Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

(OPEN ACCESS)

Applying Reinforcement Learning- Cooperative Game Theory (CGT-RL) in the fair distribution of profits from cooperation among basin stakeholders

Shahin Salimpour Naghani[1], Seyed Arman Hashemi Monfared[*2], Abbasali Ghaderi[3], Mehdi Azhdary Moghaddam[4], Soroush Abolfathi[5]

1. Ph.D. Student of Water Resources Management, Dept. of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: shahin.salimpour@pgs.usb.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: hashemi@eng.usb.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: ghaderi@eng.usb.ac.ir
4. Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran. E-mail: mazhdary@eng.usb.ac.ir
5. Associate Prof., School of Engineering, University of Warwick, Coventry, United Kingdom. E-mail: soroush.abolfathi@warwick.ac.uk

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 05.27.2025
Revised: 08.25.2025
Accepted: 12.14.2025

Keywords:
Nash-Harsani,
North Karoon Basin,
Nucleolus,
Q-Learning algorithm,
Shapley value,
Zayandehrood Basin

ABSTRACT

Background and Objectives: In basins with diverse stakeholders, ensuring the equitable distribution of water resources and the benefits derived from them is a fundamental aspect of integrated water resources management. This issue becomes more complex when one party, despite being the primary resource of the basin, is less developed than the other due to inequality in wealth distribution. In such cases, achieving an equitable distribution of benefits among stakeholders is crucial, especially when the parties have the potential for sustainable cooperation, which can lead to greater collective benefits. Cooperative game theory (CGT) provides a suitable framework to address the equitable allocation of benefits in such competitive environments. However, determining the values of benefits in the objective function, considering different coalitions of stakeholders, can be very challenging. Reinforcement learning (RL) provides a valuable tool to determine the benefits of various levels of cooperation, including full cooperation, partial cooperation, and non-cooperation among stakeholders. This study utilizes a Cooperative Game Theory-Reinforcement Learning (CGT-RL) approach to examine two adjacent watersheds, the North Karoon and Zayandeh Rood. The three stakeholder provinces in these two basins, namely Chaharmahal Bakhtiari (CHB), Esfahan (ESF), and Khuzestan (KHZ), have disagreements about water allocation and the fair and efficient distribution of benefits from its use, which have increased in the past few years. In this paper, the CGT-RL method is used for the first time to address this real-world challenge in a large water system. This study aims to use the aforementioned framework to fairly and efficiently distribute benefits (revenue) from water use in the case of a grand coalition and full cooperation among these three stakeholders. The proposed framework combines RL and CGT to address two major weaknesses of the approaches prevalent in previous research on maximizing and distributing benefits in multi-stakeholder water resource

systems. The first weakness of the application of conventional optimization methods is the maximization of the total system benefit regardless of how it is distributed among the stakeholders. These methods assume that there is full cooperation among stakeholders and ignore the dynamics of individual decision-making and the benefits of each of them. CGT solutions can provide strong incentives for individual decision-makers and facilitate cooperation to achieve the optimal solution. However, obtaining the information required to use them is very challenging and computationally complex. This leads to the second weakness of the applications of game theory in previous water resources studies, which made simplifying assumptions about the benefits achievable by the parties under different levels of cooperation. Overall, the goal of the present study is to empower various stakeholders by creating cooperation (collective rationality) through considering greater individual benefits (individual rationality).

Materials and Methods: Based on the CGT-RL method, first, the benefits achievable under each possible coalition, including the grand coalition (full cooperation), small coalitions (partial cooperation), and single coalitions (non-cooperation), are obtained by applying the Q-Learning algorithm. In the second step, CGT solutions, including Nash-Harsanyi bargaining, Shapley value, and Nucleolus, are used to fairly distribute the benefits resulting from full cooperation among stakeholders, considering various concepts of fairness. The stakeholders (players) include the provinces of ESF, CHB, and KHZ. Their different levels of cooperation include full cooperation, partial cooperation, and non-cooperation. In full cooperation, the system is managed by a single agent that tries to optimize the objective function. In partial cooperation, the system is a two-agent system, where one agent is responsible for the coalition of two provinces, and the other is responsible for optimizing the objective function for the non-cooperating province (single province). In non-cooperation, the system has three agents, each of which is separately responsible for a province, and each agent tries to maximize the objective function for the province that it is in charge of. The objective function is a linear function including the amount of water withdrawal from rivers by each province and the average monthly revenue of the provinces per unit of water consumed. The input data for optimization include the average monthly revenue of each province per cubic meter of water withdrawal (million Rials/m^3), the volume of monthly water withdrawal by the provinces (MCM), the average volume of river discharge in each province (MCM), and the maximum and minimum values of annual water withdrawal and storage by each province (MCM).

Results: The research findings indicate that, in the case of full cooperation among stakeholders (i.e., establishing a grand coalition), the benefits for both parties increase compared to other levels of cooperation. In the case of non-cooperation, that is, with the continuation of the Status quo, the share of each province from the benefits derived from the withdrawal and use of the North Karoon and Zayandeh Rood rivers (average total annual revenue) is estimated to be 478765.72 billion rials for Esfahan, 421791.33 billion rials for Khuzestan, and 156881.39 billion rials for Chaharmahal Bakhtiari. In the case of full cooperation among all beneficiary provinces, the annual revenues calculated using the optimization method (Q-Learning algorithm) for Esfahan, Khuzestan, and Chaharmahal Bakhtiari provinces increase to 1641776.17 billion rials, 503201.94 billion rials, and 179054.8 billion rials,

respectively. These values are 54% higher than the non-cooperation case and about 30-40% higher than the partial cooperation case (small coalitions). The redistribution of revenue from full cooperation among stakeholders based on the Nash-Harsanyi bargaining for the three provinces of Isfahan, Khuzestan, and Chaharmahal Bakhtiari is 900963.88, 843989.49, and 579079.55 billion rials, respectively. Based on the Shapley value method, these values for the three provinces of Isfahan, Khuzestan, and Chaharmahal Bakhtiari are 1006962.48, 798112.57, and 518957.86 billion rials, respectively. In the nucleolus method, the revenue distributed among the three provinces of Isfahan, Chaharmahal Bakhtiari, and Khuzestan is 886626.26, 847094.96, and 590311.69 billion rials per year, respectively. Esfahan has the highest revenue share of redistribution at approximately 38-43%, thanks to its industrialized and developed status. Chaharmahal Bakhtiari achieves about 8% revenue through RL optimization, increasing to 22-25% with CGT. The revenue share of Khuzestan under full cooperation is about 22%, rising to around 34-36% using CGT.

Conclusion: The results indicate that, with the computational capabilities of the Q-Learning algorithm, the CGT-RL can effectively solve more complex problems within a reasonable timeframe. The combination of RL and CGT provides the exploration of coordinated policies that not only maximize the total system's benefits but also ensure a fair and efficient allocation of benefits among stakeholders. The findings show that stakeholders can enhance collective benefits from cooperative water harvesting of the Zayandeh-Rood and North Karoon rivers by fully cooperating and coordinating exploitation strategies. When all provinces collaborate, the entire system's revenue increases compared to other levels of cooperation. These incremental benefits can be distributed among them using CGT. The CGT-RL framework not only maximizes the total revenue for the entire system but also addresses how the benefits of full cooperation should be shared among the involved provinces, and is, in fact, a combination of group and individual rationality (collective and individual benefit) to resolve conflicts. Consequently, this research concludes that an appropriate and effective way to address water conflicts is to empower all stakeholders by encouraging cooperation via considering individual benefits.

Cite this article: Salimpour Naghani, Shahin, Hashemi Monfared, Seyed Arman, Ghaderi, Abbasali, Azhdary Moghaddam, Mehdi, Abolfathi, Soroush. 2026. Applying Reinforcement Learning-Cooperative Game Theory (CGT-RL) in the fair distribution of profits from cooperation among basin stakeholders. *Journal of Water and Soil Conservation*, 33 (1), 1-35.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2026.23707.3808
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

به‌کارگیری نظریه بازی همکارانه – یادگیری تقویتی برای توزیع عادلانه مزایای ناشی از همکاری میان ذی‌نفعان حوزه آبخیز

شاهین سلیم‌پور ناغانی[۱]، سید آرمان هاشمی منفرد*[۲]، عباسعلی قادری[۳]، مهدی اژدری مقدم[٤]، سروش ابوالفتحی[٥]

۱. دانشجوی دکتری مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: shahin.salimpour@pgs.usb.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: hashemi@eng.usb.ac.ir

۳. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: ghaderi@eng.usb.ac.ir

٤. استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: mazhdary@eng.usb.ac.ir

٥. دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه واریک، کاونتری، انگلستان. رایانامه: soroush.abolfathi@warwick.ac.uk

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۰٤/۰۳/۰٦
تاریخ ویرایش: ۰٤/۰٦/۰۳
تاریخ پذیرش: ۰٤/۰۹/۲۳

واژه‌های کلیدی:
ارزش شپلی،
الگوریتم یادگیری Q،
حوضه زاینده‌رود،
حوضه کارون شمالی،
روش نش – هارسانی،
نوکلئولوس

چکیده

سابقه و هدف: در حوزه‌های آبخیز با ذی‌نفعان گوناگون، تضمین توزیع عادلانه منابع آب و مزایای حاصل از آن، جنبه‌ای اساسی از مدیریت یکپارچه منابع آب است. این مسأله زمانی پیچیده‌تر می‌شود که یکی از طرفین، باوجودآن‌که منبع اصلی حوزه آبخیز است، به دلیل نابرابری در توزیع ثروت، کم‌تر از دیگری توسعه‌یافته باشد. در چنین مواردی، دستیابی به توزیع عادلانه منافع بین ذی‌نفعان بسیار مهم است، به‌ویژه هنگامی‌که طرفین پتانسیل همکاری پایدار را داشته باشند که این امر می‌تواند منجر به منافع جمعی بیش‌تری شود. نظریه بازی‌های همکارانه (CGT) چارچوب مناسبی را برای پرداختن به تخصیص عادلانه منافع در چنین محیط‌های رقابتی فراهم می‌کند. بااین‌حال، تعیین مقادیر منافع در تابع هدف، با درنظرگرفتن ائتلاف‌های گوناگون ذی‌نفعان، می‌تواند بسیار چالش‌برانگیز باشد. یادگیری تقویتی (RL) ابزاری ارزشمند برای تعیین مزایای سطوح مختلف همکاری شامل همکاری کامل، همکاری جزئی و عدم همکاری بین ذی‌نفعان فراهم می‌کند. این مطالعه از رویکرد نظریه بازی‌ها همکارانه- یادگیری تقویتی (CGT-RL) برای بررسی دو حوزه آبخیز مجاور کارون شمالی و زاینده‌رود استفاده می‌کند. سه استان ذی‌نفع اصلی در این دو حوضه، شامل استان چهارمحال بختیاری، اصفهان و خوزستان، در مورد تخصیص آب و نیز توزیع (تقسیم) عادلانه و کارآمد مزایای حاصل از مصرف آن اختلاف‌نظر دارند که این اختلافات در چند سال گذشته افزایش‌یافته است. در این مقاله برای نخستین بار از روش CGT-RL برای پرداختن به این چالش دنیای واقعی در یک سیستم آبی بزرگ استفاده شد. هدف از این پژوهش استفاده از چارچوب مذکور برای تخصیص عادلانه و کارای مزایای ناشی از مصارف آب در حالت ایجاد ائتلاف بزرگ و همکاری کامل میان این سه

ذی‌نفع است. این چارچوب پیشنهادی، RL و CGT را ترکیب می‌کند تا به دو ضعف اصلی رویکردهای غالب در پژوهش‌های پیشین برای به حداکثر رساندن و توزیع مزایا در سیستم‌های منابع آب دارای چند ذی‌نفع بپردازد. نخستین ضعف کاربرد روش‌های بهینه‌سازی مرسوم، بیشینه‌سازی کل مزایای سیستم بدون توجه به نحوه توزیع (تقسیم) آن بین ذی‌نفعان است. این روش‌ها فرض می‌کنند که بین ذی‌نفعان یک سیستم همکاری کاملی وجود دارد و پویایی تصمیم‌گیری افراد و منفعت هر یک از آن‌ها را نادیده می‌گیرد. راه‌حل‌های بازی‌های همکارانه می‌تواند باعث فراهم شدن انگیزه‌های قوی در تصمیم‌گیران فردی و نیز تسهیل همکاری جهت دستیابی به راه‌حل بهینه گردد. بااین‌حال، به دست آوردن اطلاعات موردنیاز برای استفاده از آن‌ها بسیار چالش‌برانگیز و ازنظر محاسباتی پیچیده است. این منجر به دومین ضعف کاربردهای نظریه بازی در مطالعات قبلی منابع آب شده که فرضیات ساده‌کننده‌ای را در مورد مزایای دست‌یافتنی طرفین تحت سطوح مختلف همکاری ایجاد می‌کردند. به‌طورکلی هدف پژوهش حاضر توانمندسازی ذی‌نفعان گوناگون با ایجاد ائتلاف و همکاری (عقلانیت جمعی) از طریق درنظر گرفتن منافع فردی (عقلانیت فردی) بیش‌تر است.

مواد و روش‌ها: بر اساس روش CGT-RL ابتدا مزایای قابل‌دستیابی تحت هر ائتلاف ممکن، شامل ائتلاف بزرگ (همکاری کامل)، ائتلاف‌های کوچک (همکاری جزئی) و عدم تشکیل ائتلاف (عدم همکاری)، با به‌کارگیری الگوریتم یادگیری Q به دست می‌آید. در مرحله دوم، از روش‌های حل بازی مشارکتی شامل چانه‌زنی نش – هارسانی، ارزش شپلی و نکلئولوس برای توزیع عادلانه مزایای حاصل از همکاری کامل بین ذینفعان، با درنظرگرفتن مفاهیم مختلف انصاف، استفاده می‌شود. ذی‌نفعان (بازیکنان) شامل استان‌های اصفهان، چهارمحال بختیاری و خوزستان هستند. سطوح مختلف همکاری شامل همکاری کامل، همکاری جزئی و عدم همکاری است. در همکاری کامل، سیستم توسط یک عامل مدیریت می‌شود که سعی در بهینه‌سازی تابع هدف برای کل سیستم دارد. در همکاری جزئی، سیستم یک سیستم دوعاملی است که یک عامل مسئول ائتلاف دو استان همکار و دیگری مسئول بهینه‌سازی تابع هدف برای استان غیرهمکار است. در عدم همکاری، سیستم سه عامل دارد که هر کدام به‌طور جداگانه مسئول یک استان هستند و هر عامل سعی می‌کند تابع هدف را برای استانی که مسئول آن است، به حداکثر برساند. تابع هدف یک تابع خطی شامل میزان برداشت آب از رودخانه‌ها توسط هر استان و میانگین بهره‌وری اقتصادی ماهانه استان‌ها به ازای هر مترمکعب برداشت آب است. داده‌های ورودی برای بهینه‌سازی شامل میانگین بهره‌وری اقتصادی ماهانه هر استان به‌ازای هر مترمکعب برداشت آب، حجم برداشت ماهانه آب توسط استان‌ها، میانگین حجم تخلیه رودخانه در هر استان، حداکثر و حداقل مقادیر برداشت و ذخیره سالانه آب توسط هر استان است.

یافته‌ها: یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که در صورت همکاری کامل میان ذی‌نفعان (ائتلاف بزرگ)، منافع طرفین در مقایسه با سایر سطوح همکاری افزایش می‌یابد. در حالت عدم همکاری یعنی با ادامه وضع موجود سهم هر استان از مزایای حاصل از برداشت و مصارف آب رودخانه‌های کارون شمالی و زاینده‌رود (متوسط درآمد سالانه کل) برای اصفهان ٤٧٨٧٦٥/٧٢، خوزستان ٤٢١٧٩١/٣٣ و چهارمحال‌بختیاری ١٥٦٨٨١/٣٩ میلیارد ریال برآورد می‌گردد. در صورت

همکاری کامل و ایجاد ائتلاف میان تمام استان‌های ذینفع مقادیر درآمد سالانه محاسبه‌شده با استفاده از روش بهینه‌سازی کل سیستم (الگوریتم یادگیری Q) برای استان‌های اصفهان، خوزستان و چهارمحال بختیاری به ترتیب ۱٦٤۱۷۷٦/۱۷، ۵۰۳۲۰۱/۹٤ و ۱۷۹۰۵٤/۸ میلیارد ریال افزایش می‌یابد. این مقادیر ۵٤٪ بیش‌تر از حالت عدم همکاری (وضع موجود) و حدود ۳۰ تا ٤۰ درصد بیش‌تر از حالت همکاری جزئی (ایجاد ائتلاف‌های کوچک) است. بازتوزیع درآمدهای حاصل از همکاری کامل میان ذی‌نفعان بر اساس راه‌حل چانه‌زنی نش – هارسانی برای سه استان اصفهان، خوزستان و چهارمحال بختیاری به ترتیب ۹۰۰۹٦۳/۸۸، ۸٤۳۹۸۹/٤۹ و ۵۷۹۰۷۹/۵۵ میلیارد ریال است. بر اساس ارزش شپلی، این مقادیر برای سه استان اصفهان، خوزستان و چهارمحال بختیاری به ترتیب ۱۰۰٦۹٦۲/٤۸، ۷۹۸۱۱۲/۵۷ و ۵۱۸۹۵۷/۸٦ میلیارد ریال و در روش نوکلولئوس، درآمدهای توزیع‌یافته میان سه استان اصفهان، چهارمحال بختیاری و خوزستان به ترتیب ۸۸٦٦۲٦/۲٦، ۸٤۷۰۹٤/۹٦ و ۵۹۰۳۱۱/٦۹ میلیارد ریال در سال است. اصفهان (ESF) با داشتن درآمد بیش‌تر به دلیل مزیت صنعتی بودن و توسعه‌یافتگی، بالاترین سهم از بازتوزیع درآمد (حدود ۳۸–٤۳٪) را به خود اختصاص می‌دهد. درآمد قابل حصول چهارمحال بختیاری (CHB) از روش بهینه‌سازی RL (همکاری کامل) حدود ۸٪ برآورد گردید که پس از بازتوزیع درآمدها با استفاده روش‌های CGT، به حدود ۲۲ تا ۲۵٪ افزایش می‌یابد. سهم درآمدی خوزستان (KHZ) در حالت همکاری کامل حدود ۲۲٪ است که با بازتوزیع آن با استفاده از CGT، حدود ۳٤–۳٦٪ خواهد بود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با ظرفیت محاسباتی و امکان پیاده‌سازی الگوریتم یادگیری Q، روش CGT-RL می‌تواند مسائل بسیار پیچیده‌تری را در مدت‌زمان معقولی حل کند. ترکیب RL و CGT فرصتی را برای بررسی سیاست‌های هماهنگ فراهم می‌کند که علاوه بر به حداکثر رساندن منافع کل سیستم، تخصیص عادلانه و کارای منافع را نیز میان ذی‌نفعان در نظر می‌گیرد. طبق نتایج، ذی‌نفعان می‌توانند با همکاری کامل و هماهنگی سیاست‌های بهره‌برداری، مزایای جمعی برداشت مشارکتی آب از رودخانه‌های زاینده‌رود و کارون شمالی را افزایش دهند. در صورت همکاری کامل استان‌ها، درآمد کل سیستم نسبت به سایر سطوح همکاری افزایش می‌یابد که می‌توان با استفاده از CGT این مزایای افزایشی را میان آن‌ها تقسیم نمود. چهارچوب CGT-RL، علاوه بر بیشینه کردن مزایا (درآمد) کل سیستم، به نحوه توزیع مزایای حاصل از همکاری کامل میان استان‌های ذینفع توجه می‌کند و درواقع تلفیقی از عقلانیت گروهی و فردی (منفعت جمعی و فردی) برای حل اختلاف است. به طور کلی این پژوهش نتیجه می‌گیرد که پاسخ و راهکار مناسب برای حل مناقشات آبی، توانمندسازی تمام ذینفعان با ایجاد همکاری از طریق درنظر گرفتن منافع فردی است.

استناد: سلیم‌پور ناغانی، شاهین، هاشمی منفرد، سید آرمان، قادری، عباسعلی، اژدری مقدم، مهدی، ابوالفتحی، سروش (۱۴۰۵). به‌کارگیری نظریه بازی همکارانه - یادگیری تقویتی برای توزیع عادلانه مزایای ناشی از همکاری میان ذی‌نفعان حوزه آبخیز. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۳ (۱)، ۳۵-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23707.3808

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

حوزه‌های آبخیز دارای چندین ذی‌نفع بخشی از سیستم‌های مدیریت منابع چندجانبه و چندهدفه هستند که در آن‌ها هماهنگی در سیاست‌های بهره‌برداری و همکاری میان ذی‌نفعان می‌تواند فرصت‌های مناسبی را برای افزایش مزایای کل سیستم ایجاد نماید (۱). مناقشات آبی اغلب زمانی رخ می‌دهد که مصرف‌کنندگان و ذی‌نفعان مختلف برای **تأمین** آب محدود با یکدیگر رقابت کنند (۲). عوامل اقتصادی و اجتماعی و اثرات خارجی آن‌ها می‌تواند مشوق‌هایی برای همکاری و حل مناقشات در مدیریت منابع آب دارای چند ذی‌نفع ایجاد کند (۳). این دلیل و هم‌چنین با توجه به تنوع مسائل بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب با چندین ذی‌نفع و نیز تفاوت در پیچیدگی آن‌ها، باعث استفاده گسترده از طیف وسیعی از روش‌های بهینه‌سازی و تصمیم‌گیری چندهدفه برای توسعه سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب با هدف بیشینه کردن مزایای کل سیستم شده است (٤) از جمله روش‌های برنامه‌ریزی خطی (٥)، برنامه‌ریزی خطی فازی (٦)، برنامه‌ریزی خطی تصادفی (۷)، برنامه‌ریزی خطی پیوسته (۸)، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (۹)، مدل برنامه‌ریزی درجه دوم فازی چندوزنی (۱۰)، برنامه‌ریزی درجه دوم پیوسته (۱۱)، برنامه‌ریزی کسری تصادفی (۱۲)، برنامه‌ریزی غیرخطی (۱۳)، برنامه‌ریزی محدودیت شانس (۱٤)، برنامه‌ریزی فازی تصادفی (۱٥)، برنامه‌ریزی پویا (۱٦)، برنامه‌ریزی پویای تصادفی (۱۷)، برنامه‌ریزی پویای تصادفی دومرحله‌ای (۱۸)، برنامه‌ریزی پویا تصادفی نمونه (۱۹)، درخت تصمیم (۲۰)، فرآیندهای تصمیم‌گیری مارکوف (۲۱) و یادگیری تقویتی (۲۲، ۲۳).

درحالی‌که مطالعات گسترده‌ای در خصوص استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی برای به حداکثر رساندن مزایای سیستم‌های منابع آب چند ذی‌نفع صورت گرفته اما به چگونگی و نحوه توزیع مزایای ناشی از هماهنگی در استراتژی‌های بهره‌برداری میان ذی‌نفعان آن‌ها توجه کم‌تری شده است. نظریه بازی همکارانه[1] (CGT) می‌تواند به یافتن توزیع کارآمد و عادلانه مزایای ناشی از همکاری میان ذی‌نفعان کمک کند (۱). در بازی همکارانه که به آن بازی ائتلافی نیز گفته می‌شود، بازیکنان برای بهبود بازده جمعی خود ائتلاف تشکیل می‌دهند (۲٤). بازی‌های همکارانه می‌توانند بینش‌های مفیدی در مورد چگونگی استفاده طرفین از منابع آب و محیط‌زیست و به اشتراک گذاشتن هرگونه مزایای همکاری ارائه دهند (۲٥). با توجه به تفاوت در مفهوم عدالت، روش‌های مختلف بازی همکارانه راه‌حل‌های تخصیص متفاوتی را پیشنهاد می‌کنند (۲٦). ازجمله این روش‌ها می‌توان به راه‌حل چانه‌زنی نش[2] برای دو بازیکن (۲۷)، راه‌حل چانه‌زنی نش- هارسانی[3] برای چندین بازیکن (۲۸)، روش ارزش شپلی[4] (۲۹) و روش نوکلئولوس[5] (۳۰) اشاره کرد.

CGT برای مسائل گوناگون منابع آب مانند توزیع سود (درآمد) (۱، ۳۱)، تقسیم هزینه یک سرمایه‌گذاری مشترک (۳۲)، تقسیم هزینه‌ها در توسعه منابع آب (۳۳)، مدیریت چندهدفه آبخوان (۳٤)، ارزیابی کاربرد نظریه بازی همکارانه در مدیریت منابع آب (۳٥)، مدیریت کیفیت منابع آب (۳٦)، همکاری در استفاده از آب کشاورزی (۳۷)، مدیریت پروژه توسعه منابع آب (۳۸)، تخصیص منابع آب و منافع اقتصادی حاصل از آن در سطح حوضه (۳۹)، یافتن راه‌حل‌های مشارکتی بین تولیدکنندگان برق‌آبی و طرفداران محیط‌زیست (٤۰)، تخصیص آب و سود در

1- Cooperative Game Theory
2- Nash Bargaining Solution
3- Nash-Harsanyi Solution
4- Shapley Value
5- Nucleolus

پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای (٤١)، صدور مجوز نیروگاه برق‌آبی (٢٥)، به اشتراک‌گذاری منابع آب فرامرزی (٤٢، ٤٣)، مدیریت مشارکتی سفره‌های زیرزمینی مشترک (٤٤)، تخصیص آب درون و بیرون حوضه‌ای میان استفاده‌کنندگان (٤٥)، استفاده دوباره از پساب شهری توسط ذینفعان چندگانه (٤٦) استفاده شده است.

از روش‌های حل بازی‌های همکارانه می‌توان در تعیین سهم هر یک از طرف‌های همکار از مزایای کل استفاده نمود، به‌گونه‌ای که همه ذی‌نفعان به همکاری با یکدیگر ادامه دهند. برای این‌که همکاری کامل و ائتلاف بزرگ پایدار بماند، بازیکنان نباید انگیزه‌ای برای عدم همکاری (اقدام به‌صورت تک‌نفره) یا تشکیل ائتلاف‌های کوچک داشته باشند (٤٧). این بدان معناست که دستاوردهای آن‌ها از همکاری کامل با یکدیگر و مشارکت در ائتلاف بزرگ، باید بیش از دستاوردهای احتمالی آن‌ها از طریق شرکت در ائتلاف‌های کوچک یا تک‌نفره باشد. بنابراین برای توزیع سهم عادلانه و کارآمد مزایای سیستم بین همه ذی‌نفعان، نظریه بازی همکارانه ارزش یا مزایای قابل‌حصول را در همه ائتلاف‌های احتمالی بازیکنان در نظر می‌گیرد. سطوح گوناگون همکاری شامل همکاری کامل بین همه ذی‌نفعان (تشکیل ائتلاف بزرگ)، همکاری جزئی (تشکیل ائتلاف‌های کوچک) و عدم همکاری بین آن‌ها (عدم تشکیل هیچ‌گونه ائتلافی) هستند. محاسبه تمام مقادیر مزایای ناشی از ائتلاف‌ها در سطوح مختلف همکاری به‌ویژه در مسائل با بیش از چند بازیکن و گام زمانی دشوار و چالش‌برانگیز است. این پیچیدگی در مسائلی مانند منابع آب زمانی بیش‌تر خواهد شد که طرف‌های همکار یا غیرهمکار برای بیشینه کردن مزایا (سود) خود در بلندمدت نیاز دارند به‌صورت مداوم تصمیم‌گیری کرده و استراتژی‌های خود را تغییر دهند که منجر به ایجاد تعادل جدیدی می‌شود. در این حالت لازم است مزایای قابل‌حصول ائتلاف‌های موجود برای هر وضعیت جدید تعیین و محاسبه گردند. در مسائل با چندین ذی‌نفع، محاسبات قابل‌توجهی لازم است تا بتوان مزایای قابل‌حصول همه ائتلاف‌های ممکن تحت استراتژی‌های بهترین پاسخ آن‌ها را محاسبه نمود. با توجه به پیچیدگی این موضوع، در اغلب مطالعات منابع آب یا اهمیت احتمال تشکیل ائتلاف‌های کوچک و اصلاح بهترین استراتژی‌های پاسخ را نادیده گرفته‌اند و یا فرضیات ساده کننده‌ای را برای تعیین ارزش (مزایای قابل‌حصول) ائتلاف‌های کوچک در مسائل پیچیده چنددوره‌ای با عوامل متقابل در نظر گرفته‌اند (١). جهت رفع این چالش و تعیین مزایای قابل‌حصول در سطوح مختلف همکاری ذی‌نفعان، می‌توان از روش یادگیری تقویتی (RL)[1] استفاده نمود که یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی است و برای یافتن راه‌حل بهینه (یا نزدیک به بهینه) به عوامل متقابل متکی است (٤٨).

باتوجه‌به پیچیدگی‌های حاکم بر تعاملات میان ذی‌نفعان در حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه در شرایطی که اختلافات تاریخی، تفاوت‌های توسعه‌ای و نابرابری در دسترسی به منابع وجود دارد، نیاز به رویکردهایی هوشمندانه و عادلانه برای مدیریت مشارکتی منابع آب بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در این راستا، ترکیب نظریه بازی همکارانه با یادگیری تقویتی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار ذی‌نفعان در سناریوهای مختلف همکاری و ارائه چارچوبی عملی برای توزیع عادلانه منافع باشد. این پژوهش قصد دارد از روش یادگیری تقویتی – نظریه بازی (CGT-RL) پیشنهادشده توسط مدنی و هوشیار (١) برای حل یک مسأله منابع آب چنددوره‌ای – چند ذی‌نفعی با عوامل

1- Reinforcement Learning

تعاملی جهت تعیین مزایای قابل‌حصول در سطوح مختلف همکاری و نیز توزیع (تقسیم) مزایای همکاری کامل بین ذی‌نفعان استفاده نماید. پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأ موجود، رویکرد نوین CGT-RL را برای تحلیل و بهینه‌سازی تخصیص منافع میان سه استان واقع در دو حوضه مهم کارون (تنها شامل کارون شمالی) و زاینده‌رود شامل اصفهان، چهارمحال بختیاری و خوزستان ارائه می‌دهد. درحالی‌که پیشنهاددهندگان روش CGT-RL، کاربرد آن را در یک مسأله فرضی و برای بهره‌برداران از مخزن استفاده نمودند، این مطالعه برای نخستین بار این روش را برای یک مسأله واقعی و بزرگ منابع آب به کار برده است. پژوهش حاضر برای اثبات مفهوم و کاربرد عملی چهارچوب CGT-RL، آن را به‌عنوان یکی از روش‌های حل تعارض آبی بین ذینفعان دو حوزه آبخیز کارون شمالی و زاینده‌رود که به دلایل گوناگون منازعات آبی آن‌ها در سال‌های اخیر رو به افزایش بوده، به‌کار برده است.

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی پژوهش: به طور کلی، روش CGT-RL پیشنهادی توسط مدنی و هوشیار (۱) دارای دو مرحله اصلی است. نخست، مزایای (درآمد) قابل‌حصول تحت هر ائتلاف ممکن با به‌کارگیری الگوریتم یادگیری Q به‌دست می‌آیند. در مرحله دوم برای توزیع عادلانه درآمدهای ناشی از همکاری کامل بین ذی‌نفعان از روش‌های حل بازی همکارانه شامل چانه‌زنی نش – هارسانی (۲۸)، ارزش شپلی (۲۹) و نوکلئولوس (۳۰) با توجه به مفاهیم گوناگون انصاف استفاده می‌شود. برای روشن شدن مسیر پژوهش، چارچوب مفهومی در شکل نشان داده شده است.

یادگیری تقویتی: تخمین مقادیر مزایای همه ائتلاف‌های ممکن $\vartheta(s)$ برای کاربرد موفقیت‌آمیز روش‌های حل CGT ضروری است. در مسائل پیچیده مدیریت منابع آب که دارای گام‌های زمانی متعدد و چندعاملی با اثرات خارجی هستند، محاسبه مقادیر ائتلاف‌های گوناگون می‌تواند چالش برانگیز باشد. به ویژه هنگامی‌که طرف‌های غیر همکار فرصتی برای تغییر استراتژی‌های خود در پاسخ به تشکیل ائتلاف‌های کوچک توسط سایر بازیکنان دارند. یادگیری تقویتی چند عامله (RL) می‌تواند برای مقابله با این چالش و استخراج استراتژی‌های بهترین پاسخ شامل همه ترکیب‌های غیرهمکارانه (خارج از ائتلاف‌ها) و همکارانه (شرکت در ائتلاف‌ها) استفاده شود (۱). با الهام از روانشناسی رفتارگرا، RL (٤٨) یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی است که از عوامل تعاملی برای یافتن سیاست بهینه (یا نزدیک به بهینه) یک عامل از طریق تعامل با محیطی که شامل همه عوامل فعال دیگر است، استفاده می‌کند. به‌طورکلی RL نوعی یادگیری ماشین[1] است که با فرایندهای تصمیم‌گیری متوالی سروکار دارد. بر اساس این روش محاسباتی تکاملی، یادگیرنده (عامل) برای انجام اقدامات بهینه (یا نزدیک به بهینه) از طریق تعامل با محیط آموزش می‌بینند. برخلاف روش‌های یادگیری نظارت‌شده که نیاز به نمونه خط مشی‌هایی دارند که توسط یک ناظر بیرونی ارائه شود، فرآیند یادگیری مبتنی بر RL از طریق تعامل با یک محیط پویا و با تجزیه و تحلیل بازخوردهای تصمیم‌گیری‌های قبلی انجام می‌شود (٤٨). RL می‌تواند برای بهینه‌سازی تخصیص منابع، زمان‌بندی و تصمیم‌گیری در حوزه‌هایی مانند مدیریت منابع آب، مدیریت انرژی، سیستم‌های کنترل و ارتباطات استفاده شود. RL شامل عامل[2]، محیط[3] و مکانیسم بازخورد برای هدایت اقدامات عامل است. عامل در هر موقعیت (حالت[4]) می‌تواند

1- Machine Learning
2- Agent
3- Environment
4- State

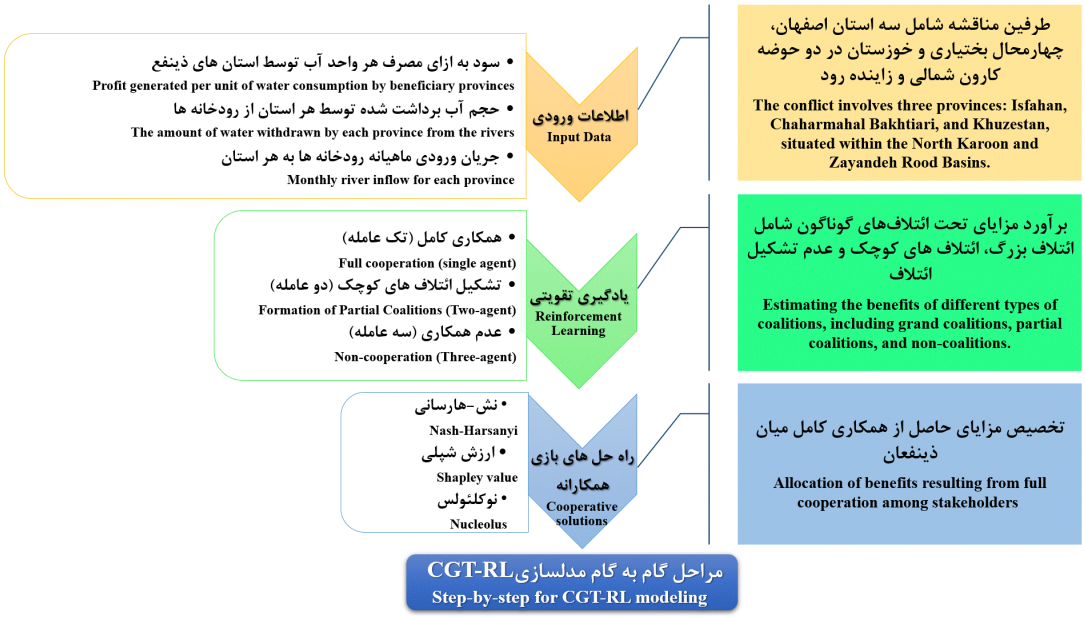
حرکات (عمل[1]) مختلفی را انجام دهد و برای هر عمل پاداش[2] یا تنبیه وجود دارد. عامل یاد می‌گیرد که اقداماتی را در محیط که دارای حالت‌های گوناگونی است، انجام دهد تا سیگنال پاداش تجمعی[3] بیشینه و یا میزان جریمه آن کمینه گردد. این سیگنال پاداش تجمعی به‌عنوان نیروی محرک برای یادگیری عمل می‌کند. بنابراین RL با داده دریافت شده از یک محیط پویا یاد می‌گیرد و هدف آن یافتن بهترین دنباله‌ای[4] است که مجموع پاداش‌ها بیشینه و یا مجموع جریمه‌ها کمینه گردند. در این مطالعه یادگیری تقویتی برای توسعه بهترین استراتژی‌های پاسخ تحت همه ائتلاف‌های ممکن در بازی، محاسبه درآمد قابل حصول ناشی از ائتلاف ها، ارائه اطلاعات مورد نیاز برای روش‌های حل بازی همکارانه به‌منظور تعیین سهم عادلانه و کارآمد مزایای افزایشی (درآمد) ناشی از همکاری استفاده می‌شود. در همه الگوریتم‌های RL همواره باید اکتشاف[5] و استخراج[6] وجود داشته باشد و یکی از جنبه‌های مهم و حساس در مدل RL ایجاد تعادل بین این دو است. در RL عامل با محیط دینامیک و پویا در تعامل است؛ بنابراین محیط ممکن است در طول زمان تغییر کند. باید توجه داشت استفاده محض از استخراج اغلب منجر به سیاست‌های زیر بهینه خواهد شد. ازاین‌رو برای ایجاد تعادل میان اکتشاف و استخراج از سیاست $\varepsilon - greedy$ استفاده می‌گردد (۴۹). روش‌های اقدام اکتشافی مانند $\varepsilon - greedy$ می‌تواند به عامل در تصمیم‌گیری بهتر و بازدید کافی از راه‌حل‌های تقریباً بهینه کمک نماید. در پژوهش حاضر از این سیاست استفاده شد.

الگوریتم یادگیری Q: یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌ها در یادگیری تقویتی، یادگیری Q (۵۰، ۵۱) است. یادگیری Q از الگوریتم‌های رایج RL برای یافتن سیاست بهینه (مجموعه اقدامات) برای هر فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف محدود[7] است. اگرچه الگوریتم یادگیری Q ریاضیات ساده‌ای دارد اما کاربرد گسترده‌ای در مسائل RL داشته و در اغلب موارد از این الگوریتم استفاده می‌شود. یادگیری Q یک نسخه مبتنی بر شبیه‌سازی از برنامه‌نویسی پویا تصادفی[8] (SDP) است (۴۹). بر اساس این روش، تابع مقدار SDP، که یک مقدار تعریف‌شده برای هر جفت عمل- حالت است، با استفاده از الگوریتم رابینز- مونرو[9] تخمین زده می‌شود (۵۲). تابع ارزش شامل دو جزء اصلی پاداش فوری و پاداش انباشته است. از آن‌جایی‌که در RL فرآیند یادگیری با تعامل مستقیم با محیط اجرا می‌شود، توابع ارزش حالت- عمل باید پس از هر بار تعامل با محیط با استفاده از رابطه ۱ به روز شوند (۴۹):

در **Error! Reference source not found.**، $Q(S_t, A_t)$ نشان‌دهنده پاداش انباشته عامل پس از انجام عمل a در حالت s، اندیس old/new به قبل/بعد از انجام عمل a اشاره دارد؛ S_{t+1} حالت بعدی، R_{t+1} پاداش فوری هنگام انجام عمل a برای انتقال از حالت S_t به حالت S_{t+1}، γ نرخ تخفیف و α پارامتر یادگیری است. یکی از مزیت‌های الگوریتم یادگیری Q این است که مستقل از سیاست رفتاری، ارزش‌های بهینه تخمین زده می‌شوند و اغلب این سیاست رفتاری از روی تابع ارزش حالت- عمل تعیین می‌شود.

1- Action
2- Reward
3- Accumulate Reward
4- Trajectory
5- Exploration
6- Exploitation
7- Markov decision process
8- Stochastic Dynamic Programing
9- Robins and Monro

$$Q_{New}(S_t, A_t) = Q_{Old}(S_t, A_t) + \alpha \times \left[R_{t+1} + \gamma \max_a Q_{Old}(S_{t+1}, A_t) - Q_{Old}(S_t, A_t)\right] \quad (۱)$$



شکل ۱- مدل مفهومی پژوهش توسعه راه‌حل‌های همکارانه بر اساس روش CGT-RL.

Figure 1. Conceptual framework of research on developing collaborative solutions based on the CGT-RL method.

سیاست رفتاری می‌تواند هر نمونه سیاست باشد؛ اما اغلب از سیاست ε-Greedy استفاده می‌شود و از روی $Q_{Old}(S_t, A_t)$ با استفاده از سیاست ε-Greedy حالت‌ها و عمل‌ها انتخاب می‌شوند. در یادگیری Q مقادیر نرخ جست و جو $\varepsilon > 0$، نرخ یادگیری $0 < \alpha < 1$ و فاکتور تخفیف $0 < \gamma < 1$ در نظر گرفته می‌شوند. در ابتدای فرآیند یادگیری بهتر است مقدار ε بزرگ انتخاب شود مثلاً ۰/۹ تا جست و جوی زیادی توسط عامل انجام شود اما به تدریج مقدار ε کوچک می‌شود (مقدار خیلی کوچکی مانند ۰/۰۱) تا میزان جست و جوی عامل به تدریج کاهش یابد. در یادگیری Q بهتر است تعداد اپیزودها (قسمت‌ها) را زیاد در نظر گرفت و ممکن است اپیزودهای اولیه طولانی باشند اما به مرور سیاست بهینه شده و سرعت همگرایی اپیزودهای بعدی بالاتر می‌رود که باعث می‌گردد در گام‌های زمانی کم‌تری پایان یابند (۴۸، ۴۹). تعداد کافی اپیزود کمک می‌کند که برای عامل فرصت‌های اکتشاف کافی جهت جلوگیری از بهینه‌سازی محلی (راه‌حل زیر بهینه) فراهم گردد. هم‌چنین، باتوجه‌به این‌که هر اپیزود از اپیزودهای دیگر مستقل است و دارای شرایط اولیه تصادفی است (حجم آب رودخانه در هر استان)، انتخاب اپیزودهای بیش‌تر تأثیر شرایط اولیه را بر سیاست بهینه به کار گرفته شده توسط عامل به حداقل رسانده و به عامل اجازه می‌دهد شرایط اولیه متفاوت را بررسی کند.

نظریه بازی همکارانه: نظریه بازی همکارانه (CGT) بر ارزیابی احتمال حل تعارض، ارتقای همکاری و تعیین سهم هر بازیکن در تعارضات مربوط به اشتراک منابع تمرکز دارد و می‌تواند به یافتن توزیع کارآمد و عادلانه مزایای ناشی از همکاری در سیستم‌های منابع آب کمک کند (۵۳). با توجه به تفاوت در مفهوم

عدالت، روش‌های مختلف بازی همکارانه راه‌حل‌های تخصیص متفاوتی را پیشنهاد می‌کنند. بنابراین برای تعیین پایدارترین راه‌حل بازی همکارانه با بالاترین احتمال پذیرش در هر محیط همکاری منحصر بفردی از روش‌های تحلیل پایداری استفاده می‌شود (۱). ائتلاف بزرگ یا همکاری کامل بین طرفین درگیر در یک تعارض هنگامی پایدار است که هیچ‌کدام از طرفین انگیزه‌ای برای شکستن آن و پیوستن به ائتلاف‌های جزئی نداشته باشند. بر اساس مفهوم پایداری در ائتلاف بزرگ، مفهوم هسته[1] برای بازی‌های همکارانه به جای تعادل نش[2] در بازی‌های غیرهمکارانه وجود دارد و مجموعه از ائتلاف بزرگ است که هیچ بازیکنی انگیزه‌ای برای ترک آن و پیوستن به ائتلاف‌های کوچک نداشته‌باشد. سه شرط زیر هسته بازی همکارانه را تشکیل می دهد، یعنی مجموعه‌ای از تخصیص‌هایی که توسط طرف‌های همکار قابل‌قبول است (۱):

$$u_i^* \geq u_i \quad \forall i \in N \tag{۲}$$

$$\sum_{i \in s} u_i^* \geq \vartheta(s) \quad \forall s \in S,\ S \subseteq N \tag{۳}$$

$$\sum_{i \in N} u_i^* = \vartheta(N) \tag{٤}$$

در رابطه‌های ۲، ۳ و ٤، u_i^* سهم سود بازیکن i تحت همکاری، u_i سود بازیکن i در شرایط موجود (عدم همکاری)، N تعداد بازیکنان، $\vartheta(s)$ سود کل ناشی از ائتلاف s و $\vartheta(N)$ سود کل حاصل از ائتلاف بزرگ که در آن تمامی بازیکنان مشارکت دارند. رابطه ۲ نشان‌دهنده شرط عقلانیت فردی (منفعت فردی) است؛ بدین‌معنا که هر بازیکن به دنبال افزایش سود خود است و این مورد مستلزم آن است که سهم سود ناشی از مشارکت هر بازیکن بیش‌تر از وضعیت موجود او (عدم همکاری) باشد. رابطه ۳ شرط عقلانیت گروهی (منفعت جمعی) را تعیین می‌کند؛ یعنی مجموع منافع (سود) ناشی از همکاری کامل بازیکنان، بیش‌تر از دیگر سطوح همکاری شامل عدم همکاری و همکاری جزئی (ائتلاف‌های کوچک) باشد. لازمه این شرط آن است که مجموع سودهای ناشی از همکاری بازیکنان در ائتلاف بزرگ، بیش‌تر از سود آن‌ها تحت ایجاد هر ائتلافی کوچک دیگری باشد. در واقع شرط رابطه ۳ هیچ انگیزه‌ای را برای ترک ائتلاف بزرگ توسط بازیکنان به منظور تشکیل و پیوستن به ائتلاف‌های کوچک باقی نمی‌گذارد. رابطه ٤ شرط کارایی را مشخص می‌کند و مستلزم آن است که کل سود حاصل از همکاری به طور کامل به اعضای ائتلاف بزرگ اختصاص یابد. این معادلات تضمین می‌کنند که اگر هسته تهی نباشد، راه‌حل بهینه‌سازی متعلق به هسته است. به‌طورکلی، راه‌حل‌های تخصیص که به هسته تعلق ندارند، ارزش عملی ندارند. درحالی‌که هر راه‌حل متعلق به هسته به‌طور بالقوه توسط طرف‌های همکاری قابل‌قبول است، آن‌ها ممکن است ترجیحات متفاوتی نسبت به راه‌حل‌های اصلی داشته‌باشند. پژوهش‌گران علاقه بیش‌تری به استفاده از روش‌های حل بازی همکارانه نشان داده‌اند که راه‌حل تخصیص را از هسته انتخاب می‌کند (۱).

در پژوهش حاضر فرض این است که بازی همکارانه از نوع مطلوبیت قابل‌انتقال (TU[3]) است. در بازی‌های TU یک عامل می‌تواند به عامل دیگر غرامت بپردازد و کاهش مزایا (سود) آن را با پرداخت‌های جانبی مانند پرداخت پول و یا سهم آب بیش‌تر جبران نماید. در این حالت، نخست با استفاده

1- Core
2- Nash Equilibrium
3- Transferable utility

از RL سود کل سیستم ($\vartheta(N)$) تحت همکاری کامل بازیکنان محاسبه می‌گردد و سپس با استفاده از راه‌حل‌های بازی همکارانه، این سود (درآمد) بین ذی‌نفعان بازتوزیع و تقسیم می‌گردد. سه مورد از متداول‌ترین روش‌های حل بازی همکارانه برای توزیع سود ناشی از همکاری که در این پژوهش استفاده شده‌اند، شامل موارد زیر است:

چانه‌زنی نش- هارسانی: هارسانی (۲۸) رابطه ۵ را به‌عنوان مدل بهینه‌سازی برای یافتن راه‌حل مشارکتی عادلانه در بازی‌های چانه‌زنی با تعداد N بازیکن جهت تقسیم منافع ناشی از همکاری پیشنهاد کرد. این روش بسط راه‌حل چانه‌زنی دو بازیکن پیشنهاد شده توسط نَش (۲۷) است. این معادله تابع شرایط هسته (رابطه‌های ۲ تا ٤) می‌باشد. این مدل بهینه‌سازی سود افزایشی بازیکنان تحت همکاری را به حداکثر می‌رساند (۲۸):

$$max \prod_{i=1}^{n} (u_i^* - u_i) \qquad (۵)$$

تابع π_i نشان‌دهنده سود یا منفعت ناشی از همکاری بازیکنان با دیگر طرفین است که در آن u_i پیامد بازیکن i تحت شرایط عدم همکاری و u_i^* پیامد بازیکن i ام تحت همکاری (ائتلاف) هستند.

ارزش شپلی: شپلی (۲۹) رابطه ٦ را برای محاسبه سود عادلانه بازیکنان تحت همکاری پیشنهاد کرد. این روش تخصیص عادلانه را بر اساس میانگین وزنی مشارکت بازیکنان در ائتلاف‌ها و توالی‌های مختلف تعیین و به بازیکنان تهی (بازیکنانی که مشارکت آن‌ها در ائتلاف منجر به هیچ سود افزایشی نمی‌شود) سود صفر اختصاص می‌دهد (۲۹):

$$u_i^* = \sum_{\substack{S \subseteq N \\ i \in S}} \frac{(n-|s|)!\,(|s|-1)!}{n!} \left(\vartheta(s) - \vartheta(s-\{i\})\right) \qquad (٦)$$

که در آن n تعداد کل بازیکنان است، $|s|$ تعداد اعضای ائتلاف s است و $\vartheta(s-\{i\})$ مقدار ائتلاف s بدون عضو i است.

روش نکلئولوس: نکلئولوس (۳۰) یکی دیگر از روش‌های حل بازی‌های همکارانه است. برای یافتن تخصیص عادلانه این روش نارضایتی ناراضی‌ترین ائتلاف را با اعمال (ε) به همه ائتلاف‌ها و حفظ آن‌ها در هسته به حداقل می‌رساند. سطح بهینه ε و راه حل تخصیص بر اساس مفهوم هسته را می‌توان با استفاده از مدل بهینه‌سازی رابطه ۷ تعیین کرد (۳۰):

$$\begin{aligned} &\text{Max } \varepsilon \\ &subject\ to: \\ &\varepsilon \leq \sum_{i \in S} u_i^* - \vartheta(s)\ \ \forall s \in S, S \subseteq N \\ &\sum_{i \in N} u_i^* = \vartheta(N) \end{aligned} \qquad (۷)$$

$\sum_{i \in S} u_i^* - \vartheta(s)$ ضرر بازیکنان در ائتلاف s است. اگر آن‌ها ائتلاف بزرگ (شامل همه بازیکنان) را ترک کنند و هسته تهی نباشد مدل بهینه‌سازی بالا یک حل منحصربه‌فرد متعلق به هسته دارد.

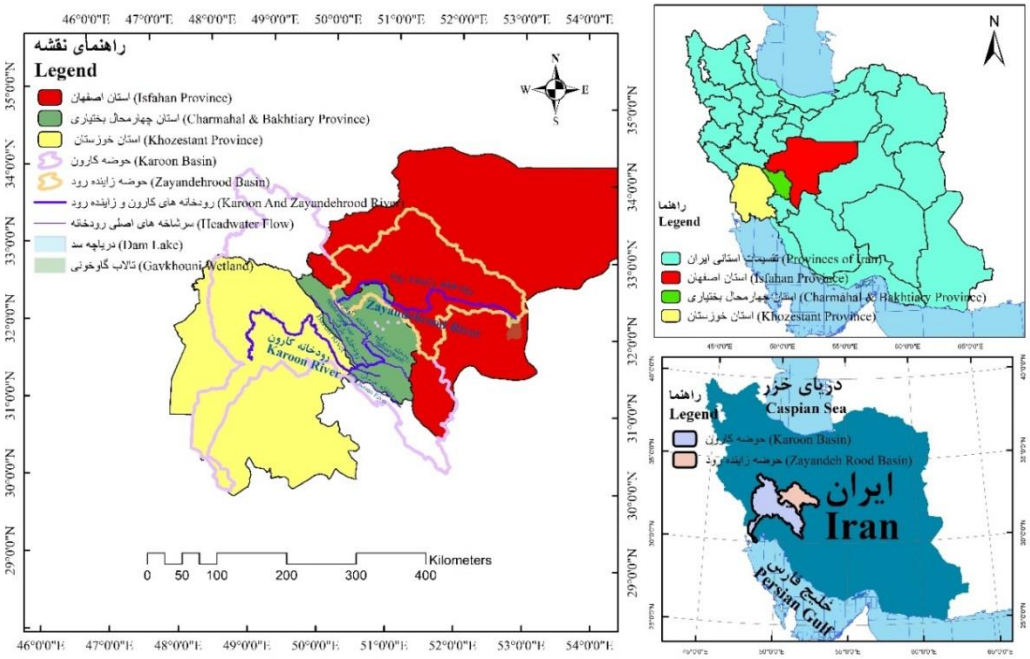
منطقه موردمطالعه: ذی‌نفعان اصلی درگیر در بهره‌برداری از منابع آب دو حوضه کارون شمالی و زاینده‌رود در بخش‌های مختلف (کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست)، استان‌های چهارمحال‌بختیاری (CHB)، خوزستان (KHZ) و اصفهان (ESF) هستند. استان خوزستان، واقع در جنوب غربی ایران، بین عرض‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۳۳ درجه شمالی و طول جغرافیایی ٤۷ درجه و ۵۱ درجه شرقی قرار دارد. حوضه کارون بزرگ با مساحت ٦۷۲۵۷ کیلومترمربع، محل رودخانه‌های کارون و دز است. میانگین بارندگی سالانه در حوضه ۲۳۳ میلی‌متر است.

رودخانه کارون، بزرگ‌ترین و تنها آبراه قابل کشتیرانی در ایران، بیش از ۸۹۰ کیلومتر امتداد دارد و حوضه‌ای به وسعت حدود ۶۰۰۰۰ کیلومترمربع را زهکشی می‌کند. این رود از رشته‌کوه زاگرس مرکزی (زردکوه بختیاری) سرچشمه می‌گیرد و از دشت خوزستان می‌گذرد و به اَروندرود می‌ریزد. کارون نیاز آبی طیف وسیعی از زمین‌های کشاورزی و جمعیت شهری و روستایی را تأمین می‌کند. هم‌چنین با داشتن چهار سد بزرگ (کارون ۱، ۲، ۳ و ٤) نقش مهمی در تولید برق‌آبی ایفا می‌کند.

حوضه زاینده‌رود با مساحت ۲٦۸٦٤ کیلومترمربع، بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲٤ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲٤ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۳ درجه و ٤۲ دقیقه شمالی واقع‌شده‌است. این حوضه از دو استان اصفهان و چهارمحال بختیاری تشکیل شده که ۹۳ درصد از مساحت این حوضه در استان اصفهان و هفت درصد از مساحت آن در استان چهارمحال‌بختیاری قرار دارد. حدود ۹۰ درصد از آب حوضه از استان چهارمحال‌بختیاری تأمین می‌شود. میزان بارندگی در حوضه زاینده‌رود از ۱۵۰۰ میلی‌متر در غرب حوضه (استان چهارمحال‌بختیاری) تا ۵۰ میلی‌متر در قسمت شرقی استان اصفهان متغیر است. در این حوضه رودخانه زاینده‌رود با طول بیش از ٤۰۰ کیلومتر بزرگ‌ترین رودخانه منطقه مرکزی ایران با میانگین دبی سالانه ۱٤۰۰ میلیون‌مترمکعب است. سرچشمه زاینده‌رود از رشته‌کوه‌های زاگرس مرکزی (زردکوه بختیاری) در غرب سرچشمه می‌گیرد و به تالاب گاوخونی در فلات مرکزی ایران می‌ریزد. حدود ٦۵۰ میلیون‌مترمکعب آن جریان طبیعی و ۷۵۰ میلیون‌مترمکعب انتقال بین‌حوضه‌ای آب از سرشاخه‌های حوضه کارون واقع در استان چهارمحال‌بختیاری (تونل‌های کوهرنگ ۱ تا ۳) است. از دیگر ذی‌نفعان حوضه کارون شمالی و زاینده‌رود، استان چهارمحال‌بختیاری است. این استان که بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ٤۱ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۰۳ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳٤ درجه و ۳۵ دقیقه تا ٤۰ درجه و ۰۲ دقیقه شمالی واقع‌شده‌است، مساحتی در حدود ۱٦۵۳۲ کیلومترمربع را پوشش می‌دهد. از شرق و شمال با اصفهان، از شمال غرب با استان لرستان و از غرب با استان خوزستان همسایه است. سرشاخه‌های اصلی هر دو رودخانه کارون و زاینده‌رود از این استان سرچشمه می‌گیرند. با توجه به مدیریت تقاضا محور در حوضه زاینده رود و توسعه ناپایدار صنعتی، کشاورزی و شهری در این استان، انتقال آب بین‌حوضه‌ای از سرچشمه‌های حوضه کارون در استان چهارمحال‌بختیاری به حوضه زاینده‌رود به میزان تقریبی ۷۵۰ میلیون‌مترمکعب انجام‌شده‌است. در سال‌های اخیر پروژه‌های تکمیلی انتقال آب مانند پروژه انتقال آب بهشت‌آباد در دست بررسی بوده‌است؛ اما به دلیل اثرات منفی زیست محیطی بر حوضه مبدا و هم‌چنین نارضایتی مردم استان مبدأ از بی‌عدالتی در تخصیص آب و مزایای حاصل از آن، در درستی اجرای این پروژه‌ها تردید وجود دارد (٥٤، ۵۵). باوجود این‌که استان چهارمحال‌بختیاری سرچشمه اصلی دو رودخانه کارون و زاینده‌رود است؛ اما سهم استان از مزایای آن پایین است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی این دو حوضه و ذی‌نفعان اصلی نشان داده‌شده‌است.

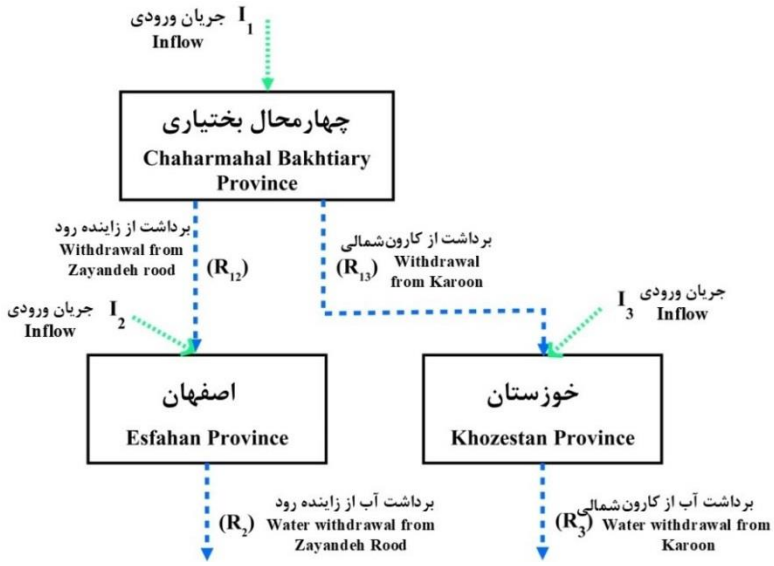
شکل ۳ سیستم شبکه ساده‌شده حوضه‌های مطالعاتی و نمایش شماتیک مسأله را نشان می‌دهد. روش CGT-RL پیشنهادشده توسط مدنی و هوشیار (۱) برای تقسیم مزایای ناشی از برداشت و مصرف آب ذی‌نفعان در دو حوضه مذکور اعمال می‌گردد. منطقه مطالعاتی (شکل ۲) شامل سه ذی‌نفع (چهارمحال‌بختیاری، اصفهان و خوزستان) در دو

حوضه زاینده‌رود و کارون شمالی است. این ذی‌نفعان هر کدام از رودخانه‌های زاینده‌رود و کارون شمالی برای مصارف بخش‌های گوناگون از جمله کشاورزی، صنعتی، تولید برقابی و شرب، آب برداشت می‌کنند (جدول ۲). برای سادگی، درآمد ناشی از مصرف آب ذی‌نفعان در بخش‌های کشاورزی، صنعتی و خدمات به صورت یک تابع خطی از برداشت آب (رابطه ۸) فرض می‌گردد. در جدول‌های ۱ تا ٤ داده‌های لازم برای به‌کارگیری چهارچوب CGT-RL در این پژوهش، ارائه شده‌اند. کمیت‌ها برحسب میلیون‌ریال بر مترمکعب (million Rials/m^3) و میلیون‌مترمکعب (MCM) در واحد زمانی ماهانه (Monthly) هستند.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

Figure 2. Geographical Location of the Study Area.



شکل ۳- نمایش شماتیک مسئله بهینه‌سازی.

Figure 3. Schematic display of the optimization problem.

جدول ۱- مقادیر میانگین ماهانه بهره‌وری اقتصادی آب در استان‌های ذی‌نفع به ازای هر واحد آب (میلیون‌ریال/مترمکعب) (۵۶).

Table 1. Monthly economic water productivity values in the beneficiary provinces per unit of water withdrawal (b_i^t) (million Rials/m^3) (56).

استان Province	اسفند Feb- Mar	بهمن Jan- Feb	دی Dec- Jan	آذر Nov-Dec	آبان Oct- Nov	مهر Sep- Oct	شهریور Aug- Sep	مرداد Jul-Aug	تیر Jun-Jul	خرداد May-Jun	اردیبهشت Apr-May	فروردین Mar-Apr	میانگین بهره‌وری سالانه اقتصادی آب Average annual economic productivity of water
اصفهان Esfahan	0.743	0.472	0.416	0.410	0.390	0.352	0.372	0.460	0.675	0.930	1.250	1.110	0.782
چهارمحال‌بختیاری Chaharmahal Bakhtiari	0.183	0.152	0.114	0.101	0.072	0.070	0.074	0.086	0.110	0.224	0.227	0.260	0.154
خوزستان* Khuzestan	0.422	0.362	0.271	0.239	0.167	0.153	0.175	0.198	0.240	0.312	0.494	0.583	0.301

*فقط مربوط به حوضه رودخانه کارون شمالی

جدول ۲- حجم برداشت ماهانه آب از رودخانه‌ها (R_{ij}^t) توسط هر استان (MCM) (۵۷).

Table 2. Monthly water withdrawal volume from rivers (R_{ij}^t) by each province (57).

استان Province	رودخانه River	فروردین Mar-Apr	اردیبهشت Apr- May	خرداد May- Jun	تیر Jun- Jul	مرداد Jul- Aug	شهریور Aug- Sep	مهر Sep-Oct	آبان Oct- Nov	آذر Nov- Dec	دی Dec- Jan	بهمن Jan- Feb	اسفند Feb-Mar
چهارمحال‌بختیاری Chaharmahal Bakhtiari	زاینده‌رود Zayandeh Rood (R12)	30.7	26.84	71.1	12.9	10.2	8.9	8.2	8.5	12	13.53	18.1	21.75
	کارون Karoon (R13)	143.71	125.7	80	60.24	47.75	41.2	38.3	39.8	56.1	63.4	84.5	101.85
اصفهان* Esfahan	زاینده‌رود Zayandeh Rood (R2)	311.12	350.73	260.3	189.1	129.19	104.32	98.7	108.84	114.5	116.75	132.6	208.31
خوزستان Khuzestan	کارون Karoon (R3)	225.8	191.5	120.6	92.83	76.7	67.62	59.1	64.7	92.52	105	140.13	163.25

*با درنظرگرفتن سالانه MCM ۷۵۰ انتقال بین‌حوضه‌ای آب از سرشاخه‌های رودخانه کارون شمالی واقع در استان چهارمحال‌بختیاری

جدول ۳- متوسط دبی ماهانه رودخانه‌ها (I_i^t) در هر استان (MCM) (۵۷).

Table 3. Average monthly river flow volume (I_i^t) in each province (MCM) (57).

اسفند Feb-Mar	بهمن Jan- Feb	دی Dec- Jan	آذر Nov- Dec	آبان Oct- Nov	مهر Sep-Oct	شهریور Aug- Sep	مرداد Jul- Aug	تیر Jun- Jul	خرداد May- Jun	اردیبهشت Apr- May	فروردین Mar-Apr	استان Province
129	62	48	46	41	32	37	59	112	175	255	226	اصفهان* Esfahan
1696	1407	1055	934	662	637	686	795	1003	1332	2093	2393	چهارمحال بختیاری** Chaharmahal Bakhtiari
1567	1345	1007	888	621	567	649	736	891	1157	1838	2167	خوزستان*** Khuzestan

* داده‌ها بر اساس میزان دبی متوسط ماهانه ورودی به سد زاینده‌رود در ایستگاه آب‌سنجی قلعه شاهرخ (دوره ۱۰ ساله)

** میزان حجم متوسط بارش در استان سالانه ۷۸۵۰ میلیون‌مترمکعب است. حجم آب خروجی از استان چهارمحال بختیاری و ورودی به استان‌های خوزستان و اصفهان با یکدیگر جمع گردید.

*** ورودی از رودخانه کارون شمالی (استان چهارمحال بختیاری) به سد کارون ۳

جدول ٤- مقادیر حداکثر و حداقل برداشت سالانه (R_{min}, R_{max}) و ذخیره‌سازی آب (S_{min}, S_{max}) توسط هر استان (MCM) (۵۷).

Table 4. Annual maximum and minimum values of water withdrawal (R_{min}, R_{max}) and storage (S_{min}, S_{max}) by each province (MCM) (57).

S_{min}	S_{max}	R_{min}	R_{max}	رودخانه River	استان Province
0	2267	0	881.91	کارون Karoon	چهارمحال‌بختیاری Chaharmahal Bakhtiari
		0	196	زاینده‌رود Zayandeh Rood	
0	1470	0	1393	زاینده‌رود Zayandeh Rood	اصفهان Esfahan
0	13806	0	8559.03	کارون Karoon	خوزستان Khuzestan

تابع هدف: هدف هر عامل i ام بیشینه‌سازی درآمد ناشی از مصرف آب (در بخش‌های گوناگون کشاورزی، صنعتی و خدمات) با یافتن بهترین سیاست برداشت ماهانه آب است. بر این اساس تابع هدف به صورت رابطه ۸ ارائه می‌گردد (۱):

$$\text{Max} \sum_{j=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} b_i^t \times R_{ij}^t \qquad (۸)$$

در رابطه ۸، b_i^t بهره‌وری ماهانه اقتصادی آب ناشی از هر واحد مصرف آب است که با استفاده از میزان ارزش افزوده در سه بخش کشاورزی، صنعت و خدمات در استان‌های مورد مطالعه برآورد و در جدول ۱ ارائه‌شده است. در این پژوهش، به منظور برآورد دقیق‌تر درآمد حاصل از تخصیص بهینه منابع آب، به جای استفاده از تعرفه‌های مصوب آب‌بها که توسط نهاد قانون‌گذار تعیین می‌شوند، از بهره‌وری اقتصادی آب بهره گرفته‌شده‌است. دلیل این انتخاب آن است که تعرفه‌های قانونی، عمدتاً بر پایه ملاحظات اجتماعی و سیاست‌های حمایتی تنظیم می‌شوند و بنابراین بیانگر قیمت واقعی آب و ارزش افزوده‌ای که آب ایجاد می‌کند، نیستند. به‌ویژه در بخش‌های کشاورزی و خانگی، این تعرفه‌ها به طور چشمگیری کم‌تر از هزینه واقعی تأمین، انتقال و توزیع آب هستند و نمی‌توانند بازتاب‌دهنده‌ی کمیابی فزاینده منابع آب در شرایط کنونی کشور باشند. در مقابل، بهره‌وری اقتصادی آب نمایانگر ارزش اقتصادی آب و ارزش نهایی آن در بخش‌های تولید و خدمات است. از این‌رو، به‌کارگیری این مقدار در تابع هدف بهینه‌سازی، موجب می‌شود که مدل از چارچوب قیمت‌های یارانه‌ای فاصله گرفته و کارایی تخصیص منابع را براساس ارزش واقعی اقتصادی و زیست‌محیطی آب ارزیابی نماید. R_{ij}^t میزان آب برداشتی استان بالادست i و استان پایین‌دست j از رودخانه ij در ماه t است (جدول ۲). زمانی‌که در انتهای رودخانه استانی وجود نداشته‌باشد متغیر j که معرف استان‌های پایین دست است از رابطه حذف می‌شود و N تعداد رودخانه‌ها پایین‌تر از استان i (استان بالادست) است (۱).

محدودیت‌های اصلی بهینه‌سازی: محدودیت رابطه ۹ برای بقای جرم اعمال می‌شود. در رابطه ۹، I_i^t مقدار جریان ورودی به استان i ام در ماه t ام (جدول ۳)، S_i^t حجم آب ذخیره‌شده در استان i ام در ماه t، ϑ_i^t تلفات آب در استان i ام در ماه t هستند (۱):

$$S_i^{t+1} = S_i^t - \sum_{j=1}^{N} R_{ij}^t + I_i^t - \vartheta_i^t + \sum_{j=1}^{N} R_{ij}^t \quad , \quad \forall i = 1 \dots N \;\&\; t = 1 \dots T \qquad (۹)$$

رابطه ۱۰ محدودیت مربوط به ذخیره‌سازی آب است. ذخیره‌سازی آب در هر استان در محدوده مشخصی توسط سدها نگهداری می‌شود. در رابطه ۱۰، $S_{i,min}$ و $S_{i,max}$ به ترتیب حداقل و حداکثر حجم آب ذخیره شده در استان i هستند (جدول ٤) (۱):

$$S_{i,min} \le S_i^t \le S_{i,max} \qquad (۱۰)$$

رابطه ۱۱ محدودیت مربوط به برداشت آب است و محدودیت‌های برداشت آب جهت محدود کردن حداکثر میزان برداشت آب توسط ذی‌نفعان (سه استان) و نیز تأمین حداقل جریان پایه زیست محیطی اعمال می‌شوند. در رابطه ۱۱، $R_{ij,Min}$ و $R_{ij,Max}$ به‌ترتیب حداقل و حداکثر حجم آب برداشت‌شده توسط استان i از رودخانه ij هستند (جدول ٤) (۱):

$$R_{ij,Min} \le \sum_{j=1}^{N} R_{ij}^t \le R_{ij,Max} \qquad (۱۱)$$

به صورت خلاصه در حالت همکاری کامل (RL تک عامله) در مرحله فرایند یادگیری عامل، انجام عمل a شامل برداشت آب از رودخانه (R_{ij}^t) توسط عامل است. عامل تنها از مجموعه اقدامات قابل قبول (امکان‌پذیر) تعریف‌شده توسط مدل ساز اقدام a را انجام می‌دهد. این عمل (اقدام a) یک بردار برداشت آب از رودخانه‌ها است. پس از آن می‌بایست پاداش فوری محاسبه گردد. با فرض اینکه عامل در وضعیت s است و با انجام عمل a (یک بردار از R_{ij}^t) به حالت s' می‌رود، بازخورد عمل a در وضعیت s $(r_{ss'}^t)$ محاسبه می‌شود. بر این اساس محاسبه پاداش فوری با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می گردد (۱):

$$r_{ss'}^t = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} b_i^t \times R_{ij}^t \qquad (۱۲)$$

اگر تصمیم اتخاذ شده توسط عامل در مرحله انجام اقدام a قابل اجرا نباشد، عامل پاداش کاملی دریافت نمی‌کند. به عبارت دیگر، پاداش واقعی کم‌تر از پاداش درک شده خواهد بود. به عنوان‌نمونه، اگر عامل تصمیم بگیرد بیش از میزان حجم رودخانه (تمام آب موجود) برداشت کند، عامل تنها برای برداشت حجم موجود آب در رودخانه پاداش دریافت می‌کند که کم‌تر از پاداش درک‌شده برای اتخاذ سیاست قبلی کم‌تر خواهد بود. بر اساس این بازخورد، عامل یاد می‌گیرد که هر زمان که در حالت بهره‌برداری براساس تصمیم‌های گذشته تصمیم می‌گیرد، در مقابل حالت جست‌جوی تصادفی که بازخورد قبلی را نادیده می‌گیرد، از استراتژی‌های برداشت آب غیرقابل اجرا در سال‌ها/اپیزودهای آینده اجتناب کند. بر اساس بازخورد دریافت شده در هر مرحله، عامل مقدار تابع ارزش حالت- عمل (*Q-Values*) خود را را با استفاده از رابطه ۱۳ به روز می‌کند (٤٩):

$$Q_{new}^t(s,a) = Q_{old}^t(s,a) + \alpha \times \left[r_{ss'}(a) + \gamma\, max_{b\in A(S')} Q_{old}^{t+1}(s',b) - Q_{old}^t(s,a)\right] \qquad (۱۳)$$

در رابطه ۱۳ بالانویس‌های t و $t+1$ به ترتیب به ماه جاری و ماه بعد اشاره دارند و زیرنویس‌های *new* و *old* به ترتیب به سال جاری و سال قبل اشاره دارند. به عنوان مثال، ترکیب $t+1$، *old* مربوط به ماه بعدی در سال قدیم (قبلی) است. دیگر پارامترها در رابطه ۱ معرفی شدند. در این مورد برای اطمینان از همگرایی مناسب مدل، ضریب γ =۰/۷ و ۰/۱≤ ε ≤۰/۹ در نظر گرفته‌شد. سپس عامل سیاست خود را (تصمیم برای برداشت آب) برای حالت s با استفاده از ارزش Q به روز شده در مرحله زمانی t، از رابطه ١٤ به روز می‌کند (٤٨):

$$\pi^t(s) = arg\, max_a Q^t(s,a) \qquad (١٤)$$

لازم به ذکر است که سیاست عامل در یک مرحله زمانی معین، بهترین بردار برداشت آب از رودخانه‌های کنترل شده توسط تک عامل بر اساس بردارهای مختلف حجم آب در رودخانه‌ها در آن مرحله زمانی است. در این مورد، سیاست عامل بهترین سطوح برداشت آب از دو رودخانه در سه استان را برای هر ترکیب منحصربه‌فرد سطوح ذخیره‌سازی و حجم آب قابل‌برداشت در هر استان مشخص می‌کند.

در حالت همکاری جزئی (ائتلاف های کوچک)، وضعیت عامل ۱ بردار حجم آب رودخانه‌های زاینده‌رود و کارون و عمل آن بردار برداشت آب از این دو رودخانه است. حالت و عمل عامل ۲ نیز بردار

حجم آب رودخانه زاینده‌رود و برداشت از آن است. حداکثر درآمد قابل حصول دو طرف در تعادل نش غیرهمکارانه رخ‌می‌دهد که در آن هر دو طرف از استراتژی‌های تابع بهترین پاسخ خود استفاده می‌کنند. فرایند یادگیری مانند شرایط همکاری کامل میان ذی‌نفعان است. تنها تفاوت این است که در اینجا دو عامل وجود دارد. در این حالت، روند یادگیری عوامل شامل ۵۰۰۰ اپیزود است که هر اپیزود شامل ۱۰۰ سال شبیه‌سازی است. عامل ۱ اقدام a_1 را که بردار برداشت آب از رودخانه ها است، انجام می‌دهد. در همان زمان، عامل ۲ اقدام a_2 را انجام می‌دهد که برداشت آب از رودخانه استان غیرهمکار است. اقدامات بر اساس روش $\varepsilon - greedy$ که پیش‌تر توضیح داده‌شد، انجام می‌شوند. برای محاسبه پاداش فوری، با فرض این‌که عامل i در وضعیت S_i است و با انجام اقدام a_i به وضعیت S'_i می‌رود، بازخورد اقدام a_i $\left(r^t_{i,s_i s'_i}\right)$ با استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود (۱):

$$r^t_{i,s_i s'_i} = \begin{cases} \sum_{j=1,3} b^t_i \times R^t_{ij}, & i = 1 \\ \sum_{j=2} b^t_i \times R^t_{ij}, & i = 2 \end{cases} \quad (۱۵)$$

با محاسبه بازخورد عامل در مرحله قبل، هر عامل i تابع ارزش Q خود را با استفاده از **Error! Reference source not found.** به روز می‌کند (۴۹):

$$Q^t_{i_{new}}(s_i, a_i) = Q^t_{i_{old}}(s_i, a_i) + \alpha \times \left[r^t_{i,s_i s'_i}(a_i) + \gamma \, max_{b \in A(s'_i)} Q^{t+1}_{i_{old}}(s'_i, b) - Q^t_{i_{old}}(s_i, a_i)\right], \quad \forall i \quad (۱۶)$$

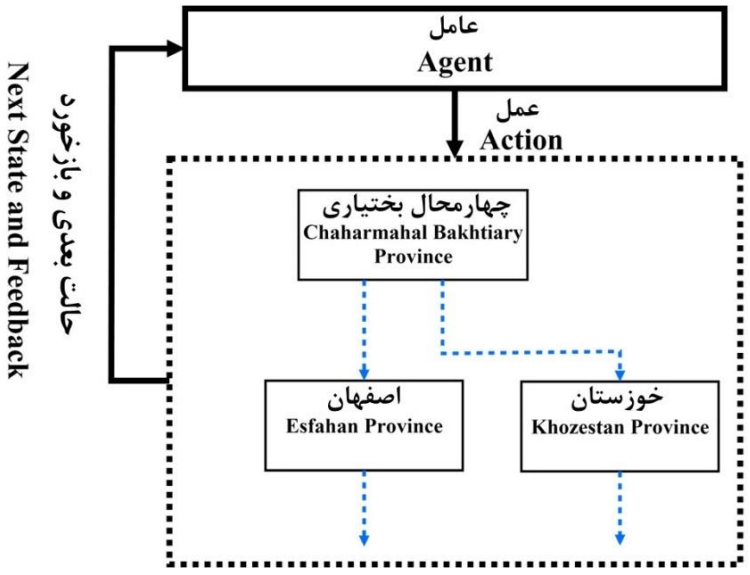
در این حالت برای اطمینان از همگرایی مناسب مدل، نرخ تخفیف γ =۰/۷ و مقدار ε به صورت خطی از مقدار ۰/۹ در اپیزود ۱ به مقدار ۰/۱ در اپیزود ۵۰۰۰، تنظیم شدند. در نهایت با استفاده از ارزش Q به‌روزشده، سیاست هر عامل با استفاده از رابطه ۱۷ به روز می‌شود (۴۸):

$$\pi^t_i(s_i) = arg\, max_a Q^t(s_i, a), \quad \forall i \quad (۱۷)$$

نتایج و بحث

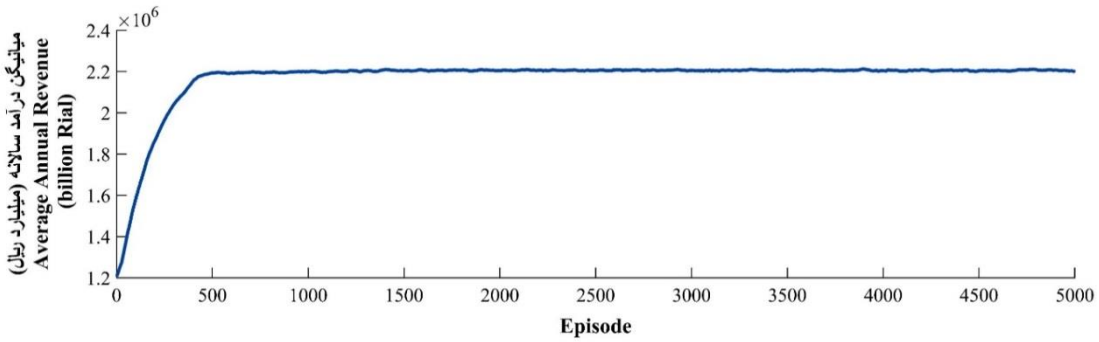
ایجاد ائتلاف بزرگ میان سه استان (همکاری کامل میان ذی‌نفعان): روش‌های مرسوم بهینه‌سازی در منابع آب، معمولاً سیستم را در حالت همکاری کامل میان همه ذی‌نفعان بهینه می‌کنند (۵۸). مفروض ذاتی این نوع برنامه‌ریزی بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی–اقتصادی سیستم براساس کنش جمعی و همکاری کامل (تشکیل ائتلاف بزرگ) میان همه ذی‌نفعان است. بنابراین در این حالت، برنامه‌ریز منابع آب فرض می‌کند که طرفین مایل به همکاری کامل بر اساس عقلانیت گروهی هستند تا کل منافع سیستم را به حداکثر برسانند (۴۴). کاربردهای پیشین RL در برنامه ریزی سیستم‌های منابع آب نیز، مزایا را در حالت همکاری کامل به حداکثر می‌رساند و یک عامل را مسئول کل سیستم قرار می‌دهد (۱). برای محاسبه کل منافع قابل حصول توسط ائتلاف بزرگ، فرض می‌شود که سیستم حوضه‌های مورد مطالعه توسط یک عامل اجرا می‌شود که تلاش می‌کند مزایای کل سیستم را به حداکثر برساند (شکل ٤). در حالت تشکیل ائتلاف بزرگ {CHB, KHZ, ESF}، وضعیت عامل شامل حجم آب رودخانه‌های کارون شمالی و زاینده‌رود و عمل آن بردار برداشت آب از این رودخانه‌هاست.

در این حالت تعداد اپیزودهای یادگیری ۵۰۰۰ اپیزود تعیین شد که هر اپیزود شامل ۱۰۰ سال شبیه‌سازی است. در ابتدا یعنی اپیزود ۱، یادگیری عامل از طریق ۱۰۰ سال شبیه‌سازی شروع می‌شود. سپس در اپیزود ۲، سیستم به حالت اولیه جدید (تصادفی) بازنشانی‌شده و فرایند یادگیری عامل برای ۱۰۰ سال دیگر ادامه می‌یابد. این روند تا پایان ۵۰۰۰ اپیزود تکرار می‌شود. انتخاب تعداد اپیزودهای موردنیاز و مراحل شبیه‌سازی یکی از مراحل تنظیم مدل RL است. به‌طورکلی وقتی محدودیتی در هزینه و زمان محاسبات مدل وجود نداشته‌باشد، اپیزودها و دوره‌های شبیه‌سازی طولانی‌تر مطلوب‌تر هستند (۱). تعداد و طول دوره‌های یادگیری بر اساس مدل‌های اولیه (اکتشافی) انتخاب می‌شوند و می‌بایست به میزانی انتخاب شوند که از همگرایی راه‌حل بهینه اطمینان حاصل گردد. در این پژوهش، اجرای مدل اکتشافی نشان داد که ۵۰۰۰ اپیزود برای همگرایی مدل RL در حالت مدل‌سازی تک عامله (همکاری کامل) کافی است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره گردید، در این پژوهش از سیاست $\varepsilon - greedy$ به عنوان روش اقدام اکتشافی برای بهبود فرآیند یادگیری عامل استفاده شده‌است. در اینجا فرض گردید که ε به‌صورت خطی از مقدار ۰/۹ در اپیزود ۱ به مقدار ۰/۱ در اپیزود ۵۰۰۰ کاهش می‌یابد زیراکه عامل در طی دوره‌های یادگیری تجربه بیش‌تری کسب می‌کند. درنهایت در پایان هر اپیزود عملکرد سیاست عامل ارزیابی می‌شود. برای این کار و اطمینان از این‌که شرایط اولیه تأثیری بر عملکرد سیاست ندارد، شبیه‌سازی‌ها تا زمانی که درآمد سالانه تقریباً ثابت شود ادامه می‌یابد. شکل ۵ منحنی یادگیری عامل را در حالت تشکیل ائتلاف بزرگ را نشان می‌دهد. این منحنی چگونگی تغییر عملکرد سیاست انتخاب‌شده توسط عامل در هر اپیزود را نشان می‌دهد. در صورت تشکیل ائتلاف بزرگ (همکاری کامل میان ذی‌نفعان)، عامل می‌تواند سیاستی را ایجاد نماید که منجر به درآمد متوسط سالانه ۲۳۲٤۰۳۲/۹۱ میلیارد ریال گردد.



شکل ٤- شماتیک مدلسازی سیستم به صورت تک عامل (ائتلاف بزرگ).

Figure 4. Schematic of single-agent system modeling (grand coalition).



شکل ۵- منحنی یادگیری عامل در حالت همکاری کامل میان ذی‌نفعان (ائتلاف بزرگ).

Figure 5. The agent's learning curve in the case of full cooperation among stakeholders (grand coalition).

در جدول ۵ نتایج مربوط به بهینه سازی کل سیستم (ائتلاف بزرگ) ارائه شده‌است. همانگونه که ملاحظه می‌شود در روش‌های بهینه‌سازی مرسوم بدون توجه به منفعت شخصی طرفین (عقلانیت فردی) تنها منافع کل سیستم بیشینه می‌گردد (عقلانیت جمعی) که این نقطه ضعف اصلی اینگونه روش‌هاست. بنابراین به‌کارگیری راه‌حل‌های نظریه بازی همکارانه می تواند در بازتوزیع منافع کل سیستم به روشی کارا و عادلانه مؤثر باشد که علاوه بر در نظر گرفتن عقلانیت جمعی به عقلانیت فردی نیز توجه داشته باشد. هدف اصلی این مطالعه نیز به‌کارگیری چهارچوب CGT-RL برای این منظور است. زیرا بدون توجه به منافع منفردی تک‌تک ذی‌نفعان، همکاری کامل بین آن‌ها شکل نخواهد گرفت و یا ناپایدار خواهد بود.

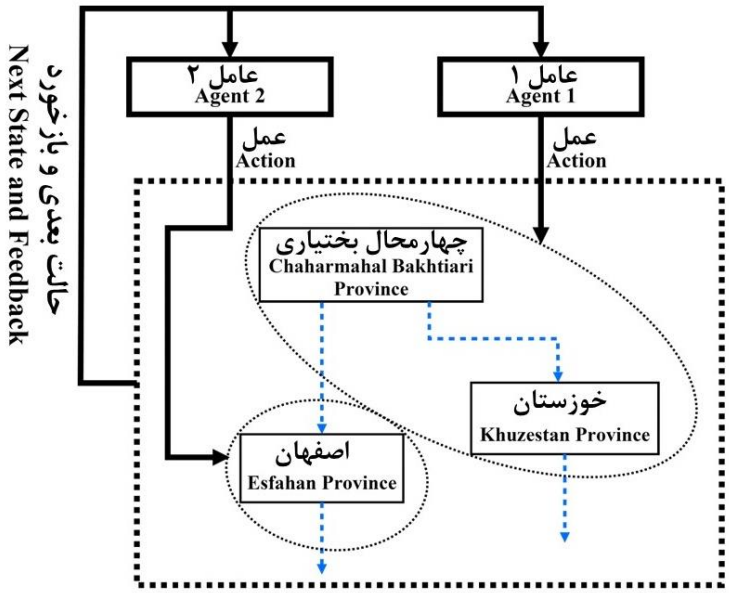
جدول ۵- مقادیر درآمدهای برآورد شده در حالت همکاری کامل (روش بهینه‌سازی کل سیستم).

Table 5. Estimated revenues in full cooperation mode (system optimization method).

استان Province	درآمد متوسط سالانه (میلیارد ریال)	درصد سهم از کل درآمد
چهارمحال بختیاری (CHB)	179,054.8	7.7
اصفهان (ESF)	1,641,776.17	70.64
خوزستان (KHZ)	503,201.94	21.65
بهینه‌سازی کل سیستم (Single agent-RL)	2,324,032.91	100

تشکیل ائتلاف‌های کوچک ذی‌نفعان: در غیاب تشکیل ائتلاف بزرگ، ذی‌نفعان ممکن است ائتلاف‌های کوچک تشکیل‌داده و یا به‌صورت انفرادی عمل کنند؛ بنابراین لازم است که درآمدهای قابل حصول همه ائتلاف‌های ممکن در بازی را محاسبه نمود. برای یافتن مزایای قابل‌حصول تحت ائتلاف‌های کوچک، باید راهبردهای بهترین پاسخ طرفین همکار و غیر همکار شناسایی شود. باتوجه‌به این‌که یک ائتلاف حداقل به دو عضو نیاز دارد، در مورد این پژوهش، تنها یک ائتلاف کوچک (دو استان) در یک‌زمان امکان‌پذیر است. در این حالت، فرض بر این است که یک عامل استان‌ها و رودخانه‌های متعلق به

اعضای ائتلاف را اداره کرده و عامل دیگر استان غیرهمکار را اداره می‌کند؛ بنابراین مسأله دارای دو عامل است. به‌عنوان‌مثال عامل ۱ مسئول ائتلاف {CHB, KHZ} که نشان‌دهنده ایجاد ائتلاف کوچک دو استان چهارمحال‌بختیاری و خوزستان است و عامل ۲ به استان اصفهان یعنی ائتلاف {ESF} اختصاص دارد (شکل ٦). عامل ۱ درآمد کلی ائتلاف {CHB, KHZ} را به حداکثر می‌رساند، درحالی‌که عامل ۲ (عامل غیرهمکار) درآمد استان غیرهمکار {ESF} را از محل برداشت رودخانه زاینده‌رود به حداکثر می‌رساند. عامل ۱ و ۲ استراتژی‌های تابع بهترین پاسخ خود را در طول زمان در محیطی رقابتی توسعه می‌دهند. در ادامه فرایند یادگیری در حالت تشکیل ائتلاف کوچک برای ائتلاف‌های {CHB, ESF} {KHZ}، {CHB, KHZ} {ESF} و {KHZ, ESF} {CHB} شبیه‌سازی شد. برای اطمینان از این‌که شرایط اولیه تأثیری بر عملکرد سیاست‌ها ندارد، شبیه‌سازی‌ها تا زمانی که درآمدهای سالانه تقریباً ثابت شود ادامه می‌یابند. مجموع درآمد متوسط سالانه استان‌های چهارمحال‌بختیاری و خوزستان در طول دوره شبیه‌سازی به‌عنوان معیار عملکرد برای عامل ۱ در نظر گرفته می‌شود تا عملکرد سیاست بهره‌برداری خود را ارزیابی کند و میانگین درآمد سالانه استان اصفهان در طول دوره شبیه‌سازی توسط عامل ۲ برای ارزیابی عملکرد سیاست بهره‌برداری استفاده می‌شود. شکل ۷ منحنی‌های یادگیری عوامل را تحت ائتلاف‌های کوچک گوناگون نشان می‌دهد.



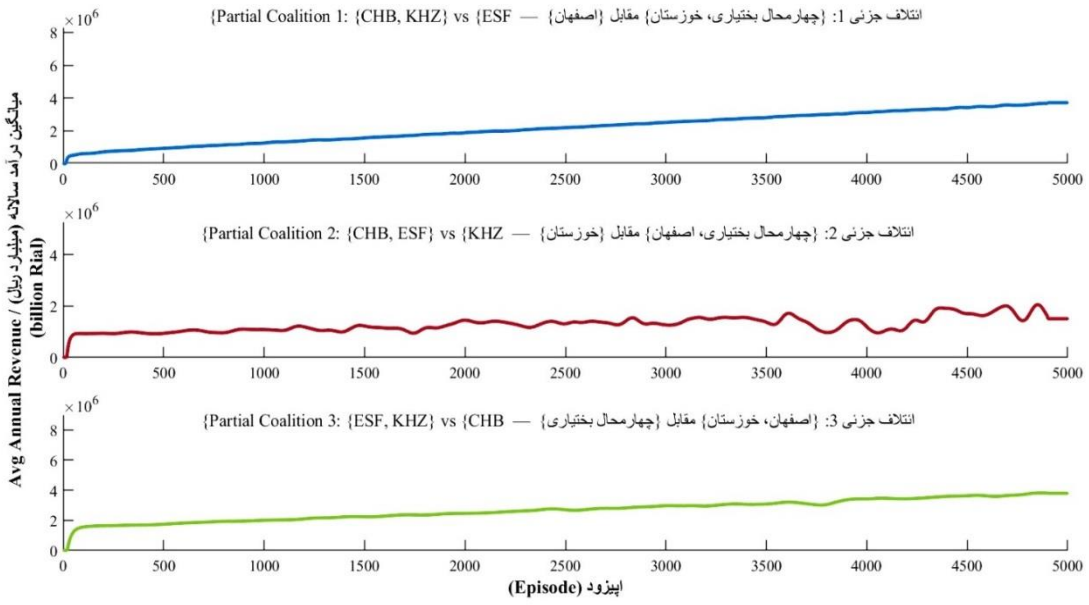
شکل ٦- شماتیک مدل‌سازی دو عامله تشکیل ائتلاف کوچک استان‌های چهارمحال بختیاری و خوزستان در برابر استان اصفهان.

Figure 6. Schematic of a two-agent model depicting partial coalitions of Chaharmahal-Bakhtiari and Khuzestan provinces against Isfahan province.

درآمد قابل حصول هر استان از طریق ائتلاف‌های کوچک در جدول ٦ ارائه شده‌است. در ائتلاف {CHB, KHZ}{ESF}، عامل ۱ و ۲ در مجموع سیاستی با میانگین کل درآمد سالانه ١٦٥١٣١١/٤٠ میلیارد ریال برای استان‌های ذی‌نفع پیدا کرده‌اند که ۷۱ درصد از کل مزایای قابل‌حصول در حالت ائتلاف بزرگ را شامل می‌شود. ائتلاف کوچک {CHB, ESF}{KHZ} منجر به میانگین درآمد

سالانه ۱۱۷٤۰۳٤/۵۱ میلیارد ریال برای ذی‌نفعان می شود که ۵۱ درصد از کل مزایای قابل‌حصول در حالت همکاری کامل است. کل درآمد به دست آمده در ائتلاف کوچک {KHZ, ESF}{CHB} سالانه ۱۳۸۷۷٦۸/۳۲ میلیارد ریال محاسبه می‌گردد که ٦۰ درصد از کل مزایای قابل‌حصول در حالت همکاری کامل ذی‌نفعان است. نتایج یادگیری عامل تحت سایر ائتلاف‌های کوچک به صورت مشابه ارزیابی می‌شوند. بیش‌ترین درآمد ناشی از همکاری جزئی مربوط به حالت {CHB, ESF}{KHZ} و کم‌ترین درآمد مربوط به حالت {CHB, ESF}{KHZ} است. به‌طورکلی اختلاف درآمدها در حالت‌های گوناگون همکاری جزئی نسبت به همکاری کامل (بهینه‌سازی کل سیستم) حدود ۳۰٪ کاهش را نشان می دهد که این نشان‌دهنده مزیت هم‌افزایی بالا در همکاری سه‌جانبه است.

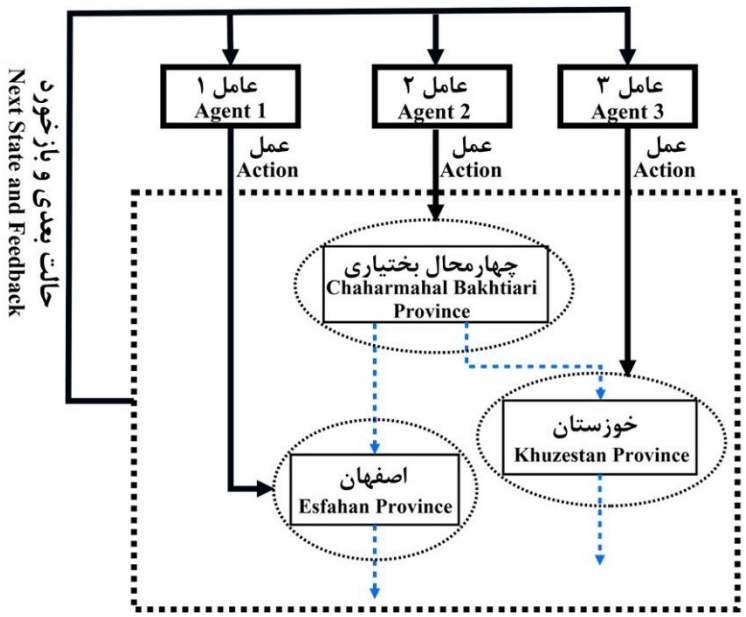
حالت غیرهمکارانه (عدم تشکیل ائتلاف میان ذی‌نفعان): در حالت غیرهمکاری (وضع موجود)، سه عامل (سه استان) به‌صورت مستقل با اتخاذ تصمیمات ناهماهنگ، سیستم را در یک محیط رقابتی اداره می‌کنند. در این حالت هر عامل تنها مسئول یک استان است (شکل ۸). فرایند یادگیری دقیقاً مشابه فرایندی است که برای ائتلاف‌های کوچک توضیح داده‌شد. تنها تفاوت این است که در این مورد سه عامل به‌جای دو عامل وجود دارند که به‌طور هم‌زمان تصمیم می‌گیرند. اقدام عامل i برداشت آب از رودخانه ij و حالت آن حجم آب رودخانه است. فرایند یادگیری در این شرایط شامل ۵۰۰۰ اپیزود و هر اپیزود شامل ۱۰۰ سال است. مقدار ضریب (γ) برای اطمینان از همگرایی ۰/۷ در نظر گرفته‌شد.



شکل ۷- منحنی‌های یادگیری تحت ائتلاف‌های کوچک.

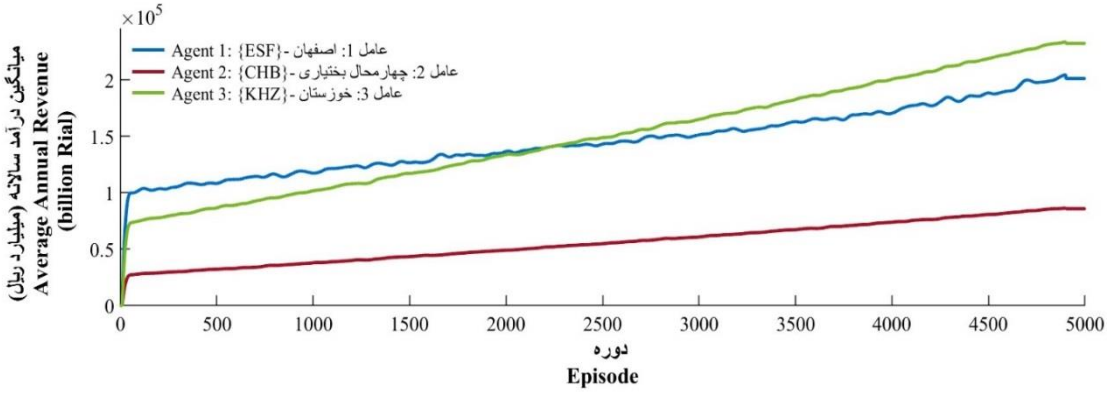
Figure 7. Learning curves under partial coalitions.

شکل ۹ منحنی‌های یادگیری سه عامل را در حالت غیرهمکاری نشان می‌دهد. عوامل ۱، ۲ و ۳ یعنی {ESF}، {KHZ} و {CHB} موفق شدند در تعادل نش غیرهمکاری تابع بهترین پاسخ، سیاست‌هایی را ایجاد کنند که به ترتیب منجر به درآمد متوسط سالانه ٤٧٨٧٦٥/٧٢، ٤٢١٧٩١/٣٣ و ١٥٦٨٨١/٣٩ میلیارد ریال گردید. میانگین درآمد سالانه کل سیستم در این حالت ١٠٥٧٤٣٨/٤٥ میلیارد ریال است که حدود ٤٦ درصد از کل درآمد قابل‌حصول در شرایط همکاری کامل میان ذی‌نفعان (تشکیل ائتلاف بزرگ) است.



شکل ۸- شماتیک مدل‌سازی سیستم چندعامله برای حالت غیرهمکارانه (عدم تشکیل ائتلاف میان ذی‌نفعان).

Figure 8. Schematic of multi-agent system modeling for non-cooperative mode (no coalition formation between stakeholders).



شکل ۹- منحنی‌های یادگیری سه عامل در حالت غیرهمکارانه (عدم تشکیل ائتلاف).

Figure 9. Three-agent learning curves in the non-cooperative mode (no coalition formation between stakeholders).

جدول ٦ میانگین درآمد قابل حصول سالانه هر استان را در سطوح مختلف همکاری نشان می‌دهد. حداکثر درآمد کل تحت ائتلاف بزرگ (همکاری کامل) به‌دست می‌آید و زمانی امکان‌پذیر است که استراتژی‌های بهره‌برداری تمام ذی‌نفعان با یکدیگر هماهنگ باشند. در این حالت، کل درآمد قابل‌حصول سیستم ٥٤ درصد از حالت غیرهمکاری (وضعیت موجود سیستم) بیش‌تر است که در آن استراتژی‌های بهره‌برداری ناهماهنگ هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود میزان اختلاف مزایای افزایشی قابل‌حصول در حالت همکاری کامل (بهینه پرتو) و عدم همکاری (تعادل نش) زیاد است اما با این وجود در دنیای واقعی ذی‌نفعان به سمت عدم همکاری انگیزه پیدا می‌کنند زیرا در حالت برنامه‌ریز اجتماعی فقط مزایای کل سیستم بدون توجه به منافع طرفین درگیر افزایش می‌یابد. در واقع اگر ائتلاف بزرگ نتواند پایدار بماند به احتمال خیلی زیاد ذی‌نفعان به سمت عدم‌همکاری با یکدیگر سوق پیدا می‌کنند. بنابراین راه‌حل‌های بازی همکارانه می‌تواند به بازتوزیع عادلانه و کارای مزایای افزایشی ناشی از همکاری میان ذی‌نفعان (راه‌حل بهینه‌سازی مرسوم) کمک نماید. ائتلاف‌های کوچک نیز بسته به این‌که کدام بهره‌برداران با یکدیگر ائتلاف را تشکیل می‌دهند، می‌تواند منجر به برخی سودهای افزایشی شود. با نگاهی به مزایای قابل‌حصول هر استان تحت سطوح گوناگون همکاری، می‌توان دریافت که چرا ممکن راه حل‌های بهینه‌سازی مرسوم (بهینه‌سازی کل سیستم) در عمل پایدار نماند (٤٤). همان‌گونه که از مقایسه نتایج ارائه‌شده در جدول ٦ مشاهده می‌گردد، تفاوت زیادی در میزان درآمد حالت عدم‌همکاری نسبت به همکاری کامل وجود دارد اما در حالت بهینه‌سازی کل سیستم (رویکرد برنامه ریز اجتماعی) مزایای ذی‌نفعان به‌طور عادلانه توزیع نمی‌گردد (جدول ٥). در روش‌های بهینه‌سازی مرسوم، برنامه ریز هنگام بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی کل سیستم، نگران دستاوردها و منافع تک‌تک طرفین نیست زیرا هدف اصلی برنامه‌ریز اجتماعی به حداکثر رساندن مزایای کل سیستم بدون توجه به نحوه توزیع آن میان افراد است. در حالت بهینه‌سازی کل سیستم (فرض همکاری کامل استان‌ها)، استان اصفهان حدود ۷۰ درصد از مزایای سیستم را به خود اختصاص داده‌است درحالی‌که استان چهارمحال‌بختیاری تنها حدود ۸ درصد و خوزستان حدود ۲۲ درصد از مزایای همکاری را دریافت می‌کند (جدول ٥). بنابراین استفاده از روشی که بتوان این مزایای افزایشی را به‌صورت عادلانه و کارا میان ذی‌نفعان بازتوزیع نمود، لازم و ضروری است. راه‌حل‌های گوناگون CGT می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب برای بازتوزیع مزایای ناشی از همکاری، مورد استفاده قرار گیرند.

جدول ٦- درآمد قابل‌حصول برای هر استان در سطوح مختلف همکاری (میلیارد ریال).

Table 6. Obtainable revenue for each province at different levels of cooperation (billion Rial).

مدل بهینه‌سازی Optimization model	ائتلاف‌ها Coalitions	درآمد سالانه Annual Revenue			کل درآمد سالانه Total annual revenue	درصد از کل درآمد قابل‌دستیابی % of total achievable revenue
		چهارمحال بختیاری Chaharmahal Bakhtiari	اصفهان Esfahan	خوزستان Khuzestan		
یادگیری تقویتی - سه عاملی RL - Three agents	{ESF}، {KHZ}، {CHB}	156,881.39	478,765.72	421,791.33	1,057,438.45	46
یادگیری تقویتی - دوعاملی RL - Two agents	{ESF}، {CHB, KHZ}	156,697.75	1,016,054.33	478,559.29	1,651,311.40	71
	{KHZ}، {CHB, ESF}	131,255.87	864,726.60	178,052.04	1,174,034.51	51
	{CHB}، {KHZ, ESF}	98,386.40	793,773.30	495,608.64	1,387,768.32	60
یادگیری تقویتی - تک عامل RL - Single Agent	{CHB, KHZ, ESF}	179,054.80	1,641,776.17	503,201.94	2,324,032.91	100

تخصیص‌های نظریه بازی همکارانه: اگر انتقال مطلوبیت‌ها بین ذی‌نفعان امکان‌پذیر باشد (بازی TU)، پرداخت‌های جانبی ممکن است مشوق‌های لازم همکاری را برای پایداری ائتلاف بزرگ (تک عاملی) را ایجاد نماید (۱). این حالت، چالش اصلی یافتن میزان عادلانه و کارآمد پرداخت‌های جانبی است. روش‌های حل CGT می‌توانند این چالش را برطرف کنند و به تعیین تخصیص سهم مناسب ذی‌نفعان از مزایای همکاری کمک کنند. برای محاسبه این سهم‌ها، راه‌حل‌های CGT نه تنها باید درآمدهای طرف‌های درگیر تحت شرایط موجود (عدم همکاری) را در نظر بگیرند، بلکه باید درآمد آن‌ها در ائتلاف‌های کوچک و میزان مشارکت آن‌ها در ائتلاف‌های بزرگ و جزئی را نیز در نظر بگیرند. همان‌طورکه در بخش‌های پیشین توضیح داده‌شد، درحالی‌که گردآوری این اطلاعات در مسائل چندمرحله‌ای- چندعاملی چالش‌برانگیز است، می‌توان از RL برای دستیابی به این اطلاعات کمک گرفت (جدول ٦). بنابراین راه‌حل‌های *CGT* توضیح داده‌شده می‌توانند برای محاسبه تخصیص عادلانه و کارآمد منافع تحت شرایط همکاری کامل استفاده شوند. جدول ۷ سهم پیشنهادی ذی‌نفعان همکار از ائتلاف بزرگ را بر اساس روش‌های نش- هارسانی، ارزش شپلی و نوکلئولوس ارائه می‌دهد. میزان پرداخت‌های جانبی را می‌توان براساس این راهکارها محاسبه کرد به گونه‌ای که ذی‌نفعان را متقاعد کند که به جای عدم‌همکاری یا تشکیل ائتلاف‌های جزئی در ائتلاف بزرگ بمانند. براساس مقادیر بازتوزیع درآمد با استفاده از روش‌های بازی همکارانه (جدول ۷) همان‌گونه که مشاهده می‌گردد سهم استان چهارمحال‌بختیاری از حدود ۷ درصد در حالت بهینه‌سازی کل سیستم به حدود ۲۵ درصد، سهم خوزستان از حدود ۲۰ درصد به حدود ۳٦ و سهم استان اصفهان که به دلیل صنعتی‌بودن، بهره‌وری اقتصادی آب آن نیز بالاتر است از حدود ۷۰ درصد به حدود ٤۰ درصد کاهش یافت.

جدول ۷- سهم طرفین همکار از ائتلاف بزرگ بر اساس روش‌های نظریه بازی همکارانه (میلیارد ریال).

Table 7. Share of the cooperating parties from the grand coalition based on cooperative game theory methods (billion Rial).

راه‌حل‌های بازی همکارانه CGT Solutions	درآمد سالانه ذی‌نفعان (استان) Annual revenue of beneficiaries (province)			جمع کل Total	درصد سهم هر استان % of province's share		
	چهارمحال بختیاری CHB	اصفهان ESF	خوزستان KHZ		چهارمحال بختیاری CHB	اصفهان ESF	خوزستان KHZ
نش - هارسانی Nash-Harsanyi	579,079.55	900,963.88	843,989.49	2,324,032.91	24.92	38.77	36.31
ارزش شپلی Shapley value	518,957.86	1,006,962.48	798,112.57	2,324,032.91	22.33	43.33	34.33
نوکلئولوس Nucleolus	590,311.69	886,626.26	847,094.96	2,324,032.91	25.4	38.15	36.45

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش از چارچوب جدیدی که توسط مدنی و هوشیار (۱) برای توسعه راه‌حل‌های همکارانه برای افزایش کارایی مسائل مدیریت آب چندمرحله‌ای چندعاملی پیشنهاد شده‌است، به‌صورت عملی و برای یک مسئله واقعی استفاده می‌کند. این چارچوب، یادگیری تقویتی (RL) و نظریه بازی همکارانه (CGT) را ترکیب می‌کند تا به دو نقطه‌ضعف اصلی رویکردهای غالب در پژوهش‌های پیشین برای به حداکثر رساندن و توزیع مزایای سیستم‌های منابع آب دارای چند ذینفع بپردازد. اولین ضعف کاربرد متداول رویکردهای برنامه‌ریز اجتماعی حداکثرسازی کل مزایای سیستم بدون توجه به نحوه تقسیم آن بین ذینفعان است. درحالی‌که راه‌حل‌های حاصل از این رویکردها در حالت نظری جذاب هستند، اما پیاده‌سازی آن‌ها در عمل و در جهان واقعی دشوار است. زیرا روش‌های بهینه‌سازی مرسوم فرض می‌کنند که بین ذی‌نفعان یک سیستم همکاری کاملی وجود دارد و پویایی تصمیم‌گیری افراد و منفعت هر یک از آن‌ها را نادیده می‌گیرند. درواقع روش‌های مرسوم بهینه‌سازی، انگیزه‌های فردی برای تغییر رفتار براساس منفعت و عقلانیت فردی را در نظر نمی‌گیرند زیرا که در واقعیت افراد تصمیمات خود را بر پایه عقلانیت فردی و نه عقلانیت گروهی قرار می‌دهند. راه‌حل‌های بازی‌های همکارانه می‌توانند باعث فراهم شدن انگیزه‌های قوی در تصمیم‌گیران فردی و نیز تسهیل همکاری جهت دستیابی به راه‌حل بهینه گردند. بااین‌حال، به دست آوردن اطلاعات موردنیاز برای استفاده از راه‌حل‌های نظری بازی همکارانه بسیار چالش‌برانگیز است و می‌تواند ازنظر محاسباتی پیچیده باشد. این منجر به دومین ضعف کاربردهای نظریه بازی در مطالعات قبلی منابع آب شده است که فرضیات ساده کننده‌ای را در مورد مزایای دست‌یافتنی طرفین تحت سطوح مختلف همکاری شامل همکاری کامل، همکاری جزئی و عدم همکاری ایجاد می‌کردند (۱).

به‌کارگیری RL می‌تواند به درک پویایی رفتار دی‌نفعان در سیستم‌های تعاملی کمک کند. با ظرفیت محاسباتی و امکان اجرای الگوریتم یادگیری Q، می‌توان مسائل بسیار پیچیده‌تری را در یک‌زمان معقول حل کرد. ترکیب RL و CGT فرصتی را برای بررسی سیاست‌های هماهنگ فراهم می‌کند که علاوه‌بر بیشینه‌سازی منافع کل سیستم، تخصیص عادلانه مزایا را نیز در نظر می‌گیرد. سازوکار توزیع مزایا (درآمد) همکارانه منابع آب که در این پژوهش به‌کار گرفته شده است، کاربرد خوبی در مسأله

تخصیص و توزیع آب و مزایای حاصل از آن در حوضه‌های رودخانه‌ای دارای چند ذی‌نفع دارد و می‌تواند چهارچوبی مناسب برای تخصیص عادلانه و کارآمد آب و مزایای آن ارائه دهد. برای نشان دادن کاربرد چارچوب پیشنهادی برای مسائل مدیریت منابع آب چندمرحله‌ای - چندعاملی، روش CGT-RL برای تخصیص مزایای استفاده از آب دو حوضه کارون شمالی و زاینده‌رود بین سه استان ذی‌نفع شامل چهارمحال‌بختیاری، اصفهان و خوزستان اعمال شد. این چهارچوب توسط ارائه‌دهندگان آن به‌صورت کلی ارائه و برای یک مسأله فرضی به‌کار گرفته‌شد که در این مطالعه برای یک سیستم منابع آب بزرگ و در دنیای واقعی استفاده شد. طبق نتایج این پژوهش، سه استان ذی‌نفع می‌توانند مزایا (درآمد) از برداشت همکارانه آب را از دو رودخانه زاینده‌رود و کارون افزایش دهند. درآمد کل سیستم در حالت عدم همکاری (وضع موجود) حدود ۱۰۵۷٤۳۸/٤٥ میلیارد ریال است که در صورت همکاری کامل میان استان‌های ذینفع (ایجاد ائتلاف بزرگ) به حدود ۲۳۲٤۰۳۲/۹۱ میلیارد ریال افزایش می‌یابد. استان چهارمحال بختیاری سرمنشأ اصلی این دو رودخانه است، اما مزایای حاصل از برداشت و مصرف آب این استان کم‌تر از دو استان دیگر است. در صورت ایجاد همکاری کامل بین ذی‌نفعان و تشکیل ائتلاف بزرگ، درآمد بیش از وضعیت موجود (عدم همکاری) خواهد بود. بنابراین همکاری و ایجاد ائتلاف می‌تواند یک وضعیت عادلانه‌تری برای همه استان‌های ذی‌نفع به‌ویژه استان کم‌برخوردارتر فراهم می‌کند. ایجاد همکاری و توانمندسازی ذی‌نفعان از راه همکاری گروهی برای دستیابی به منافع خصوصی بیش‌تر، می‌بایست موضوع اصلی توسعه اجتماعی-اقتصادی جوامع باشد که مستلزم ایجاد یک محیط اجتماعی با ویژگی همبستگی، عدالت، تعادل و هماهنگی است. جهت بهره‌برداری پایدار از منابع ضروری است همکاری چندجانبه گسترش‌یافته و همان‌طور که میزان درآمد و مزایا بیش‌تر می‌شود باید برای دستیابی همه افراد جامعه به رفاه اجتماعی - اقتصادی، نحوه تقسیم عادلانه آن نیز مشخص گردد.

در مطالعاتی مانند موسوی و کارآموز (۱۷) و روزبهانی و همکاران (۵) که از روش‌های بهینه‌سازی مرسوم در برآورد و بیشینه کردن سود و مزایای سیستم‌های منابع آب استفاده نموده‌اند، تنها به منفعت جمعی کل سیستم پرداخته شده است که خود عاملی در جهت عدم حل مناقشات آبی است، زیرا در این مطالعات توجه به منفعت فردی طرف‌های درگیر و نحوه توزیع مزایا بین آن‌ها نشده است. بنابراین لازم است که مقدار بیشینه مزایا به نحوی عادلانه و کارآمد میان ذینفعان گوناگون سیستم‌های منابع آب توزیع گردد. طبق چهارچوب CGT-RL در این پژوهش، علاوه بر بیشینه کردن مزایا (درآمد) کل با استفاده از RL، به نحوه توزیع مزایای حاصل از همکاری کامل میان استان‌های ذینفع نیز با استفاده از CGT توجه گردیده که درواقع تلفیقی از عقلانیت گروهی و فردی (منفعت جمعی و شخصی) برای حل اختلاف است. با مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین در زمینه به‌کارگیری CGT برای توزیع منابع آب و سود/هزینه، مانند مطالعه سچی و همکاران برای تقسیم هزینه‌ها میان ذی‌نفعان سیستم آبخیز فلامندوسا-کمپیدانو (۵۹)، بازتخصیص منابع آب در حوضه رودخانه فرامرزی لانسنگ- مکونگ توسط لیو و همکاران (٦۰) نیز می‌توان نتیجه گرفت که لازمه پایداری سیستم‌های زیست‌محیطی، همکاری کامل میان ذی‌نفعان گوناگون است زیراکه حوزه‌های آبخیز مرزهای سیاسی نمی‌شناسند. به طور کلی این پژوهش نتیجه می‌گیرد که توانمندسازی تمام ذینفعان از طریق ایجاد همکاری گروهی (عقلانیت جمعی) برای

دستیابی به منافع خصوصی بیش‌تر (عقلانیت فردی) پاسخ و راهکاری مناسب برای حل مسائل اختلافات آبی است.

برای عملی‌شدن همکاری میان ذی‌نفعان، پیشنهاد می‌شود یک سازوکار مناسب برای توزیع و تقسیم مزایا میان استان‌های ذی‌نفع توسط نظام حکمرانی آب ایجاد گردد و نهاد مسئول در بخش آب با اتخاذ سیاست‌ها و مشوق‌هایی، همکاری را در سطح حوضه به‌طور پیوسته ترویج دهد. نهاد حکمرانی آب باید فرصتی برای مشاوره‌های فنی و تخصصی، ارتباطات و تبادل نظر میان استان‌های ذی‌نفع فراهم نماید که در آن ذی‌نفعان نقاط استراتژیک همگرایی تجارت حقوق آب بین یکدیگر را بررسی و همکاری در زمینه‌های مختلف مرتبط با آب را تسریع بخشند. استان‌ها تحت نظارت سیستم حکمرانی باید در شیوه‌های همکاری، از همکاری در مقیاس کوچک تا همکاری همه‌جانبه در سطح بالا، نوآور بوده و یک ائتلاف (اتحادیه) تجارت حقوق آب را برای تحقق استفاده کارآمد از منابع آب و نیز نحوه توزیع مزایای حاصل از آن تشکیل دهند. چهارچوب، سازوکار و قوانین مربوط به ایجاد اتحادیه میان استان‌ها در مناطق بالادست و پایین‌دست حوضه باید توسط نهاد مسئول حکمرانی آب تدوین گردیده و مسئولیت نظارت بر آن را نیز بر عهده داشته باشد. این چهارچوب و قوانین باید تضمین‌کننده این اصل باشند که همه ذی‌نفعان در این همکاری می‌توانند خودمدیریتی را تحت یک چشم‌انداز مشترک محقق کنند. البته لزوم ایجاد این اتحادیه (ائتلاف بزرگ میان استان‌ها) ایجاد و افزایش اعتماد متقابل میان آن‌ها است. تحقق این مهم مستلزم آن است که همه ذی‌نفعان صرف‌نظر از اندازه، قدرت و ثروت، از حق یکسانی برای توسعه و مشارکت در تصمیم‌گیری برخوردار باشند. نظام حکمرانی آب باید یک سیستم پرداخت میان استان‌ها ایجاد کرده و همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید سازوکاری برای توزیع منافع و جبران خسارت از جمله خسارت‌های زیست‌محیطی ابداع نماید. سازوکار پرداخت باید به‌گونه‌ای باشد که منافع استان‌های کم‌تر توسعه‌یافته و مناطقی که منافع آن‌ها آسیب‌دیده است را جبران نماید. ائتلاف بزرگ میان استان‌ها می‌تواند به‌صورت یک اتحادیه، سازمان و یا نهاد همکاری منابع آب در حوضه ایجاد شده که وظیفه توزیع منابع و منافع ائتلاف بزرگ را بر عهده دارد. تشکیل چنین ائتلافی که تحت نظارت نهاد حکمرانی آب قرار دارد، می‌تواند یک موقعیت برد – برد را برای تمام استان‌ها فراهم کرده که در نتیجه آن توسعه برابر و سطح رفاه کل حوضه افزایش می‌یابد. از طریق تشکیل اتحادیه همکاری استان‌های ذی‌نفع، سازوکارهای حکمرانی منابع آب، همکاری، تقسیم مسئولیت و حکمرانی مشارکتی همگانی ارتقا خواهد یافت که موجب تحقق عدالت، شفافیت، جبران خسارت‌های زیست‌محیطی و در نهایت توسعه پایدار در حوضه می‌شود.

از نظر محدودیت‌های پژوهش، در این مطالعه ذی‌نفعان دو حوضه اهداف یکسانی دارند. در مطالعات آینده می‌توان از چارچوب پیشنهادی CGT-RL برای مسائل با ذی‌نفعان ناهمگن که اهداف متفاوتی را دنبال می‌کنند و ممکن است سطوح قدرت متفاوتی داشته باشند، استفاده نمود. در این پژوهش سه ذی‌نفع (استان) لحاظ گردید؛ زیرا اگر هر بخش اقتصادی در هر استان به‌عنوان یک بازیکن لحاظ می‌شد، حجم محاسبات (مانند تعداد اپیزودها) و مدت‌زمان آن افزایش می‌یافت. هم‌چنین در اینجا، مطلوبیت قابل‌انتقال (TU) در نظر گرفته شد که پرداخت‌های جانبی را برای دستیابی به هماهنگی و بیشینه‌سازی رفاه ممکن می‌سازد. مطالعات آینده می‌توانند حل مسائل نظریه بازی‌های همکارانه با مطلوبیت غیرقابل‌انتقال (NTU) را در نظر بگیرند که در آن

پرداخت‌های جانبی امکان‌پذیر نیست و افزایش مزایا تنها از طریق هماهنگی اقدامات امکان‌پذیر است. این موضوع یعنی بازی همکارانه با مطلوبیت غیرقابل‌انتقال در مطالعه مدنی و همکاران (٦١) موردبررسی قرار گرفت. این مطالعه با ترکیب یادگیری تقویتی و راه‌حل چانه‌زنی نش، روش جدیدی را برای به‌کارگیری نظریه بازی‌های مشارکتی در بازی‌های با مطلوبیت غیرقابل‌انتقال پیچیده چنددوره‌ای ارائه کردند و روش پیشنهادی را برای دو مثال عددی فرضی با دو بازیکن اعمال نمودند که در آن دو اپراتور برق آبی به دنبال ایجاد یک مکانیسم همکاری منصفانه و کارآمد برای افزایش سود خود هستند. مسائل مدیریت منابع آب اغلب در طول زمان تغییر یافته و تکامل می‌یابند. آگاهی از این موضوع که توابع بازده و ساختار مسائل آب متغیر و وابسته به زمان هستند برای یافتن راه‌حل‌های معقول و بینش‌های مفید در مورد مشکل ضروری است. که در مطالعات آینده می توان این موضوع را مدنظر قرار داد. مدنی (٥٨) در مطالعه‌ای تحت عنوان کاربرد نظریه بازی در منابع آب با تمرکز بر روی بازی‌های غیرهمکارنه، این موضوع را به‌صورت خیلی ساده تحت یک مسئله فرضی با ٢ بازیکن بررسی نمود و نتیجه گرفت که تکامل ساختار بازی باید هنگام مطالعه منازعات منابع آب در نظر گرفته شود. با درک تکامل بازی، می‌توان تفسیر واقع‌بینانه‌تری از رفتارهای ذی‌نفعان ارائه داد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از داوران این مقاله که با نظرات خود موجب بهبود متن حاضر شده‌اند، سپاسگزارند.

داده‌ها، اطلاعات و دسترسی

داده‌های این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول، قابل دسترسی خواهند بود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده نخست: طرح مسأله، مطالعات کتابخانه‌ای، گردآوری داده‌ها و داده‌برداری، آماده‌سازی داده‌ها، تهیه نقشه و اطلاعات مکانی، طرح تحقیق و روش‌شناسی پژوهش، انجام محاسبات، انجام تحلیل‌ها، نتیجه‌گیری و تهیه پیش‌نویس مقاله. نویسنده دوم: طرح مسأله، روش‌شناسی پژوهش، نظارت بر فرایند پژوهش، مشارکت در تحلیل‌ها و نتایج، بازبینی، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله. نویسنده سوم: نظارت و بازبینی مقاله. نویسنده چهارم: ارائه مشاوره در خصوص پژوهش، مشارکت در تحلیل‌ها و نتایج، بازبینی مقاله. نویسنده پنجم: مشارکت در تحلیل و نتایج، بازبینی و اصلاح مقاله، ارائه مشاوره در خصوص پژوهش.

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش رعایت نموده و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها است.

حمایت مالی

این پژوهش از حمایت مالی برخوردار نبوده است.

منابع

1. Madani, K., & Hooshyar, M. (2014). A game theory–reinforcement learning (GT–RL) method to develop optimal operation policies for multi-operator reservoir systems. *Journal of Hydrology*, 519, 732-742.
2. Fu, J., Zhong, P. A., Zhu, F., Chen, J., Wu, Y. N., & Xu, B. (2018). Water resources allocation in transboundary river based on asymmetric Nash–Harsanyi Leader–Follower game model. *Water*, 10(3), 270.
3. Asgari, S., Afshar, A., & Madani, K. (2014). Cooperative game theoretic framework for joint resource management in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(3), 04013066.
4. Gebre, S. L., Cattrysse, D., & Van Orshoven, J. (2021). Multi-criteria decision-making methods to address water allocation problems: A systematic review. *Water*, 13(2), 125.
5. Roozbahani, R., Abbasi, B., & Schreider, S. (2015). Optimal allocation of water to competing stakeholders in a shared watershed. *Annals of Operations Research*, 229, 657-676.
6. Sahoo, B., Lohani, A. K., & Sahu, R. K. (2006). Fuzzy multiobjective and linear programming based management models for optimal land-water-crop system planning. *Water Resources Management*, 20, 931-948.
7. Higgins, A., Archer, A., & Hajkowicz, S. (2008). A stochastic non-linear programming model for a multi-period water resource allocation with multiple objectives. *Water Resources Management*, 22(10), 1445-1460.
8. Hiew, K. L. (1987). *Optimization algorithms for large-scale multireservoir hydropower systems*. Colorado State University.
9. Cansino-Loeza, B., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). Sustainable assessment of Water-Energy-Food Nexus at regional level through a multi-stakeholder optimization approach. *Journal of cleaner production*, 290, 125194.
10. Yuan, L., Wu, X., He, W., Kong, Y., Ramsey, T. S., & Degefu, D. M. (2022). A multi-weight fuzzy methodological framework for allocating coalition payoffs of joint water environment governance in transboundary river basins. *Water Resources Management*, 36(9), 3367-3384.
11. Moosavian, S. A. A., Ghaffari, A., & Salimi, A. (2010). Sequential quadratic programming and analytic hierarchy process for nonlinear multiobjective optimization of a hydropower network. *Optimal Control Applications and Methods*, 31(4), 351-364.
12. Cui, L., Li, Y., & Huang, G. (2015). Planning an agricultural water resources management system: a two-stage stochastic fractional programming model. *Sustainability*, 7(8), 9846-9863.
13. Zarghami, M., Safari, N., Szidarovszky, F., & Islam, S. (2015). Nonlinear interval parameter programming combined with cooperative games: a tool for addressing uncertainty in water allocation using water diplomacy framework. *Water Resources Management*, 29, 4285-4303.
14. Zhang, H., Ha, M., Zhao, H., & Song, J. (2017). Inexact multistage stochastic chance constrained programming model for water resources management under uncertainties. *Scientific Programming*, 2017(1), 1680813.
15. Wang, S., & Huang, G. (2012). Identifying optimal water resources allocation strategies through an interactive multi-stage stochastic fuzzy programming approach. *Water Resources Management*, 26, 2015-2038.
16. Wu, X., Wu, Y., & Ying, Q. (2022). Research on dynamic programming game model for hydropower stations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022(1), 1458388.

17. Mousavi, S. J., & Karamouz, M. (2003). Computational improvement for dynamic programming models by diagnosing infeasible storage combinations. *Advances in water resources*, 26(8), 851-859.
18. Tilmant, A., Beevers, L., & Muyunda, B. (2010). Restoring a flow regime through the coordinated operation of a multireservoir system: The case of the Zambezi River basin. *Water resources research*, 46(7).
19. Côté, P., & Arsenault, R. (2019). Efficient Implementation of Sampling Stochastic Dynamic Programming Algorithm for Multireservoir Management in the Hydropower Sector. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(4), 05019005. **https:// doi.org/doi:10.1061/ (ASCE) WR.1943-5452.0001050.**
20. Hämäläinen, R., Kettunen, E., Marttunen, M., & Ehtamo, H. (2001). Evaluating a framework for multi-stakeholder decision support in water resources management. *Group Decision and Negotiation*, 10, 331-353.
21. Pianosi, F., Castelletti, A., & Restelli, M. (2013). Tree-based fitted Q-iteration for multi-objective Markov decision processes in water resource management. *Journal of Hydroinformatics*, 15(2), 258-270.
22. Lee, J. H., & Labadie, J. W. (2007). Stochastic optimization of multireservoir systems via reinforcement learning. *Water resources research*, 43(11).
23. Yang, Y. C. E., Cai, X., & Stipanović, D. M. (2009). A decentralized optimization algorithm for multiagent system–based watershed management. *Water resources research*, 45(8).
24. Leyton-Brown, K., & Shoham, Y. (2008). *Essentials of game theory: A concise multidisciplinary introduction*. Morgan & Claypool Publishers.
25. Madani, K. (2011). Hydropower licensing and climate change: Insights from cooperative game theory. *Advances in water resources*, 34(2), 174-183.
26. Dinar, A., & Hogarth, M. (2015). Game theory and water resources: Critical review of its contributions, progress and remaining challenges. *Foundations and trends® in microeconomics*, 11(1-2), 1-139.
27. Nash, J. (1953). Two-Person Cooperative Games. *Econometrica*, 21(1), 128-140. **https://doi.org/10.2307/1906951.**
28. Harsanyi, J. C. (1959). *A bargaining model for the cooperative n-person game*. Stanford University.
29. Shapley, L. S. (1953). Stochastic Games*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *39*(10), 1095-1100. **https://doi.org/doi:10.1073/pnas.39.10.1095.**
30. Schmeidler, D. (1969). The nucleolus of a characteristic function game. *SIAM Journal on applied mathematics*, 17(6), 1163-1170.
31. Parrachino, I. (2006). Cooperative game theory and its application to natural, environmental and water resource issues.
32. Suzuki, M., & Nakayama, M. (1976). The cost assignment of the cooperative water resource development: a game theoretical approach. *Management Science*, 22(10), 1081-1086.
33. Young, H. P., Okada, N., & Hashimoto, T. (1982). Cost allocation in water resources development. *Water resources research*, 18(3), 463-475.
34. Szidarovszky, F., Duckstein, L., & Bogardi, I. (1984). Multiobjective management of mining under water hazard by game theory. *European Journal of Operational Research*, 15(2), 251-258.
35. Dinar, A., Ratner, A., & Yaron, D. (1992). Evaluating cooperative game theory in water resources. *Theory and decision*, 32, 1-20.
36. Schreider, S., Zeephongsekul, P., & Fernandes, M. (2007). A game-theoretic approach to water quality management. MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling

and Simulation Society of Australia and New Zealand,

37. Yaron, D., & Ratner, A. (1990). Regional cooperation in the use of irrigation water: efficiency and income distribution. *Agricultural Economics*, 4(1), 45-58.
38. Dinar, A. (2001). Scale and equity in water resource development: a Nash Bargaining model. *Natural Resource Modeling*, 14(4), 477-494.
39. Wang, L., Fang, L., & Hipel, K. W. (2008). Basin-wide cooperative water resources allocation. *European Journal of Operational Research*, 190(3), 798-817.
40. Madani, K. (2009). Climate change effects on high-elevation hydropower system in California. *Ph. D. Thesis*.
41. Sadegh, M., Mahjouri, N., & Kerachian, R. (2010). Optimal inter-basin water allocation using crisp and fuzzy Shapley games. *Water Resources Management*, 24, 2291-2310.
42. 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.
43. Teasley, R. L., & McKinney, D. C. (2011). Calculating the benefits of transboundary river basin cooperation: Syr Darya Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(6), 481-490.
44. Madani, K., & Dinar, A. (2012). Cooperative institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. *Water resources research*, 48(9).
45. Abed-Elmdoust, A., & Kerachian, R. (2012). Water resources allocation using a cooperative game with fuzzy payoffs and fuzzy coalitions. *Water Resources Management*, 26, 3961-3976.
46. Chhipi-Shrestha, G., Rodriguez, M., & Sadiq, R. (2019). Selection of sustainable municipal water reuse applications by multi-stakeholders using game theory. *Science of The Total Environment*, 650, 2512-2526.
47. Dinar, A., & Howitt, R. E. (1997). Mechanisms for allocation of environmental control cost: empirical tests of acceptability and stability. *Journal of Environmental Management*, 49(2), 183-203.
48. Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction* (Vol. 1). MIT press Cambridge.
49. Gosavi, A. (2015). *Simulation-based optimization*. Springer.
50. Watkins, C. (1989). Learning From Delayed Rewards.
51. Watkins, C. J. C. H., & Dayan, P. (1992). Q-learning. *Machine Learning*, 8(3), 279-292. **https://doi.org/10.1007/BF00992698.**
52. Robbins, H., & Monro, S. (1951). A stochastic approximation method. *The annals of mathematical statistics*, 400-407.
53. Madani, K., Farhidi, F., & Gholizadeh, S. (2022). Bargaining power in cooperative resource allocations games. *Algorithms*, 15(12), 445.
54. Salimpour Naghani, S., Azhdary Moghaddam, M., & Hashemi Monfared, S. A. (2024). Inter-basin water transfer: A sustainable solution or an ephemeral painkiller to water shortage? *Environment, Development and Sustainability*, 26(9), 23025-23058. **https://doi.org/10.1007/s10668-023-03589-z.**
55. Salimpour, S., Hashemi Monfared, S. A., & Azhdary Moghaddam, M. (2021). Modeling the effects of inter-basin water transfer on the surface and volume of the aquifer of the origin catchment by using WEAP software (Case Study: Effect of Water transfer of Behesht Abad River on Surface and Volume of Shalamar Aquifer). *Geography and Development*, 19(62), 183-208.
56. Statistics Center of IRAN. (2023). *Economic Accounts Yearbook*. Presidency of IRAN. [In Persian]

57. Regional Water Companies of Chaharmahal Bakhtiari, I. a. K. (2024). *Water Resources Balance Sheet Reports.* [In Persian]
58. Madani, K. (2010). Game theory and water resources. *Journal of hydrology*, 381(3-4), 225-238.
59. Sechi, G. M., Zucca, R., & Zuddas, P. (2013). Water costs allocation in complex systems using a cooperative game theory approach. *Water Resources Management*, 27(6), 1781-1796.
60. Liu, D., Ji, X., Tang, J., & Li, H. (2020). A fuzzy cooperative game theoretic approach for multinational water resource spatiotemporal allocation. *European Journal of Operational Research*, 282(3), 1025-1037.
61. Madani, K., Hooshyar, M., Khatami, S., Alaeipour, A., & Moeini, A. (2014). Nash-reinforcement learning (N-RL) for developing coordination strategies in non-transferable utility games. 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC).