هیچ زیرمجموعه‌ای از بازیگران انگیزه‌ای برای خروج از ائتلاف بزرگ ندارند و پایداری ائتلاف را تضمین می‌نماید (Dinar and Howitt, 1997). ارزش هسته^۳ کمینه^۳ نیز در مطالعات مدیریت منابع آب برای حداقل‌سازی بیشترین نارضایتی میان ذی‌نفعان مورد استفاده قرار گرفته است (Parrachino et al., 2006). علاوه بر این‌ها، نظریه ورشکستگی^۴ در شرایط کمبود شدید آب به‌عنوان رویکردهای جایگزین پیشنهاد شده‌اند (Degefu et al., 2016; H. Zheng et al., 2022).

با این وجود، در این پژوهش از ارزش شپلی^۵ استفاده شده است، زیرا این روش تنها راه‌حلی است که به‌طور هم‌زمان چهار اصل بنیادین عدالت را برآورده می‌سازد: کارایی^۶، تقارن^۷، جمع‌پذیری^۸ و بازیگر خنثی^۹ (Shapley, 1953). علاوه بر این، ارزش شپلی با محاسبه میانگین وزن دار سهم حاشیه‌ای هر بهره‌بردار در تمام ترتیب‌های ممکن ائتلاف، قدرت چانه‌زنی و نقش واقعی هر بازیگر را به‌صورت عینی و شفاف مدل‌سازی می‌کند (Abed-Elmdoust et al., 2016). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که ارزش شپلی در مسائل تخصیص منابع آب کاربرد موفق‌تری نسبت به سایر روش‌ها داشته است، از جمله در تخصیص آب رودخانه‌های مرزی (Rashidi, Talebi, et al., 2022). مدیریت آب‌های زیرزمینی (Yoosefdoost, Khashei-Siuki, et al., 2021)، برنامه‌ریزی حوضه‌های آبریز مشترک (Sadegh et al., 2010)، و بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری (S. R. Hashemi et al., 2024).

روش‌شناسی پژوهش

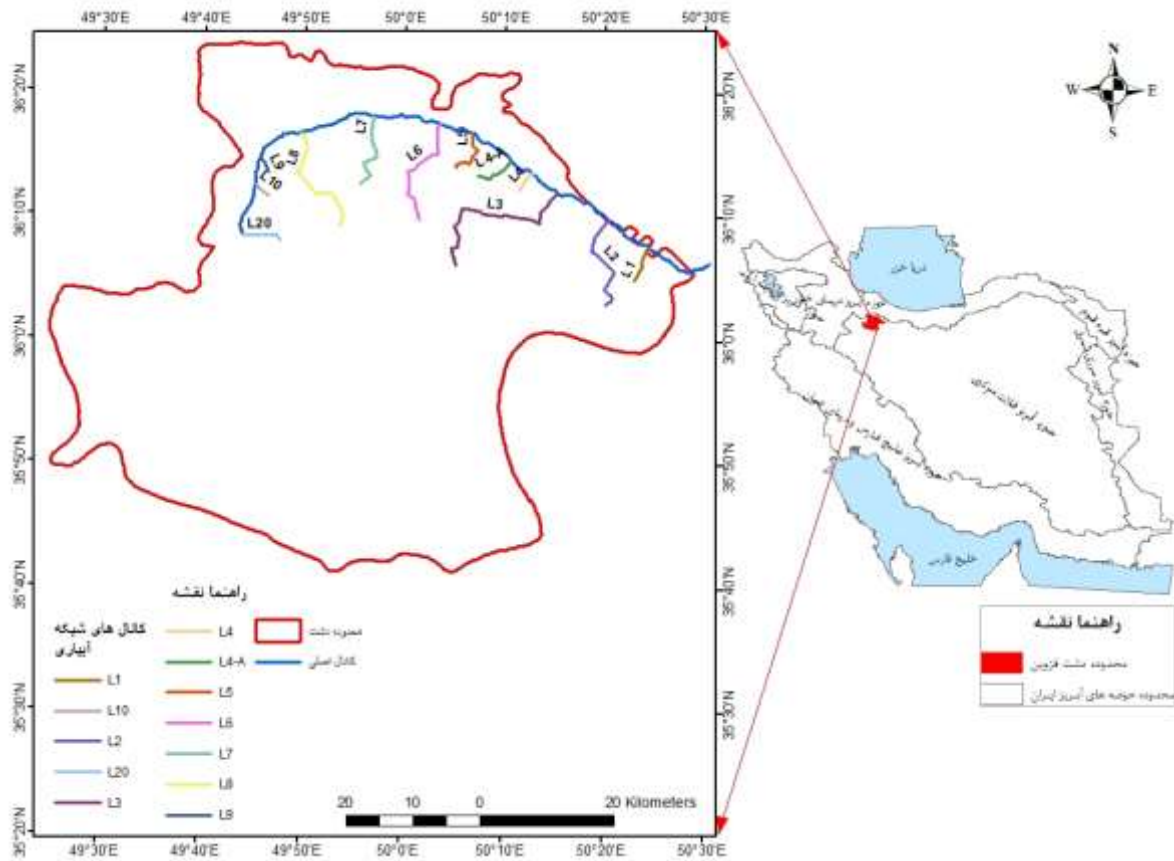
منطقه مورد مطالعه

دشت قزوین که در استان قزوین واقع شده، با مساحتی بین ۴۴۰۰ تا ۴۵۰۰ کیلومتر مربع، یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین دشت‌های حوضه آبریز دریاچه نمک به شمار می‌رود و بیشترین سطح زیر کشت انواع محصولات کشاورزی را در میان دشت‌های این حوضه آبریز داراست (Shokoohi et al., 2016). اقلیم آن نیمه‌خشک بوده و دارای تابستان‌های نسبتاً گرم و زمستان‌های نسبتاً سرد است. بر اساس نتایج تحقیق (Banihashemi et al., 2021)، در دشت قزوین میانگین دما تا سال ۲۰۵۰ احتمالاً تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بارش نیز در بازه‌های بین ۰/۵ تا ۱/۷ برابر نسبت به دوره پایه در نوسان خواهد بود، ضمن این‌که خشک‌سالی‌ها در آینده نزدیک تقویت می‌شوند. منطقه مورد مطالعه، بین ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). شبکه آبیاری دشت قزوین شامل پهنه‌ای است از دشت قزوین که تحت پوشش شبکه مدرن آبیاری قرار گرفته و به‌صورت نواری به طول حدود ۲۰ کیلومتر است. این شبکه از طرف مشرق به رودخانه زیاران، از غرب به حاشیه شرقی شهر تاکستان، از شمال به دامنه‌های کوه‌های البرز مرکزی و از جنوب به حاشیه جاده کمال‌آباد - آبیگ محدود می‌گردد.

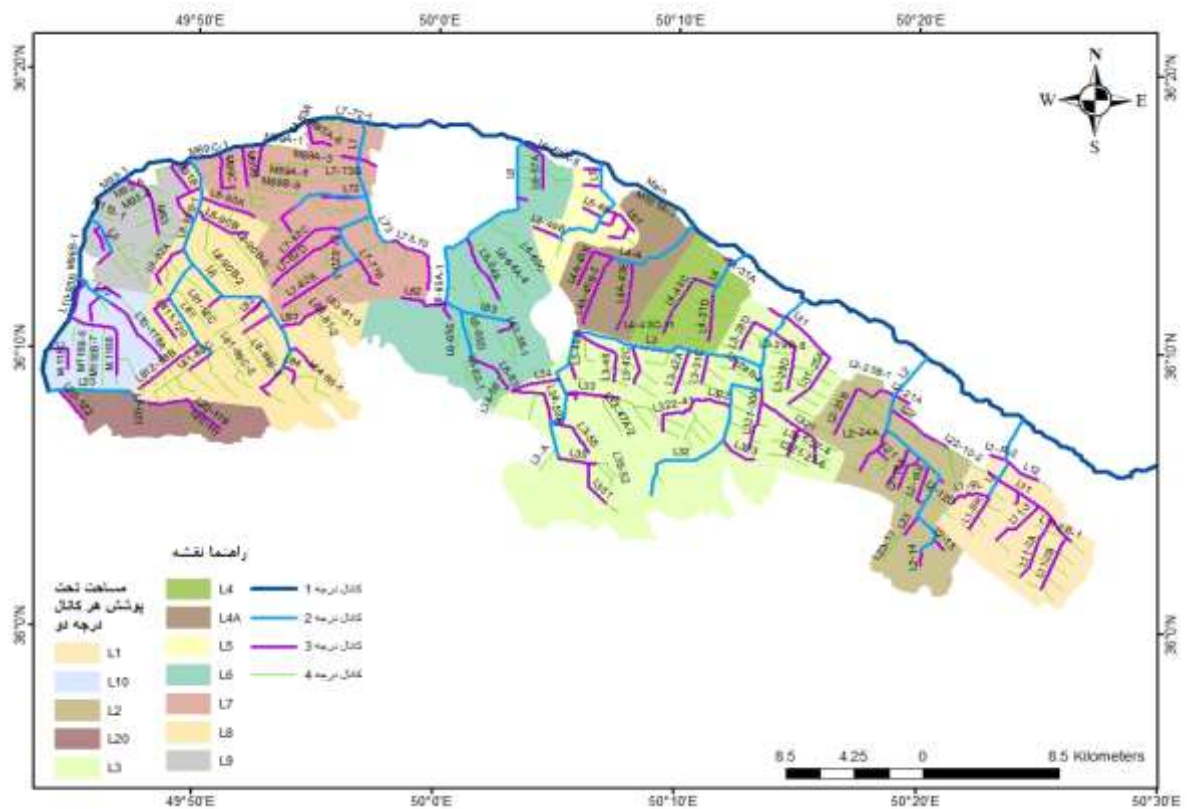
مشخصات شبکه آبیاری دشت قزوین

شبکه آبیاری دشت قزوین جهت انتقال آب رودخانه طالقان که در حوضه خارج از دشت جریان دارد، به داخل دشت قزوین احداث شد تا آب رودخانه مذکور را جهت کشاورزی در فصول مختلف سال در اختیار اراضی این دشت حاصلخیز قرار دهد. شبکه آبیاری و زهکشی دشت قزوین به طول کلی ۱۰۴۷ کیلومتر متشکل از ۵۱۹ شاخه کانال اصلی و کانال‌های درجه ۱، ۲، ۳ و ۴ است. شکل (۲) موقعیت کانال‌ها و سطح زیرپوشش توسط هر کدام از کانال‌های درجه دو در شبکه نشان می‌دهد.

1. Nash Bargaining Solution
2. Core
3. Nucleolus
4. Bankruptcy Theory
5. Shapley Value
6. Efficiency
7. Symmetry
8. Additivity
9. Null Player



شکل ۱. موقعیت حوضه های آبریز، محدوده دشت قزوین، شبکه آبیاری



شکل ۲. موقعیت کانال ها و سطح زیرپوشش توسط هر کدام از کانال های شبکه آبیاری در دشت قزوین



جدول ۲. سطح زیر کشت محصولات زراعی شبکه به تفکیک نوع محصول و کانال فرعی (هکتار)

گیاه کانال	L1	L2	L3	L4	L4A	L5	L6	L7	M2	L8	MW	Total
گندم	۱۹۷۲	۲۶۸۱	۶۲۹۶	۱۲۲۸	۱۱۵۱	۱۰۱۷	۳۶۷۱	۲۰۵۴	۱۱۷۴	۳۷۲۴	۲۱۱۱	۲۷۰۷۹
ذرت علوفه‌ای	۲۹۶	۲۰	۲۹۵	۱۰۴	۲۵	۳۶/۷	۷۳/۵	۰	۰	۸۸/۵	۲۰	۹۵۸/۷
کلزا	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
گوجه‌فرنگی	۲۲۷	۲۸۰	۲۷۵	۶/۵	۴۱/۵	۴۱	۸۵/۵	۲۵۵	۱۲۰	۷۵/۸	۲۶	۱۴۳۳/۳
یونجه	۴۰۶	۴۹۶	۸۵۹	۲۷۸	۱۳۶	۱۴۹	۳۹۵	۱۹۲	۱۱۶	۹۶۷	۵۱۷	۴۵۱۱
جو	۶۷	۱۳۶	۷۷۵	۱۹۰	۱۸۸	۷۲	۶۸۲	۲۳۷	۲۶۳	۹۷۴	۵۰۵	۴۰۸۹
چغندر قند	۱۰	۹/۵	۶۰۹	۰	۱۲۵	۰	۴۲۳	۲۷/۵	۰	۱۷۶	۱۰۱	۱۴۸۱
نخود	۴	۱۱/۲	۴۲	۰	۱	۲۷	۲۹/۵	۳۸/۷	۲۶	۹۵/۶	۱۰۳	۳۷۸
لوبیا	۷۸	۳۹	۱۰۳	۱۲۵	۲۳	۹/۵	۴۲/۸	۹۰/۲	۵۲	۸۷/۱	۲۰	۶۶۹/۶
سیب‌زمینی	۰	۰	۱۶	۵	۰	۲	۲	۳۹/۸	۴۱/۵	۱۷	۱۶۰	۲۸۳/۳
ذرت دانه‌ای	۰	۵/۶	۱۷۱	۵	۸۰	۱/۵	۱۰۳	۳۵	۰	۰	۰	۴۰۱/۱
عدس	۰	۰	۷	۰	۰	۰	۱۲	۴۶	۲۰	۲۰	۱۵	۱۲۰

تحقیق در سه مدل شامل مدل (۱) بررسی وضعیت کنونی توزیع آب در شبکه، (۲) توزیع آب در شبکه در شرایط بهینه (مدل ۲)، (۳) باز توزیع ائتلاف نسبت به شرایط کنونی (مدل ۳) تعریف شده است که در ادامه، هر مرحله و روش‌ها و تکنیک‌ها استفاده شده توضیح داده شده است.

وضعیت کنونی توزیع آب در شبکه (مدل ۱)

به‌طور کلی در تحقیق حاضر سطح زیر کشت محصولات در هر سه مدل ثابت در نظر گرفته شده است و در مدل ۲ و ۳ تصمیم‌ها بر روی میزان آب تخصیص داده شده به هر کانال درجه دو اعمال شده است. به‌منظور بررسی شرایط کنونی دشت به ازای آب‌های تخصیص یافته، در مرحله اول سود حاصل از توزیع کنونی آب در شبکه آبیاری محاسبه شده است. جدول (۱) مقدار توزیع آب در سال زراعی ۹۵-۹۴ در هر کدام از کانال‌های درجه دو نشان می‌دهد.

در این مدل با فرض اینکه آبیاری در سطح دشت بدون تنش آبی انجام شده است و عملکرد محصولات (جدول ۳) در حالت پتانسیل بوده است درآمد خالص دشت ناشی از مصرف ۱۲۲ میلیون مترمکعب با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌شود. توزیع موجود آب در شبکه لزوماً از یک معیار تخصیصی اقتصادی بهینه تبعیت نمی‌کند؛ از این رو، این وضعیت صرفاً به‌عنوان مبنای مقایسه مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳. مقدار عملکرد پتانسیل محصولات شبکه آبیاری دشت قزوین (تن بر هکتار)

گیاه	گندم	ذرت علوفه‌ای	کلزا	گوجه‌فرنگی	یونجه	جو	چغندر قند	نخود	لوبیا	سیب‌زمینی	ذرت دانه‌ای	عدس
عملکرد محصولات	۷	۸۰	۵/۵	۱۲۰	۱۵	۴/۵	۱۰۰	۳	۵	۴۵	۱۳	۲

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Y_{aj} A_{ij} Pr_j \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، P مقدار درآمد خالص کل شبکه (دلار)، Y_{aj} مقدار عملکرد پتانسیل محصول j م (تن بر هکتار)، A_{ij} سطح زیر کشت محصول j م در بخش i م (هکتار)، Pr_j سود حاصل از فروش محصول j م (دلار/تن) این پارامتر به‌صورت ثابت و بر اساس قیمت‌های رسمی سال پایه در مدل لحاظ شده است، n تعداد بهره‌برداران (۱ بهره‌بردار) و m تعداد محصولات (۱۲ محصول) است.

مدل دوم: مدل همکارانه

در این مدل تخصیص بهینه‌ی آب به جهت افزایش سود در میان کانال‌های درجه دو بررسی می‌گردد. در واقع جدول (۱) که میزان آب توزیع شده کنونی در هر یک از کانال‌های اصلی شبکه آبیاری دشت قزوین را مشخص می‌کند، مورد بازبینی قرار گرفته و مقدار بهینه‌ی تخصیص آب در هر کانال درجه دو با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ مشخص خواهد شد. الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی تکاملی مبتنی بر اصول انتخاب طبیعی و ژنتیک داروینی است که با ایجاد و تکامل جمعیتی از جواب‌های اولیه و به‌کارگیری عملگرهایی نظیر انتخاب، تقاطع و جهش، امکان جستجوی فضای وسیع جواب‌ها و دستیابی به جواب‌های نزدیک به بهینه را فراهم می‌سازد (Taha et al., 2024).

در این بازتوزیع فرض بر این است که بین آبریان^۲ هیچ تعارضی وجود ندارد و کل دشت به‌صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. با توجه به این که مقادیر کلی توزیع و رهاسازی آب از سد طالقان در هر ماه مقادیر ثابتی است، این موضوع به‌عنوان یک قید در مدل همکارانه بهینه‌سازی (مدل ۲) مورد توجه قرار گرفته است به‌نحوی که مجموع آب توزیع شده، در هر ماه مقدار ثابتی است. در نتیجه مجموع سالانه تخصیص یافته به کل دشت یکسان بوده است و مدل بر میزان تخصیص آب دریافت شده در هر ماه بین کانال‌های درجه دو، بهینه‌سازی را اعمال می‌کند. در این مدل، بازتوزیع آب برای ۱۱ کانال درجه دو شبکه و در طول ۱۲ ماه سال زراعی در نظر گرفته شده است (در مجموع ۱۳۲ متغیر تصمیم).

یکی از مواردی که در محاسبه مقدار محصول و سود حاصل از فروش آن در نظر گرفته شد، نحوه‌ی توزیع آب در بین محصولاتی است که زیرمجموعه‌ی هر کانال می‌باشند، در واقع این که مشخص شود آب، چگونه پس از تخصیص درون کانال‌ها، بین محصولات توزیع شود، امری سخت و غیرممکن است؛ چرا که کشاورزان با صلاح دید و نظر خود آب را بین محصولاتشان توزیع می‌کنند، اما در حالت معمول این توزیع می‌بایست بر اساس نسبت نیاز آبی محصولات در نظر گرفته شود و کشاورزان پس از دریافت حق آبه‌ی خود، آب را طوری بین گیاهان توزیع کنند که نسبت نیاز آبی آن‌ها رعایت شود؛ یعنی به گیاهانی که نیاز آبی بیشتری دارند، آب بیشتری برسد. در این مدل نیز بهینه‌سازی در حالتی که توزیع بهینه‌ی آب در ۱۱ کانال و در ۱۲ ماه بوده و توزیع آب در هر کانال بین گیاهان با فرض توزیع بر اساس نسبت نیاز آبی صورت می‌گیرد انجام شد؛ بنابراین مدل بر میزان آب تعلق گرفته به هر کانال درجه دو (۱۱) در هر ماه (۱۲) مقدار درآمد حاصل در کل شبکه را حداکثر می‌کند.

با توجه به اینکه که سطح زیر کشت محصولات تغییر نمی‌کند بنابراین ممکن است آب تعلق گرفته به هر محصول از نیاز آبی پتانسیل کم‌تر باشد، در نتیجه عملکرد محصولات در هر کانال با توجه به آب تخصیص یافته در هر ماه متغیر است به این منظور از معادله تابع عملکرد برای محاسبه میزان تولید محصولات در هر کانال درجه دو استفاده می‌شود.

تابع عملکرد

تابع تولید محصول بیانگر رابطه بین مقدار آب داده شده و محصول تولیدی در گیاهان زراعی است. مقدار آب مصرفی بر میزان عملکرد تأثیرگذار است و چگونگی مدیریت مصرف آب در طول دوره رشد گیاه بر حداکثر شدن میزان محصول تأثیر اساسی دارد. در این تحقیق به جهت برآورد میزان محصول تولید شده با توجه به آبی که برای هر بخش تخصیص داده می‌شود از رابطه آب-تولید که در نشریه‌ی ۵۶ فائو^۳ به آن اشاره شده (رابطه (۲))، استفاده شده است. در این رابطه با توجه به نسبت آب تخصیص داده شده به آب مورد نیاز گیاه، ضریب حساسیت گیاه نسبت به کم آبی (Ky) (جدول ۴) و نسبت محصول تولید شده به پتانسیل محصول به دست می‌آید.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{k=1}^n \left[1 - K_{yk} \left(1 - \frac{AET_k}{PET_k} \right) \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن، Y_a مقدار عملکرد واقعی محصول (تن بر هکتار)، Y_m مقدار عملکرد پتانسیل محصول (تن بر هکتار) (جدول ۳)، k شاخص گام‌های زمانی (ماه‌های دوره رشد گیاه) است و حاصل ضرب موجود در معادله بیانگر اثر تجمعی تنش آبی در طول فصل رشد بر عملکرد

1. Genetic Algorithm

2. FAO 56

3. Crop yield response factor



نهایی محصول است، K_y ضریب حساسیت محصول نسبت به کم‌آبی (بدون واحد) (جدول ۴) این ضریب بیانگر میزان کاهش عملکرد محصول در اثر تنش آبی است، AET_i مقدار آب داده شده به گیاه (تبخیر و تعرق واقعی، میلی‌متر) این متغیر، متغیر تصمیم مدل بوده و میزان واقعی آب تخصیص داده شده را نشان می‌دهد و PET_i نیاز آبی گیاه I_m (تبخیر و تعرق پتانسیل، میلی‌متر) در دوره‌ی رشد است، این پارامتر نشان‌دهنده نیاز آبی کامل محصول در هر ماه است.

جدول ۴. ضریب حساسیت عملکرد محصول به آبیاری در دوره ماهانه (K_y)

گیاه ماه	فروردین	اردیبهشت	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر	مهر
گندم	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰	۰	۰	۰/۲	۰	۰	۰	۰/۲	۰/۲
ذرت علوفه‌ای	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰	۰	۰	۰/۲	۰	۰	۰	۰/۲	۰/۲
کلزا	۰/۲	۰/۶	۰/۵	۰	۰	۰	۰/۲	۰	۰	۰	۰/۲	۰/۲
گوچه فرنگی	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
یونجه	۰/۲	۰/۷	۰/۹	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
جو	۰/۲	۰/۹	۰/۸	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
چغندر قند	۰/۲	۱/۱	۰/۷۵	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
نخود	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۷	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰
لوبیا	۰/۴	۰/۴	۱/۱	۱/۱	۰/۸	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سیب زمینی	۰	۰/۴	۰/۴	۱/۵	۰/۵	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
ذرت دانه‌ای	۰	۰/۴	۰/۴	۱/۵	۰/۵	۰/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰
عدس	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰/۸

پتانسیل تولید محصول Y_m

با توجه به رابطه (۲) یکی از پارامترهایی که برای محاسبه میزان تولید به واسطه‌ی آبی که به آن داده می‌شود، مورد نیاز است؛ پتانسیل تولید محصول است. پتانسیل تولید برای هر محصول مقدار محصولی است که در شرایط ایده‌آل در هر منطقه برداشت خواهد شد. از آنجاکه وضعیت اقلیمی هر منطقه متفاوت بوده و شرایط و نیازهای گیاهان متفاوت است، در هر منطقه وضعیت رویش گیاه و مقدار محصولی که می‌توان برداشت کرد، متفاوت است. به عبارت دیگر پتانسیل تولید محصول مقدار محصولی است که در شرایط مساعد بدون هیچ‌گونه کم‌آبی و آفت و رسیدگی کامل در حالت بالقوه تولید شود. پتانسیل تولید هر محصول در دشت قزوین در جدول (۳) ارائه شده است.

نیاز آبی (تبخیر و تعرق پتانسیل) ET

برآورد مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل برای محاسبه‌ی نیاز آبی در برنامه‌ریزی کشاورزی محصولات مختلف بسیار اهمیت دارد، چراکه تبخیر و تعرق به‌عنوان شاخص اصلی مصرف آب گیاه، تعیین‌کننده میزان آبی است که باید برای دستیابی به رشد مطلوب و تولید حداکثری بدون تنش آبی تأمین شود (Wanniarachchi and Sarukkalige, 2022).

برای به دست آوردن تبخیر تعرق پتانسیل با توجه به فرمول (۳) بایستی مقادیر داده‌های نیاز خالص (I_n ، میلی‌متر) و بارش خالص (P_e ، میلی‌متر) که با استفاده از نرم‌افزار نت‌وات بدست آیند و باهم جمع شوند، در رابطه زیر ET تبخیر تعرق پتانسیل (میلی‌متر) است.

$$I_n = ET - P_e \quad \text{رابطه ۳}$$

همان‌طور که بیان شده در این مدل از الگوریتم ژنتیک به منظور باز تخصیص بهینه آب بین کانال‌های درجه دو دشت قزوین استفاده می‌شود. رابطه (۴) تابع هدف الگوریتم و همچنین محدودیت‌های در نظر گرفته شده در مدل را نشان می‌دهد. در این مدل با توجه به حجم آب موجود در وضعیت کنونی شبکه، برابر ۱۲۲ میلیون مترمکعب، اقدام به توزیع بهینه‌ی آب شده است.

$$\text{Max } P = \sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{12} \left(Y_{m,i} \cdot \prod_{k=1}^m [1 - K_{y_{k,i}} \cdot \left(1 - \frac{AET_{k,i,j}}{PET_{k,i}} \right)] \right) \cdot A_{ij} \cdot Pr_j \quad \text{رابطه ۴}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{12} \sum_{k=1}^{12} AET_{k,i,j} \leq 122$$

$$\sum_{i=1}^{11} \sum_{j=1}^{12} AET_{k,i,j} \leq MAW_k \quad \forall k=1, \dots, 12$$

که در آن P درآمد خالص شبکه (دلار) که بیشینه‌سازی آن مدنظر است، $AET_{k,i,j}$ مقدار تخصیص داده شده به بخش z ام برای محصول i ام در ماه k ام است. لازم به توضیح است که پارامترهای Pr_j و A_{ij} در رابطه (۱) و $K_{y_{k,i}}$ ، $AET_{k,i,j}$ ، $PET_{k,i}$ در رابطه (۲) تعریف شده‌اند و در این بخش صرفاً در قالب یک چارچوب بهینه‌سازی تجمیع شده‌اند.

در قید اول محدودیت کل منابع آب شبکه است که برابر ۱۲۲ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. قید دوم محدودیت آب ماهانه شبکه است که در آن MAW_k حداکثر حجم آب قابل دسترس در ماه k (میلیون مترمکعب).

اگر در پیاده‌سازی مدل‌های بهینه‌سازی، برخی از بهره‌برداران دچار ضرر شده و برخی سود بیشتری کسب کنند، مدل بهینه‌سازی به جای ایجاد توافق میان بهره‌برداران، باعث ایجاد اختلاف بین آن‌ها خواهد شد. طبیعتاً بهره‌بردارانی که از حالت کنونی خود سود کمتری داشته باشند، همکاری نخواهند کرد و اجازه‌ی اجرای مدل‌های بهینه را نمی‌دهند. برای حل این قبیل مشکلات از مدل‌های رفع اختلاف همکارانه استفاده می‌شود.

مدل سوم: مدل رفع اختلاف شپلی

یکی از مفاهیم مهم در بازی‌های مبتنی بر همکاری، مفهوم سود حاشیه‌ای است؛ در یک بازی مبتنی بر همکاری، همواره این سؤال مطرح است که چگونه سود حاصل از بازی بین تمامی بازیکنان تقسیم شود. در واقع، سود حاشیه‌ای عبارت است از مقداری که در صورت ترک یک بازیکن خاص از صحنه بازی، از سود کل، کسر می‌گردد. در این تحقیق از تئوری شپلی به منظور تعیین وزن هر کدام از کانال‌های درجه دو در تقسیم سود به دست آمده در مدل ۲ استفاده شده است.

ارزش شپلی^۲

این روش نخستین بار توسط لوید شپلی^۳ در سال ۱۹۵۳ برای توزیع عواید یک ائتلاف بین بازیکنان آن بر مبنای سهم نسبی هر بازیکنان در افزایش سود آن ائتلاف ارائه شد. ارزش شپلی برای مشارکت N بازیکنان به صورت رابطه (۵) نمایش داده می‌شود:

$$\phi_i(V) = \sum_{i=1}^N \frac{(k-1)!(N-k)!}{N!} \{v(C) - v(C-i)\} \quad (i \in N) \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، N تعداد کل بازیکنان، k تعداد بازیکنان در ائتلاف C ، $\phi_i(V)$ ارزش شپلی بازیکن i در ائتلاف، $v(C)$ ارزش ترکیب C و $v(C-i)$ ارزش ترکیب C هنگامی که بازیکن i در ترکیب حذف شده است.

1. Marginal contribution
2. Shapley value
3. Lloyd Shapley



در مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (مدل ۲)، به‌طور معمول به بعضی از کانال‌ها آب بیشتری نسبت به شرایط کنونی تخصیص داده شده است و بعضی کمتر ولی در مجموع کل شبکه سودی بیشتر از مدل اول (شرایط کنونی) به دست خواهد آورد؛ اما ممکن است بهره‌بردارانی که سود کمتری عایدشان می‌شود حاضر به شرکت در این ائتلاف نباشد. تقسیم سود بر اساس تئوری شپلی، حتی این بهره‌بردار را نیز مجبور می‌کند که در ائتلاف شرکت کرده و راضی باشد زیرا براساس تئوری مدل رفع اختلاف شپلی سودی بیشتر از مدل ۱ عاید وی خواهد شد؛ بنابراین آب بر اساس مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (مدل ۲) به بهره‌برداران اختصاص داده خواهد شد و سود حاصل از آن با الگوی مدل شپلی بین آبران تقسیم می‌شود.

در این مدل با توجه به حجم آب موجود در وضعیت فعلی شبکه، برابر ۱۲۲ میلیون مترمکعب اقدام به توزیع آب شده است. در این مدل فرض بر این است که اعضا با یکدیگر همکاری کامل ندارند و شرط ورود به موضوع باز تخصیص آب را کسب درآمدی برابر با درآمد فعلی (در شرایط بدون همکاری) می‌دانند؛ به عبارت دیگر در این مدل، اعضا حاضر به کاهش سود خود به مقداری کمتر از مقدار حال حاضر نیستند. به این منظور از تئوری بازی همکارانه شپلی استفاده شده است.

در این مدل به منظور تعیین قدرت و وزن هر یک از بهره‌برداران در ائتلاف، ارزش شپلی هر یک از آن‌ها تعیین می‌شود. مفهوم ارزش شپلی، بر اساس بررسی شکل‌گیری ائتلافات متعدد میان بازیکنان استوار است؛ به این ترتیب که برای یک بازی n نفره، ابتدا $n-1$ بازیکن ائتلاف می‌کنند و یک بازیکن در ائتلاف شرکت نمی‌کند. تعداد حالتی که یک بازیکن می‌تواند در یک بازی n نفره بازی نکند عبارت است از ترکیب یک از n که با استفاده از معادله (۶) محاسبه می‌گردد.

$${}^n C_1 = \frac{n!}{(n-1)! \times 1!} \quad \text{رابطه ۶}$$

بدین معنا که هر دفعه یکی از آن n بازیکن، بازی نکند. بدین ترتیب اثربخشی آن یک بازیکنی که شرکت نکرده است، در ائتلاف $n-1$ نفره مشخص می‌شود.

با ادامه‌ی کار و تعمیم موضوع به ائتلافات کوچک‌تر یعنی بازی‌های $n-1$ نفره، $n-2$ نفره، $n-3$ نفره ... تا ۲ نفره، وزن یا ارزش شپلی بازیکنان با استفاده از رابطه‌ی شپلی، رابطه (۴) مشخص می‌شود. در شکل (۳) فلوجارت روش کار تئوری شپلی نشان داده شده است.

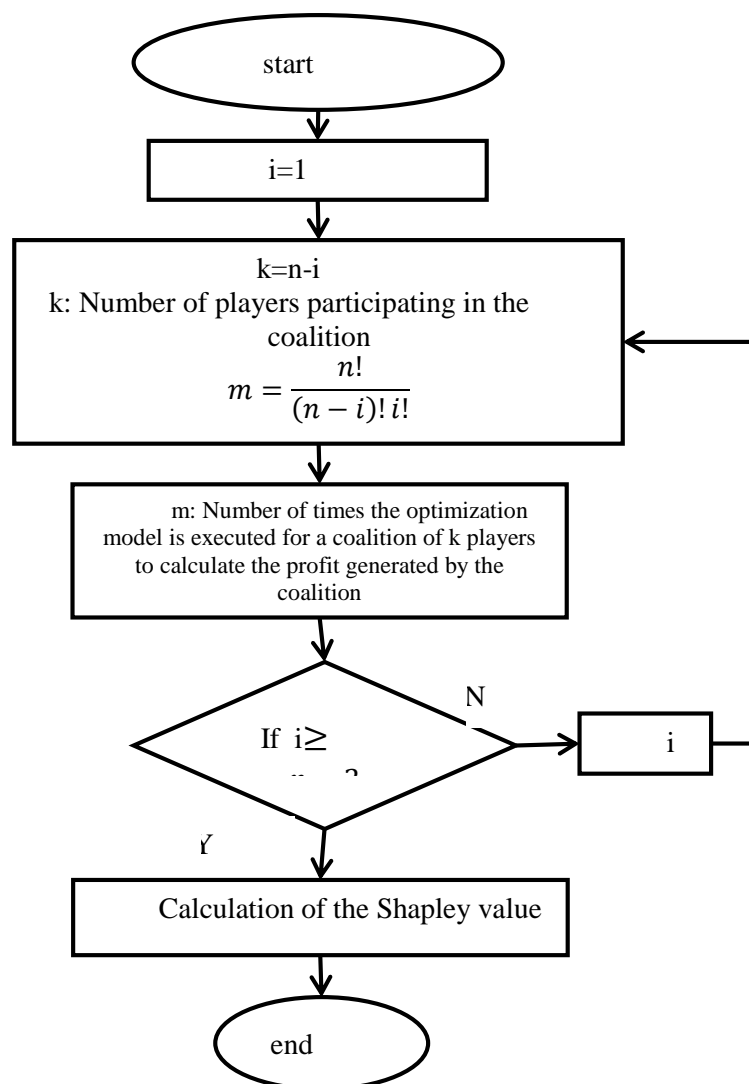
مثال عددی ساده برای ارزش شپلی

برای درک بهتر نحوه کارکرد ارزش شپلی در توزیع عادلانه سود مازاد، یک مثال ساده عددی با سه بهره‌بردار فرضی A ، B و C را در نظر می‌گیریم. فرض کنید در وضعیت فعلی (عدم همکاری)، درآمد سالانه این سه بهره‌بردار به ترتیب ۳۰، ۲۵ و ۲۰ واحد پولی بوده که در مجموع ۷۵ واحد درآمد را تشکیل می‌دهد. در صورت همکاری کامل و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توزیع آب، درآمد کل شبکه به ۱۰۰ واحد افزایش می‌یابد؛ بنابراین سود مازاد حاصل از همکاری برابر با ۲۵ واحد خواهد بود. اکنون چالش اصلی این است که این ۲۵ واحد سود مازاد چگونه میان سه بهره‌بردار تقسیم شود تا همگی به همکاری راغب باشند. تئوری ارزش شپلی با محاسبه سهم حاشیه‌ای هر بهره‌بردار در تمام ائتلاف‌های ممکن (در این مثال ۷ ائتلاف)، وزن هر کدام را در ایجاد سود کل مشخص کرده و سود را به صورت عادلانه توزیع می‌کند. نتیجه نهایی به عنوان مثال بدین صورت خواهد بود که بهره‌بردار A مجموعاً ۳۶ واحد، B برابر ۳۳ واحد و C معادل ۳۱ واحد درآمد کسب می‌کنند (جمع کل = ۱۰۰ واحد). همان‌طور که مشاهده می‌شود، درآمد نهایی همه بهره‌برداران بیش از درآمد فعلی آن‌هاست، که این امر انگیزه قوی برای مشارکت در ائتلاف همکاری را ایجاد کرده و اطمینان می‌دهد که هیچ‌یک از بهره‌برداران متضرر نخواهند شد.

جدول (۵) تعداد حالت مختلف ائتلاف را در مسئله توزیع آب در دشت قزوین متشکل از ۱۱ بهره‌بردار نشان می‌دهد. الگوریتم ژنتیک ۲۰۴۷ بار با تعداد مختلف متغیر (بازیکن) اجرا می‌گردد. با توجه به بالا بودن تعداد اجرا و محاسبات از ابر کامپیوتر (سیستم محاسباتی پر قدرت دارای پردازنده چند هسته‌ای و حافظه بالا) استفاده شده است.

جدول ۵. تعداد ائتلاف در مدل ۳

تعداد بازیکنان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
تعداد ائتلاف	۱۱	۵۵	۱۶۵	۳۳۰	۴۶۲	۴۶۲	۳۳۰	۱۶۵	۵۵	۱۱	۱



شکل ۳. فلوچارت تئوری شپلی

لازم به ذکر است که تئوری شپلی، «آب» را بین بهره‌برداران قسمت نمی‌کند، بلکه «سود» حاصل از بهینه‌سازی (فارغ از این که بهینه‌سازی به چه روشی صورت گرفته است) را بین بهره‌برداران بر اساس وزن و قدرت هر یک از آن‌ها، برای راغب شدن بهره‌برداران به شرکت در امر بهینه‌سازی و بالا رفتن مجموع سود حاصل از یک بازی همکارانه تقسیم می‌کند. به عبارت دیگر مدل شپلی وظیفه‌ی «بازتوزیع سود» را بر عهده دارد.

یافته‌های پژوهشی

بررسی نتایج حاصل از مدل وضعیت کنونی (مدل ۱)

این مدل همان مدل تخصیص آب در شرایط فعلی است و طبق آخرین آمار در سال زراعی ۹۵ - ۹۴ درآمد به دست آمده در شبکه محاسبه گردیده است. سود خالص حاصل از محصولات تولید شده در شبکه در شرایط پتانسیل به تفکیک کانال درجه دو در جدول (۶) ارائه شده است. درآمد شبکه در این مدل حدود ۸/۹۰۲ میلیون دلار است.

جدول ۶. سود خالص حاصل از فروش محصولات شبکه در وضعیت کنونی (میلیون دلار)

کانال	L1	L2	L3	L4	L4A	L5	L6	L7	M2	L8	MW
درآمد خالص	۰/۴۶۷	۰/۷۴۱	۲/۵۰۴	۰/۵۸۸	۰/۴۴۳	۰/۵۶۱	۱/۰۶	۰/۶۰۹	۰/۳۹۹	۰/۹۷	۰/۵۹



مقدار انحراف معیار سود کانال‌ها برابر با $0/5708$ و ضریب جینی معادل $0/303$ است که نشان‌دهنده‌ی پراکندگی نسبتاً محدود سود میان بهره‌برداران و توزیع درآمد با نابرابری متوسط در شرایط فعلی شبکه است.

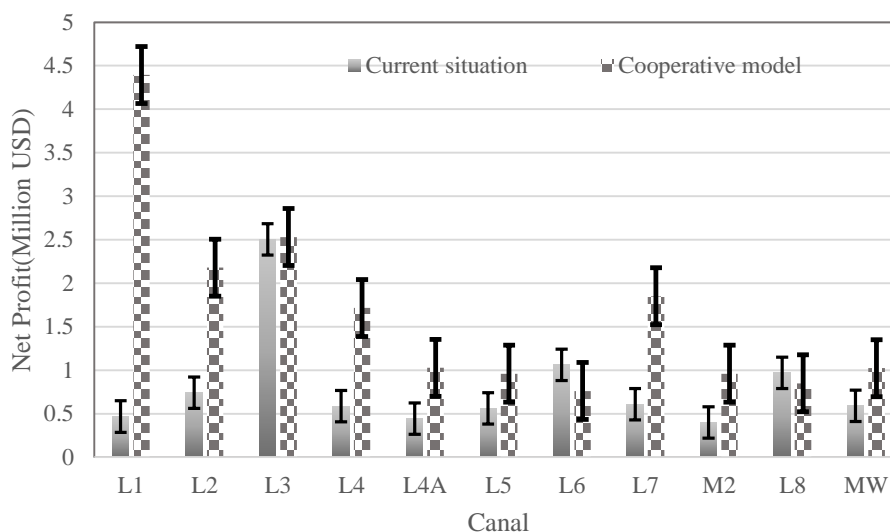
بررسی نتایج حاصل از مدل همکاری

همان‌گونه که در بخش قبل توضیح داده شد، هدف از این مدل، بیشینه‌سازی درآمد کل بهره‌برداران با فرض وجود ۱۳۲ متغیر (اعم از ۱۱ کانال در مدت ۱۲ ماه) و تخصیص آب با توجه به نیاز آبی در سطوح زیر کشت هر کانال و صرفاً با تغییر در توزیع آب میان بهره‌برداران است. مقدار آب سالانه‌ی مدل ۲ برابر ۱۲۲ میلیون مترمکعب است. در این مدل با فرض ثابت در نظر گرفتن مقادیر آب شبکه در هر ماه اقدام به توزیع بهینه آبی بین کانال‌های درجه ۲ شده است. مدل بهینه‌سازی GA با تابع هدف رابطه (۴) و با فرض پارامترهای جمعیت اولیه برابر ۱۰۰ عضو، روش انتخاب اعضا بر مبنای روش Tournament، نرخ ازدواج برابر $0/8$ و نرخ جهش برابر $0/05$ در نرم افزار MATLAB اجرا شد. سود حاصل از پیاده‌سازی مدل ۲ در جدول (۷)، به تفکیک هر کانال درجه دو و نیز سود کل ارائه شده است.

جدول ۷. سود خالص حاصل از فروش محصولات شبکه در مدل همکاری (میلیون دلار)

کانال	L1	L2	L3	L4	L4A	L5	L6	L7	M2	L8	MW
درآمد خالص	۴/۳۹	۲/۱۷	۲/۵۳	۱/۷۲	۱/۰۳	۰/۹۶	۰/۷۶	۱/۸۵	۰/۹۶	۰/۸۵	۱/۰۳
درآمد کل شبکه (میلیون دلار)	۱۸/۲۳۳										

مجموع سود در این مدل حدود ۱۸/۲۳۳ میلیون دلار برآورد شده است که نسبت به مدل ۱، افزایش چشم‌گیر ۱۰۴ درصدی را تجربه کرده است. اگرچه اجرای مدل همکاری منجر به افزایش بیش از ۱۰۰ درصدی سود کل شبکه شده است، اما افزایش انحراف معیار سود کانال‌ها از $0/599$ در مدل ۱ به $1/084$ در مدل ۲ و همچنین افزایش ضریب جینی از $0/303$ به $0/309$ نشان می‌دهد که این بهبود اقتصادی با تشدید نابرابری توزیع سود میان بهره‌برداران همراه بوده است. در شکل (۴)، به‌منظور نمایش نوسانات سود کانال‌ها، از خط‌های اطمینان مبتنی بر انحراف معیار استاندارد استفاده شده است که نشان می‌دهد با وجود افزایش قابل‌توجه سود در مدل همکاری، میزان پراکندگی منافع میان بهره‌برداران افزایش یافته است.



شکل ۴. مقایسه سود حاصل از مدل ۱ و مدل ۲ به تفکیک هر کانال درجه دو

همان‌طور که از نمودار شکل (۴) مشاهده می‌شود، باوجود اینکه سود کل بیش از ۱۰۴ درصد افزایش داشته است لکن این افزایش سود به‌صورت نامتقارن بین بهره‌برداران تقسیم شده است. در نتیجه بعضی از بهره‌برداران سودشان بیشتر و برخی دیگر سودشان کمتر شده است. به‌عنوان مثال می‌شود به کانال L1 اشاره نمود که سودش بیش از ۹ برابر شده است درحالی‌که کانال L3 تغییر چندانی نداشته است

و حتی کانال‌های L6 و L8 با کاهش سود مواجه شده‌اند. به عبارت دیگر در مدل ۲ تمامی بهره‌برداران، به جز L6 و L8، سودی بیشتر از مدل ۱، به دست آورده‌اند. پس باید شرایطی فراهم شود که این دو بهره‌بردار نیز از آن منتفع گردند و به حالت همکاریانه رضایت دهند. به این منظور در مدل سوم با استفاده از نظریه بازی‌های شپلی به باز تخصیص سود حاصل از این ائتلاف پرداخته شده است.

بررسی نتایج حاصل از مدل رفع ائتلاف شپلی

در این مدل به جهت بیشینه‌سازی درآمد کل بهره‌برداران، سود به دست آمده از ائتلاف کانال‌ها با استفاده از ارزش شپلی بین بهره‌برداران توزیع می‌گردد. مقادیر سود حاصل از بهره‌برداری هر یک از کانال‌ها حدود ۱۸/۲۳۳ میلیون دلار است (جدول ۸). نتایج مدل رفع ائتلاف شپلی نشان می‌دهد که بازتوزیع سود بدون کاهش درآمد کل شبکه، موجب کاهش انحراف معیار سود کانال‌ها به ۰/۷۸۵ و کاهش ضریب جینی به ۰/۲۴۹ شده است که بیانگر بهبود قابل توجه عدالت توزیعی و افزایش پایداری ائتلاف همکاریانه است.

جدول ۸. سود تعلق گرفته به هر کانال با استفاده از ارزش شپلی

کانال	L1	L2	L3	L4	L4A	L5	L6	L7	M2	L8	MW
درآمد خالص	۲/۹۱۸	۱/۶۶۳	۳/۰۷۴	۱/۳۹۵	۰/۹۱۶	۰/۹۶۹	۱/۶۸۳	۱/۳۲۰	۰/۸۰۳	۲/۱۶۱	۱/۳۲۷
درآمد کل شبکه (میلیون دلار)	۱۸/۲۳۳										

بحث

مقایسه نتایج سه مدل

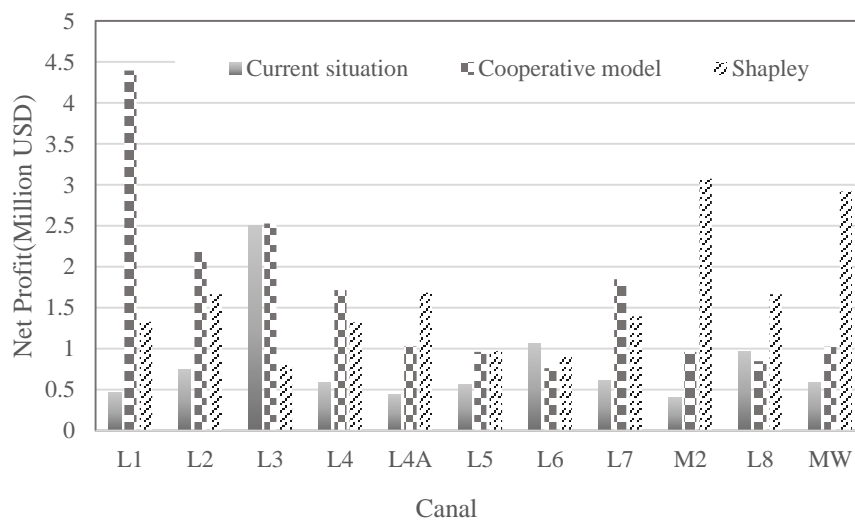
همان‌طور که در نمودارهای (۵) و (۶) و جداول (۶) تا (۸) مشاهده می‌شود، به کارگیری الگوریتم ژنتیک در مدل همکاریانه منجر به افزایش قابل توجه سود کل شبکه نسبت به وضعیت کنونی شده است. با این حال، این افزایش سود در مدل ۲ به صورت نامتوازن میان بهره‌برداران توزیع شده و برخی کانال‌ها نظیر L6 و L8 کاهش سود را تجربه کرده‌اند، در حالی که کانال‌هایی مانند L1 افزایش بسیار بالایی داشته‌اند. این عدم تقارن در توزیع منافع، پتانسیل بروز تعارض و عدم پذیرش راهکار بهینه‌سازی را در سطح بهره‌برداران افزایش می‌دهد. در مدل ۳، با اعمال بازتخصیص سود مبتنی بر ارزش شپلی، اگرچه مقدار سود کل شبکه نسبت به مدل ۲ تغییری نکرده است، اما توزیع منافع میان بهره‌برداران متعادل‌تر شده و هیچ‌یک از کانال‌ها نسبت به وضعیت کنونی دچار کاهش سود نشده‌اند. مقایسه مدل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که مدل شپلی، با کاهش شکاف سود میان بهره‌برداران، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تعارضات و افزایش قابلیت اجرای سیاست‌های بازتخصیص آب ایفا کند.

نتایج همچنین حاکی از آن است که در حالی که برخی بهره‌برداران در مدل ۲ سود بیشتری کسب می‌کنند، مدل ۳ با اولویت دادن به عدالت توزیعی، ترجیح‌پذیری اجتماعی بالاتری دارد و می‌تواند به عنوان مکملی کارآمد برای مدل‌های بهینه‌سازی صرف در مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

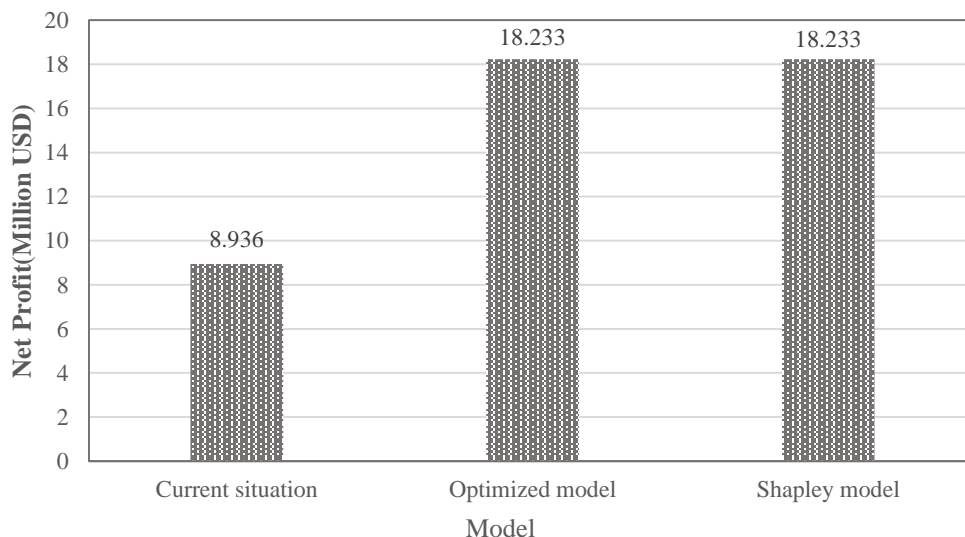
مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که استفاده از رویکردهای بهینه‌سازی و نظریه بازی‌ها می‌تواند به بهبود تخصیص آب و افزایش منافع کشاورزان منجر شود. به عنوان نمونه، (Bulukazari et al., 2022) با بهره‌گیری از مدل بهینه‌سازی غیرخطی و مدل AquaCrop در دشت قزوین گزارش کردند که در شرایط کم‌آبی و شوری، امکان ارتقای بهره‌وری آب و افزایش درآمد خالص وجود دارد، به طوری که نتایج آن‌ها بیانگر افزایش سود اقتصادی در حدود ۱۵ تا ۲۰٪ در سناریوهای مختلف است. با این حال، در پژوهش مذکور سازوکار همکاری و بازتوزیع منافع میان بهره‌برداران لحاظ نشده و مسئله تعارض بالقوه میان ذی‌نفعان مورد توجه قرار نگرفته است. در مقابل، مدل حاضر با تلفیق الگوریتم ژنتیک و ارزش شپلی، علاوه بر افزایش بیش از ۱۰۴ درصدی سود کل شبکه، توانسته است تعارض میان بهره‌برداران را به‌طور کامل برطرف کرده و مشارکت همگانی را تضمین نماید.

به علاوه یافته‌های این تحقیق با نتایج (Imani et al., 2023) همسو است که در آن پایداری تخصیص منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل ردپای آب و سیاست عادلانه مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه تمرکز مطالعه مذکور بر ابعاد زیست‌محیطی و پایداری بوده و افزایش منافع اقتصادی به صورت غیرمستقیم گزارش شده است، اما عدالت را صرفاً بر پایه برابری فیزیکی منابع (آب به

ازای هکتار) تعریف می‌کند، مدل حاضر عدالت را بر مبنای مشارکت هر بهره‌بردار در ایجاد ارزش افزوده اقتصادی در نظر می‌گیرد که از منظر مقبولیت اجرایی و پذیرش ذی‌نفعان اهمیت بیشتری دارد. در مطالعه (Mirzaei-Nodoushan et al., 2022) الگوهای همکاری غیرهمکارانه منجر به تغییر سهم کشورها در تخصیص آب رودخانه هریرود (در بازه ۲۰ تا ۴۲ درصد) شدند، درحالی‌که پژوهش حاضر نشان می‌دهد به‌کارگیری تلفیق الگوریتم ژنتیک و ارزش شپلی در مقیاس شبکه آبیاری دشت قزوین، امکان بهبود هم‌زمان کارایی اقتصادی و عدالت توزیعی میان بهره‌برداران محلی را فراهم می‌کند. مطالعه (Fisvold & Caswell, 2000) نشان داده است که کاربرد نظریه بازی در مدیریت آب‌های فرامرزی می‌تواند چارچوبی برای طراحی نهادهای همکاری و کاهش تعارض میان کشورها فراهم آورد، در حالی که در پژوهش حاضر، این رویکرد تحلیلی در سطح شبکه‌های آبیاری محلی به‌کار رفته و سازوکار بازتوزیع سود (ارزش شپلی) را برای بهبود عدالت و مشارکت بهره‌برداران کشاورزی فراهم کرده است. مطالعه (Zhang et al., 2024) عمدتاً بر تحلیل اتحادهای همکارانه و سازوکارهای توزیع منافع در سطح حوضه آبریز متمرکز بوده و بازتخصیص آب و رفتار بهره‌برداران کشاورزی در مقیاس مزرعه را به‌صورت مستقیم مدل‌سازی نکرده است.



شکل ۵. مقایسه سود حاصل از مدل‌های ۱ و ۲ و ۳ به تفکیک هر بخش



شکل ۶. مقایسه سود کلی مدل‌ها ۱، ۲ و ۳

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این تحقیق شرایط توزیع آب در شبکه آبیاری قزوین مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا سود حاصل از تخصیص کنونی آب بین کانال‌های درجه دو تعیین گردید. در ادامه با فرض یکپارچه بودن کل شبکه، باز تخصیص بهینه توزیع کنونی آب تخصیص‌یافته از سد طالقان در

همان سال به مقدار ۱۲۲ میلیون مترمکعب بین ۱۱ کانال درجه دو با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه شد. نتایج نشان داد که سود کل شبکه در این حالت برابر با ۸/۹۰۲ میلیون دلار است. در مرحله دوم، با فرض یکپارچه بودن کل شبکه و عدم وجود تعارض میان بهره‌برداران، باز تخصیص بهینه‌ای از همان مقدار کل آب (۱۲۲ میلیون مترمکعب) با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. نتایج این مرحله نشان داد که سود کل شبکه به ۱۸/۲۳۳ میلیون دلار افزایش می‌یابد.

از آنجاکه بهره‌بردارانی که نسبت به شرایط فعلی خود سود کمتری دریافت کنند، احتمال دارد حاضر به همکاری در باز تخصیص نباشند، در گام سوم از تئوری بازی همکارانه شپلی برای متقاعد ساختن تمامی بهره‌برداران جهت مشارکت در ائتلاف استفاده شد. به کارگیری ارزش شپلی به عنوان یک سازوکار باز توزیع سود، امکان هم‌زمان دستیابی به کارایی اقتصادی و عدالت توزیعی را فراهم کرد و موجب شد هیچ‌یک از بهره‌برداران نسبت به وضعیت پایه دچار کاهش سود نشوند. این ویژگی، نقش مهمی در افزایش مقبولیت اجتماعی و کاهش تعارض میان ذی‌نفعان ایفا می‌کند و نشان می‌دهد که تلفیق روش‌های بهینه‌سازی با ابزارهای نظریه بازی می‌تواند راهکاری عملی برای مدیریت مشارکتی منابع آب کشاورزی باشد.

چارچوب پیشنهادی این پژوهش به دلیل انعطاف‌پذیری در تعریف ذی‌نفعان، محدودیت‌های منابع و ساختار شبکه، قابلیت کاربرد در سایر دشت‌های کشور با شرایط مشابه، به‌ویژه دشت‌های دارای تنش آبی و اضافه‌برداشت از منابع آب زیرزمینی، را داراست. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، اثر عدم قطعیت‌های اقلیمی، تغییرات تقاضای آب و سیاست‌های اقتصادی بر نتایج این چارچوب مورد بررسی قرار گیرد تا زمینه برای تعمیم آن در مقیاس‌های بزرگ‌تر فراهم شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

محمد هاشم صرافها: گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج

شیدا کاکوند: نگارش اولیه و بازبینی مقاله

معصومه السادات هاشمی: بررسی و کنترل نتایج، نگارش مقاله

حامد مازندرانی زاده، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در تهیه این اثر از هوش مصنوعی استفاده نکرده‌اند و مسئولیت کامل محتوای منتشر شده را بر عهده می‌گیرند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

حسینی، سیده مرضیه و مازندرانی زاده، حامد. (۱۴۰۴). بررسی تابع تقاضا معکوس و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی قیمت محصولات زراعی



- (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). علوم و مهندسی آبیاری، ۴۸(۲)، ۳۵-۴۷.
- عابدی، سمانه. (۱۳۹۹). حکمروایی آب و ارزیابی آثار آن بر تأمین امنیت آب و غذا. فصلنامه آب و توسعه پایدار، ۱(۱۷)، ۱-۱۲.
- عبدالمنافی جهرمی، نرجس السادات، و اسدی، مراد. (۱۴۰۳). بررسی و تحلیل شاخص های کلان بخش آب در سه ماهه پایانی سال ۱۴۰۲ (گزارش فصلی ۴). ماهنامه گزارش های کارشناسی مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی، ۳۳(۳)، ۱۹۸۴۱.
- فخار، محدثه السادات و کاویانی، عباس. (۱۴۰۲). ارزیابی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب بر اساس پایگاه داده WaPOR فائو در دشت قزوین. آب و خاک، ۳۷(۳)، ۴۸۷-۵۰۲.
- کاکاوند، شیدا؛ مازندرانی زاده، حامد و رمضان‌اعتدالی، هادی (۱۴۰۲). بازتخصیص بهینه ی آب در میان مصرف‌کنندگان بخش کشاورزی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی چندهدفه ژنتیک- فازی با هدف افزایش درآمد و عدالت در توزیع (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). علوم و مهندسی آبیاری، ۴۶(۱)، ۷۷-۹۳.
- مازندرانی زاده، حامد و حسینی، سیده مرضیه (۱۴۰۱). ارزیابی اثر پیش‌بینی قیمت محصولات کشاورزی بر کاهش افت تراز آب زیرزمینی با روش پویایی سیستم‌ها. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۱۱)، ۲۵۶۵-۲۵۸۲.
- مازندرانی زاده، حامد و حسینی، سیده مرضیه (۱۴۰۴). بررسی بازده اقتصادی توزیع آب بر مبنای قیمت تمام شده آب در بخش کشاورزی با استفاده از اصلاح الگوی کشت (مطالعه موردی: شبکه آبیاری دشت قزوین). علوم و مهندسی آبیاری، ۴۸(۱)، ۳۹-۵۷.

REFERENCES

- Abdolmanafi Jahromi, N. & Asadi, M. (2024). Review and analysis of macro indicators of the water sector in the last quarter of 1402 (Quarterly Report 4). Monthly magazine of expert reports of the Islamic Consultative Assembly Research Center. 32(1), e19700 doi: 10.22034/report.2024.16749.1698. (In Persian).
- Abed-Elmdoust, A., Kerachian, R., & Ziari, S. (2016). Evaluating the Relative Power of Water Users in Inter-Basin Water Transfer Systems. *Water Resources Management*, 30(11), 3863–3885. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1407-1>
- Abedi, S. (2020). Water Governance and Evaluation of its Impacts on Water and Food Security, *Journal of Water and Sustainable Development*, 7(1), 1-12. (In Persian).
- Banihashemi, S., Eslamian, S. S., & Nazari, B. (2021). Prediction of Local Alterations in the Relative Amounts of Temperature and Precipitation Caused by Climate Change in Near and Far Future, and Drought Investigation Using SPI and SPEI Indices in Qazvin Plain, Iran. *Journal of Hydrology and Soil Science*, 25(2), 25–44. <https://www.magiran.com/paper/2328026> LK - <https://www.magiran.com/paper/2328026>
- Bi, F., Zhou, H., Zhu, M., & Wang, W. (2022). Economic benefit evaluation of water resources allocation in transboundary basins based on particle swarm optimization algorithm and cooperative game model—A case study of Lancang-Mekong River Basin. *PLOS ONE*, 17(7), e0265350-. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265350>
- Boyd, N. T., Gabriel, S. A., Rest, G., & Dumm, T. (2023). Generalized Nash equilibrium models for asymmetric, non-cooperative games on line graphs: Application to water resource systems. *Computers & Operations Research*, 154, 106194. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cor.2023.106194>
- Bulukazari, S., Babazadeh, H., Ebrahimipak, N., Mousavi-Jahromi, S.-H., & Ramezani Etedali, H. (2022). Optimization of water and land allocation in salinity and deficit- irrigation conditions at farm level in Qazvin plain. *PLOS ONE*, 17(7), e0269663. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0269663>
- Dastjerdi, S. Z., Sharifi, E., Rahbar, R., & Saghafian, B. (2022). Downscaling WGHM-Based Groundwater Storage Using Random Forest Method: A Regional Study over Qazvin Plain, Iran. *Hydrology*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/hydrology9100179>
- Degefu, D. M., He, W., Yuan, L., & Zhao, J. H. (2016). Water Allocation in Transboundary River Basins under Water Scarcity: a Cooperative Bargaining Approach. *Water Resources Management*, 30(12), 4451–4466. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1431-6>
- Dinar, A., & Howitt, R. E. (1997). Mechanisms for allocation of environmental control cost: empirical tests of acceptability and stability. *Environmental Management*, 49(2), 183–203.
- Fakhar, M. S., & Kaviani, A. (2022). Evaluation of FAO Wapor Product and PYSEBAL Algorithm in Estimating the Amount of Water Consumed. *Soil and Water Research*, 37(3), 487–502. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81695.1267>. (In Persian).
- FAO. 2014. Water Governance for Agriculture and Food Security, a FAO initiative to minimize its environmental impact and promote greener communications. Other documents can be consulted at www.fao.org.

- Fisvold, G. B., & Caswell, M. F. (2000). Transboundary water management: game theoretic lessons for projects on the US–Mexico border. *Journal of Agricultural Economics* 24, 101–111.
- Fu, J., Zhong, P., Xu, B., Zhu, F., Chen, J., & Li, J. (2021). Comparison of Transboundary Water Resources Allocation Models Based on Game Theory and Multi-Objective Optimization. *Water*, 13, 1421. <https://doi.org/10.3390/w13101421>
- Ghaffari Moghadam, Z., Moradi, E., Hashemi Tabar, M., & Sardar Shahraki, A. (2023). Developing a Bi-level programming model for water allocation based on Nerlove's supply response theory and water market. *Environment, Development and Sustainability*, 25(6), 5663–5689. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02658-z>
- Hashemi, S. R., Tabesh, M., & Ataekia, B. (2024). Multi-objective optimization of water distribution systems using game theory and genetic algorithms. *Water Resources Planning and Management*, 150(3). <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5842>
- Hashemi, V., Taleai, M., & Abolhasani, S. (2024). Enhancing agricultural land valuation in land consolidation projects through cooperative game theory and genetic algorithm optimization. *Habitat International*, 152, 103157. <https://doi.org/10.1016/J.HABITATINT.2024.103157>
- Hemati, H., & Abrishamchi, A. (2020). Water allocation using game theory under climate change impact (case study: Zarinerood). *Journal of Water and Climate Change*, 12(3), 759–771. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.153>
- Hosseini, S. M. and Mazandarani Zadeh, H. (2025). Comparison of the ability of inverse demand function and artificial neural network to predict crop prices (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network). *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(2), 35-47. doi: 10.22055/jise.2024.45614.2109. (In Persian).
- Imani, S., Niksokhan, M. H., Delavar, M., & Safari Shali, R. (2023). Water allocation sustainability assessment in climate change: a modeling approach using water footprint and just policy. *Journal of Water and Climate Change*, 14(11), 4261–4272. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.534>.
- Jahromi, N. S., & Asadi, M. (2024). Review and Analysis of Macroeconomic Indicators of the Water Sector in the Final Quarter of 1402 (Fourth Quarterly Report). *Monthly Expert Reports of the Research Center of the Islamic Consultative Assembly*. (In Persian).
- Janjua, S., An-Vo, D.-A., Reardon-Smith, K., & Mushtaq, S. (2025). A Three-stage Cooperative Game Model for Water Resource Allocation Under Scarcity Using Bankruptcy Rules, Nash Bargaining Solution and TOPSIS. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04123-8>.
- Kakavand, S., Mazandarani zadeh, H. and Ramezani Etedali, H. (2023). Optimal Redistribution of Water among Agricultural Sector Operators Using a Fuzzy Multi-objective Optimization Model. *Irrigation Sciences and Engineering*, 46(1), 77-93. doi: 10.22055/jise.2021.37122.1966. (In Persian).
- Kayhomayoon, Z., Milan, S. G., Arya Azar, N., Bettinger, P., Babaian, F., & Jaafari, A. (2022). A Simulation-Optimization Modeling Approach for Conjunctive Water Use Management in a Semi-Arid Region of Iran. In *Sustainability* (Vol. 14, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/su14052691>
- Khorshidi, M. S., Nikoo, M. R., Al-Rawas, G., Bahrami, N., Al-Wardy, M., Talebbeydokhti, N., & Gandomi, A. H. (2024). Integrating agent-based modeling and game theory for optimal water resource allocation within complex hierarchical systems. *Journal of Cleaner Production*, 482, 144164. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.144164>
- Madani, K. (2010). Game theory and water resources. *Journal of Hydrology*, 381(3), 225–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.045>
- Mazandarani zadeh, hamed, & Hoseini, M. (2023). Investigating the effect of agricultural product price forecasting on groundwater level using systems dynamics, in order to simultaneously maintain the welfare of farmers and groundwater resources. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(11), 2565–2582. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.345131.669305>. (In Persian).
- Mazandarani zadeh, H. and Hosseini, S. M. (2025). Assessing the Economic Efficiency of Water Distribution in the Agricultural Sector through Crop Pattern Modification (Case Study: Qazvin Plain Irrigation Network). *Irrigation Sciences and Engineering*, 48(1), 39-57. doi: 10.22055/jise.2023.43268.2061. (In Persian).
- Mehrpavar, Milad, Ahmadi, Azadeh, & Safavi, Hamid Reza. (2019). Resolving water allocation conflicts using WEAP simulation model and non-cooperative game theory. *SIMULATION*, 96(1), 17–30. <https://doi.org/10.1177/0037549719844827>
- Mirzaei-Nodoushan, F., Bozorg-Haddad, O., & Loáiciga, H. A. (2022). Evaluation of cooperative and non-cooperative game theoretic approaches for water allocation of transboundary rivers. *Scientific Reports*, 12(1), 3991. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07971-1>



- Moghaddam, H. K., Javadi, S., Randhir, T. O., & Kavehkar, N. (2022). A Multi-Indicator, Non-Cooperative Game Model to Resolve Conflicts for Aquifer Restoration. *Water Resources Management*, 36(14), 5521–5543. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03310-1>
- Parrachino, I., Dinar, A., & Patrone, F. (2006). Cooperative game theory and its application to natural, environmental, and water resource issues: 3. Application to water resources. In *World Bank Policy Research Working Paper* (Issue 4074).
- Rashidi, M., Talebi, A., Raeisi, A., & Dezfoulian, M. (2022). Application of cooperative game theory in transboundary groundwater resources management. *Water and Land Development*, 54, 99–108. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.141552>
- Rashidi, M., Zarghami, M., Pishbahar, E., & Fallahi, F. (2022). Assessing coalition in meeting environmental flow based on Shapley value and nash equilibrium: case study Aras River. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(7), 6521–6530. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03855-5>
- Sadegh, M., Mahjouri, N., & Kerachian, R. (2010). Optimal Inter-Basin Water Allocation Using Crisp and Fuzzy Shapley Games. *Water Resources Management*, 24(10), 2291–2310. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9552-9>
- Sechi, G. M., & Zucca, R. (2015). Water Costs Allocation in Complex Systems Using a Cooperative Game Theory Approach. *Water Resources Management*, 29(6), 1781–1796. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0910-8>
- Shapley, L. S. (1953). A Value for n-Person Games. In *Contributions to the Theory of Games* (pp. 307–317). Princeton University Press.
- Shokoohi, A., Ramezani Etedali, H., Mojtavavi, S. A., & Singh, V. P. (2016). Using Water Footprint Accounting for Optimizing Crop Patterns Respecting Sustainable Development (Case Study: Qazvin Plain). *Iran-Water Resources Research*, 12(3), 99–113. https://www.iwrr.ir/article_32628.html
- Taha, Z., Abdullah, A., & Rashid, T. (2024). Optimizing Feature Selection with Genetic Algorithms: A Review of Methods and Applications. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.14563>
- Tharwat, A., Sabry, M. M., & El-Khodary, I. (2024). A Cooperative Game Approach for Solving Water Resources Allocation Problem BT - ICT for Engineering & Critical Infrastructures (A. Salman & A. Tharwat (eds.); pp. 23–31). Springer Nature Switzerland.
- Wanniarachchi, S., & Sarukkalige, R. (2022). A Review on Evapotranspiration Estimation in Agricultural Water Management: Past, Present, and Future. *Hydrology*, 9(7), 1–12. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070123>
- Wu, X., & Whittington, D. (2006). Incentive compatibility and conflict resolution in international river basins: A case study of the Nile Basin. *Water Resources Research*, 42(2). <https://doi.org/10.1029/2005WR004238>
- Yoosefdoost, I., Abrão, T., & Santos, M. J. (2021). Water Resource Management Aided by Game Theory. In O. Bozorg-Haddad (Ed.), *Essential Tools for Water Resources Analysis, Planning, and Management* (pp. 217–262). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4295-8_9
- Yoosefdoost, I., Khashei-Siuki, A., Tabari, H., & Mohammadrezapour, O. (2021). Runoff simulation under climate change conditions by using of hybrid bat-based support vector machine neural network. *Hydrological Sciences Journal*, 66(3), 412–427. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1873343>
- Zhang, K., Lu, H., & Wang, B. (2024). Benefit Distribution Mechanism of a Cooperative Alliance for Basin Water Resources from the Perspective of Cooperative Game Theory. *Sustainability*, 16, 6729. <https://doi.org/10.3390/su16166729>
- Zheng, H., Wang, Z., Hu, S., & Wei, Y. (2022). A comparative study of the performance of bankruptcy methods for water allocation in river systems. *Water Resources Management*, 36(4), 1391–1409. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03087-3>
- Zheng, Y., Sang, X., Liu, Z., Zhang, S., & Liu, P. (2022). Water Allocation Management Under Scarcity: a Bankruptcy Approach. *Water Resources Management*, 36(9), 2891–2912. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03098-0>