

Research Paper

Economic allocation of water resources with the application of leader-follower game theory in Zayandeh RudHamid Shekarforoush¹,Ali Sardar Shahraki^{2*},Zahra Ghaffari moghadam³¹ Ph.D. Candidate of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran² Associate Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran³ Assistant Professor, Department of Agricultural Economics, Agriculture Institute, Research Institute of Zabol, Zabol, Iran

10.22125/iwe.2024.480220.1832

Received:

October 9, 2024

Accepted:

March 9, 2025

Available online:

April 25, 2025**Keywords:****Game Theory, Leader-Follower, Water Economy, Zayandeh Rud****Abstract**

Optimal allocation of water is one of the most important issues in the field of water resources management. In this matter, there are many stakeholders with the goals of maximizing profit and minimizing inequality in water allocation. Considering the multiple and conflicting nature of the goals in such problems, a set of optimal beam fronts is presented as an answer, and choosing one of these answers can cause conflicts. In order to face the conflicts between the stakeholders, it is recommended to use the models and concepts of game theory and multi-objective optimization, in order to face the conflicts of the goals of the stakeholders present in the exploitation of water resources, the leader-follower game theory approach is used. This study was carried out to investigate the localization of water resources management among different water users including agricultural, industrial and domestic sectors in the Zayandehrud river basin. This is applied to a case study for the localization of water resource management among different water users including agricultural, industrial and domestic sectors in the Zayandehrud river basin. This model can achieve the trade-off between equity and economic benefit of the system and characterize the interaction among water allocation and objectives. Genetic algorithm of non-dominant sorting is used to solve the proposed model. Also, to deal with the challenges, to deal with the uncertainty of the future, the scenario-building technique is applied by changing the amount of available water. The results show that according to the water allocated to each sector, the highest profit belonged to the drinking sector of Isfahan province, and the lowest profit was obtained by the drinking sector of Chaharmahal Bakhtiari province. Isfahan province has the highest profit per allocated water with 119.2 billion IRR. The total benefit from modeling and allocation of water between different regions and sectors is 130.7 billion IRR. The Gini coefficient was also obtained as 0.24 and since this value is less than one and close to zero, it shows that the allocation of water between the players was excellent. According to the results of the study, it is suggested that planners and decision makers use the proposed model for fair allocation and maximum benefit from the allocation of water resources between competing users.

* **Corresponding Author:** Ali Sardar Shahraki
Address: Associate Professor of Agricultural Economics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Email: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir
Tel: 05433427594

1. Introduction

In recent years, the existence of some challenges in the water industry has led organizations to design and implement different solutions. What is the opposite Water and optimal allocation of common water resources is the most important service of game theory with a non-participatory approach to water economy. Zaynderud watershed is the most important disputed watershed among several neighboring provinces in the central plateau of Iran. Decision-making methods of hierarchical structures, despite their wide application, cannot be applied in some decision-making structures. For example, when the decision-making process in an organization is influenced by upstream organizations and their constraints, it is recommended to use leader-follower game models.

2. Materials and Methods

Sometimes the structure of the decision-making problem is such that stakeholders cannot make decisions simultaneously because they are at different levels of the decision-making hierarchy. In other words, one or more stakeholders have priority over others in the decision-making process. The leader-follower game, as a strong dynamic and non-cooperative game, can model such decision situations with the help of mathematical relations.

The leader-follower game is one of the new methods in game theory and one of the types of non-cooperative games; which can be used in allocating water resources. In this study, the leader-follower model was formulated to support the planning of water resources in the Zayandeh River basin. Public managers, as leader-level decision-makers, were more inclined to consider the overall benefits of the basin's water system. Therefore, two objective functions were considered in the decision-making process and the Gini coefficient was chosen to measure the equality of water resources allocation in order to maximize the social benefits of the basin as well as to maximize the overall economic benefits. But as follower-level decision makers, the managers of each sub-region in the basin were more interested in their own interests and hoped to achieve water coordination in different sectors and gain more regional economic benefits.

3. Results

According to the results obtained from solving the model in different scenarios, it can be seen that in Isfahan province, the highest profit belongs to the drinking sector, and also in this sector, in the scenario of normal water flow, the highest profit per allocated water has been obtained. The reason for this is that in this scenario, less water is available than in the base case and high flow scenario, according to the goals, the model has allocated more water to the drinking sector. In Chaharmahal Bakhtiari, the amount of profit in the agricultural sector did not differ in different scenarios, and in the drinking sector, the highest profit was in the high flow scenario and the lowest profit was in the normal flow scenario.

4. Discussion and Conclusion

In this study, government administrators are considered leaders who distribute water among three provinces and local administrators in each province are considered as followers who allocate water to different sectors. The results of the estimation of the model showed that if we want to allocate the amount of available water between different provinces with this model, considering that the agricultural, drinking and industrial water of Isfahan province is supplied from this river, the most water will be allocated to Isfahan province. to be in Isfahan province, the most water is allocated to the agricultural sector.

5. Six important references

Conflict of Interest

- 1) Kicsiny, R., Piscopo, V., Scarelli, A., Varga, Z., 2014. Dynamic Stackelberg game model for water rationalization in drought emergency. *Journal of hydrology* 517, 557e565.

- 2) Latifi, M., Rakhshandehroo, G., Nikoo, M.R., Sadegh, M., 2019. A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management. *J. Clean. Prod.* 241, 118323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118323>
- 3) Li, M., et al., 2019. Stochastic multi-objective decision making for sustainable irrigation in a changing environment. *J. Clean. Prod.* 223, 928–945.
- 4) Nikoo, M.R., Beiglou, P.H.B., Mahjouri, N. 2016. Optimizing multiple-pollutant waste load allocation in rivers: an interval parameter game theoretic model. *Water resources management* 30 (12), 4201e4220.
- 5) Sedghamiz, A., Nikoo, M.R., Heidarpour, M., Sadegh, M. 2018. Developing a non-cooperative optimization model for water and Crop area allocation based on leader-followers game. *J. Hydrol.* 567, 51e59.
- 6) Tavakoli, A., Kerachian, R., Nikoo, M.R., Soltani, M., Estalaki, S.M. 2014. Water and waste load allocation in rivers with emphasis on agricultural return flows: application of fractional factorial analysis. *Environmental monitoring and assessment* 186 (9), 5935e5949.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



تخصیص اقتصادی منابع آب تحت کاربرد نظریه بازی رهبر-پیرو در رودخانه زاینده رود

حمید شکر فروش^۱، علی سردار شهرکی^{۲*}، زهرا غفاری مقدم^۳

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

مقاله پژوهشی

چکیده

تخصیص بهینه آب یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه مدیریت منابع آب می‌باشد. در این مسئله ذینفعان متعددی با اهداف حداکثر کردن سود و حداقل کردن نابرابری در تخصیص آب حضور دارند. با توجه به ماهیت چندگانه و متضاد اهداف در این گونه مسائل، مجموعه‌ای از جبهه پرتوی بهینه به‌عنوان پاسخ ارائه می‌شود که انتخاب یکی از این پاسخ‌ها، می‌تواند سبب ایجاد تعارضاتی شود. به‌منظور مواجهه با تعارضات میان ذی‌نفعان، استفاده از مدل‌ها و مفاهیم تئوری بازی‌ها و بهینه‌سازی چند هدفه توصیه می‌شود. در این مطالعه برنامه‌ریزی چند هدفه با بازی رهبر-پیرو در رودخانه زاینده رود بومی‌سازی و ترکیب شده است. این مطالعه جهت مدیریت منابع آب در میان کاربران مختلف آب از جمله بخش‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی در حوضه رودخانه زاینده رود انجام شده است. این مدل می‌تواند به معاوضه بین برابری و سود اقتصادی سیستم دست یابد و تعامل را در میان تخصیص آب و اهداف مشخص کند. الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب جهت حل مدل پیشنهادی به کار گرفته شد. همچنین برای مقابله با چالش‌ها و عدم قطعیت آینده، تکنیک سناریوسازی با تغییر میزان آب در دسترس اعمال شد. نتایج نشان می‌دهد که با توجه به آب تخصیص داده شده به هر بخش بیشترین سود متعلق به بخش شرب استان اصفهان بوده است و کمترین سود را نیز بخش شرب استان چهارمحال بختیاری بدست آورده است. استان اصفهان با ۱۱۹/۲ میلیارد ریال دارای بیشترین سود به ازای آب تخصیص داده شده، می‌باشد. سود کل حاصل از مدلسازی و تخصیص آب بین مناطق و بخش‌های مختلف ۱۳۰/۷ میلیارد ریال بدست آمده است. ضریب جینی نیز ۰/۲۴ بدست آمده و از آنجائیکه این مقدار کمتر از یک و نزدیک به صفر می‌باشد نشان می‌دهد تخصیص آب بین بازیکنان عادلانه بوده است. با توجه به مطالعه پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران جهت تخصیص عادلانه و کسب حداکثر سود از تخصیص منابع آبی بین استفاده‌کنندگان رقیب از مدل پیشنهادی استفاده نمایند.

واژه‌های کلیدی: نظریه بازی، رهبر-پیرو، اقتصاد آب، زاینده رود

۱ دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. ایمیل: hamid.shkarforosh@gmail.com

۲ نویسنده مسئول: دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. ایمیل: a.s.shahraki@eco.usb.ac.ir

۳ استادیار اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران. ایمیل: ghafari.zahra1@gmail.com



مقدمه

در سال‌های اخیر، وجود برخی چالش‌ها در صنعت آب، سازمان‌ها را به سمت طراحی و پیاده‌سازی راهکارهای مختلف سوق داده است. حل تقابل بین مصرف‌کنندگان آب و تخصیص بهینه منابع مشترک آب، مهم‌ترین خدمت نظریه بازی‌های با رویکرد غیرمشارکتی به اقتصاد آب است. حوضه آبریز زاینده‌رود مهم‌ترین حوضه مورد مناقشه در بین چند استان هم‌جوار در حوضه درجه یک فلات مرکزی ایران است. روش‌های تصمیم‌گیری ساختارهای سلسله مراتبی، علیرغم کاربرد گسترده، در برخی ساختارهای تصمیم‌گیری قابل اعمال نیستند. برای مثال، زمانی که فرآیند تصمیم‌گیری در یک سازمان تحت تأثیر سازمان‌های بالادستی (برتر) و محدودیت‌های آنها قرار می‌گیرد، توصیه می‌شود از مدل‌های بازی رهبر-پیرو استفاده شود (Latifi et al., 2019). اشتون و بایر (Ashton and Bayer, 1983) از پیشگامان استفاده از روش رهبر-پیرو برای تخصیص و بهره‌برداری از منابع آبی هستند. چندین مطالعه در مورد حل منازعات بین ذینفعان در زمینه‌های مختلف از جمله بهینه‌سازی تخصیص آب رودخانه (Kamruzzaman et al., 2012; Tavakoli et al., 2014; Nikoo et al., 2016; Kicsiny et al., 2014)، تخصیص منابع آب برای مصارف کشاورزی حل منازعات در تخصیص منابع آب (Safari et al., 2014; Alizadeh et al., 2017)، و مدیریت زیست‌محیطی با در نظر گرفتن ریسک‌های زیست‌محیطی و اقتصادی (Jafari and Nikoo, 2016; Li et al., 2016) انجام شده است. اخیراً، ژو و همکاران (Xu et al., 2017) مدلی بهینه‌سازی برای تخصیص آلودگی در یک محیط تصادفی فازی بر اساس روش تصمیم‌گیری رهبر-پیرو جهت کمک به کنترل یکپارچه آلودگی رودخانه پیشنهاد کرده‌اند.

نظریه بازی با موفقیت برای رسیدگی به مسائل تصمیم‌گیری دنیای واقعی با استفاده از ابزارهای ریاضی و اقتصادی مورد استفاده قرار گرفته است. تئوری بازی برای درک تعاملات موجود بین بازیکنان یک بازی استفاده می‌شود و معمولاً منجر به یک راه حل تعادلی می‌شود که محتمل

ترین اقداماتی را که توسط بازیکنان در هنگام بازی انجام می‌شود پیش بینی می‌کند (Motlaghzadeh et al., 2020). یکی از مزیت‌های نظریه بازی نسبت به سایر رویکردهای تصمیم‌گیری، توانایی آن در مدل‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری پویا (بازی‌های پویا) است که در آن بازیکنان اقدامات خود را در سطوح مختلف انتخاب می‌کنند و تصمیم‌گیری به طور همزمان اتفاق نمی‌افتد.

Ghaffari moghadam و همکاران (۲۰۲۳) با تلفیق مدل تعادلی استاکلبرگ-نش-کورنو و مدل عرضه نرلاو به تخصیص بهینه آب در بخش کشاورزی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک پویا و روش برنامه ریزی فازی انجام شده است. نتایج حاصل از تخصیص منابع آب در شرایط وجود بازار آب و نبود بازار آب نشان می‌دهد که بازار آب نقش مهمی در تخصیص منابع آب داشته است به طوری که با شکل‌گیری بازار آب در سطح منطقه سیستان علاوه بر تغییر در میزان آب تخصیصی به محصولات در مناطق مورد مطالعه، باعث افزایش سود اصل از الگوی کشت شده و منجر به بهبود وضعیت درآمدی کشاورزان و ایجاد عدالت در تخصیص آب بین مناطق منطقه سیستان شده است.

Chen و همکاران (۲۰۱۷) یک روش تعاملی رهبر-پیرو برای مدیریت منابع آب منطقه‌ای با در نظرگیری نیازهای آبی مختلف و محدودیتهای محیط‌زیستی ارائه دادند. این مطالعه فرمولاسیون و پیاده‌سازی یک چارچوب بهینه‌سازی بر اساس دسترسی به آب و اطمینان‌پذیری همراه با ویژگیهای مختلف نیاز آب ارائه داده است.

Fu و همکاران (۲۰۱۹) یک مدل بازی نامتقارن دو سطحی نش-هرسانی رهبر-پیرو با در نظر گرفتن خطاهای پیش‌بینی جریان در حوزه رودخانه هیبه در چین پیشنهاد نمودند. نتایج نشان داد آب تخصیص یافته به سازمان آبخیزداری و سه استان زمانی که خطای پیش‌بینی جریان از توزیع نرمال تبعیت می‌کند، دارای توزیع نرمال است. و مجموع میانگین آب تخصیص یافته به ذینفعان برابر است با میانگین منابع آب پیش‌بینی شده است.



اهمیت معیارهای انتخاب شده اتخاذ کردند. نتایج به حساسیت چارچوب به سناریوهای وزن دهی اشاره می کند، اما راه حل های سازش کارآمدی را برای یک سیستم پیچیده ارائه می دهد که تنها می تواند تا حدی نیازهای آب را تامین کند.

جهت حل مسئله تخصیص منابع آب در حوزه آبریز زاینده رود که دارای چندین ذینفع با منافع متضاد است، نیازمند مدلی است که بتواند شرایط آبی را در این حوزه بومی سازی و مدلسازی کند. با توجه به مطالعات انجام شده، در این مطالعه از تلفیق مدل رهبر- پیرو که یک نوع برنامه ریزی دو سطحی است و مدل برنامه ریزی چند هدفه جهت تخصیص منابع آب استفاده شد.

مواد و روش ها

گاهی ساختار مسئله تصمیم گیری به گونه ای است که ذینفعان نمی توانند به طور همزمان تصمیم گیری کنند، زیرا آنها در سطوح مختلف سلسله مراتب تصمیم گیری قرار دارند. به عبارت دیگر، یک یا چند ذینفع نسبت به سایرین در فرآیند تصمیم گیری اولویت دارند. بازی رهبر- پیرو، به عنوان یک بازی پویا و غیرهمکارانه قوی، می تواند با کمک روابط ریاضی چنین شرایط تصمیم گیری را مدل سازی کند (Matsumoto and Szidarovszky, 2016; Sedghamiz et al., 2018).

تئوری بازی ها با هدف توسعه راهکارهای مناسب چهارچوبی برای مطالعه رفتار استراتژیک بنگاههای انحصاری در مسائل منابع آب می باشد (Niksokhan et al., 2009). مساله تخصیص منابع آب زاینده رود را می توان به صورت یک بازی طراحی نمود. در این بازی بازیکنان بخش شرب و کشاورزی استان چهارمحال بختیاری، بخش کشاورزی، صنعت و شرب استان اصفهان و بخش شرب استان یزد می باشند. بازی رهبر - پیرو یکی از روشهای جدید در تئوری بازی و از انواع بازیهای غیرهمکارانه می باشد؛ که می تواند در مسائل تخصیص منابع آب مورد استفاده قرار بگیرد. در این مطالعه مدل رهبر - پیرو جهت پشتیبانی از برنامه ریزی منابع آب در حوزه زاینده رود فرموله شد. مدیران دولتی به عنوان

Jahanshahi و همکاران (۲۰۲۳) از یک چارچوب تصمیم گیری رهبر- پیرو جدید برای ارزیابی و مقایسه خودکار سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب و انتخاب بهترین آنها در حوضه گرگانرود - قارسو استفاده نمودند. سیاست های تخصیص آب پایدار و قیمت آب برای بخش های کشاورزی، صنعتی و شیلات در حوضه، یافته های اصلی این مقاله است. نتایج نشان می دهد که تعرفه های فعلی آب به ویژه برای بخش کشاورزی پایین است و می تواند منجر به استفاده ناکارآمد از آب توسط پیروان شود که در بسیاری از مناطق ایران وجود داشته است.

Wu و همکاران (۲۰۲۲) مدلی دو سطحی ارائه دادند که پایداری تعادلی را با استفاده از برنامه ریزی چندهدفه در نظر گرفته و برای تخصیص آب به کار بردند. Motlaghzadeh و همکاران (۲۰۲۳) چارچوب تصمیم گیری چندعامله ای ارائه دادند که در آن ساختار سلسله مراتبی عوامل، توزیع اطلاعات بین تصمیم گیرندگان و ارزش اقتصادی آب با استفاده از بازی های رهبر- پیرو و بیزی گنجانده شده است.

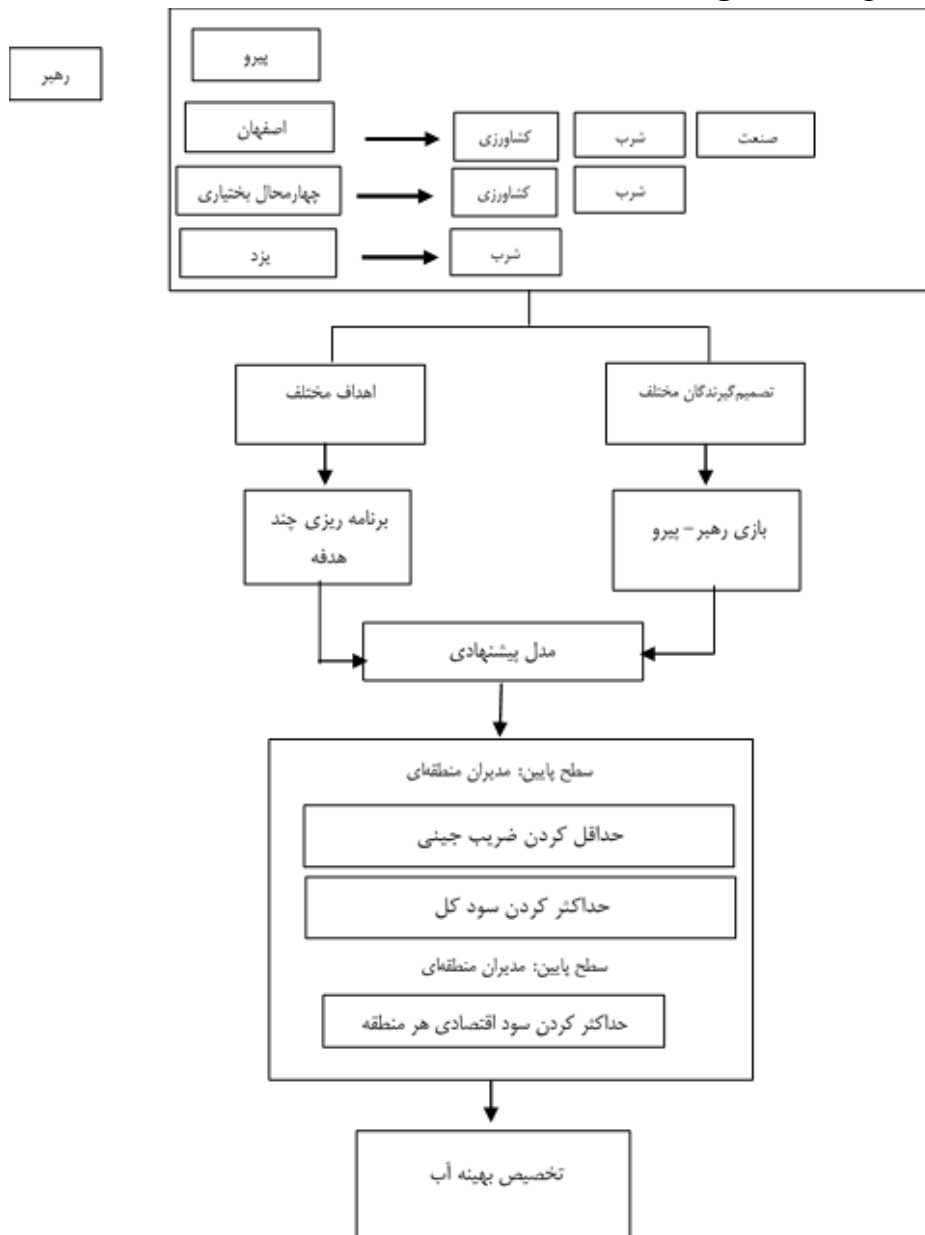
Fu و همکاران (۲۰۲۱) از نظریه بازی ها و مدل بهینه سازی چندهدفه جهت تخصیص منابع آب در حوضه رودخانه هیبه استفاده نمودند و نتایج این دو مدل را با هم مقایسه نمودند. نتایج نشان داد حل مدل بازی نش- هارسانی رهبر- پیرو به صورت غیرمسلط است و مدل بازی نامتقارن می تواند تحت یک ساختار ترجیح خاص، همان طرح تخصیص منابع آب مدل بهینه سازی چندهدفه را به دست آورد؛ همچنین پس از اینکه مدل بهینه سازی چندهدفه منحنی پارتو را به دست می آورد، هنوز نیاز به ساخت اطلاعات ترجیحی منحنی پارتو برای بار دوم است تا راه حل بهینه چندهدفه به دست آید، در حالی که مدل بازی می تواند با شرکت در مذاکره، به طور مستقیم طرح تخصیص منابع آب را در یک بار به دست آورد.

Mooselu و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از یک مدل چند هدفه و بازی رهبر - پیرو جهت تخصیص فاضلاب تصفیه شده در شرق استان تهران استفاده نمودند. آنها نه سناریو وزن دهی مختلف برای ارزیابی حساسیت مدل به



عنوان تصمیم‌گیرندگان سطح پیرو، مدیران هر زیرمنطقه در حوضه بیشتر به منافع خود تمایل داشتند و امیدوار بودند که هماهنگی آب در بخش‌های مختلف را برآورده کنند و منافع اقتصادی منطقه‌ای بیشتری کسب کنند. در شکل ۱، چارچوب کلی مدل ارائه شده است.

تصمیم‌گیرنده سطح رهبر، بیشتر به بررسی منافع کلی سیستم آب حوضه تمایل داشتند. بنابراین، دو تابع هدف در فرآیند تصمیم‌گیری در نظر گرفته شد و ضریب جینی برای اندازه‌گیری برابری تخصیص منابع آب به منظور به حداکثر رساندن منافع اجتماعی حوضه و همچنین به حداکثر رساندن منافع اقتصادی کلی انتخاب شد. اما به



شکل (۱): چارچوب کلی مدل پژوهش

اهداف سطح رهبر

۱- حداقل کردن ضریب جینی

ضریب جینی یک شاخص اقتصادی است که نشان دهنده توزیع نابرابر درآمد در جامعه است. هر چه ضریب جینی به صفر نزدیکتر باشد، توزیع برابر درآمد در جامعه بیشتر است و همانطور که به سمت یک میل می کند، نابرابری بیشتری را در توزیع درآمد نشان می دهد. بنابراین، با استفاده از ضریب جینی می توان یک معیار نابرابری توزیع آب برای سطح حوضه آبریز تعریف کرد با توجه به موارد ذکر شده، مقدار این ضریب در تخصیص آب به صورت تابع هدف زیر بیان می شود (Hu et al., 2016).

$$Min f_{01} = Min Gini = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{i=1}^I \left| \frac{A_i}{EB_{ij}} - \frac{A_i}{EB_{ij}} \right|}{2n \sum_{i=1}^I \frac{A_i}{EB_{ij}}} \quad (1)$$

$$EB_{ij} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (b_{ij} c_{ij}) A_{ij} \quad (2)$$

۲- حداکثر کردن سود کل اقتصادی

$$Max f_{02} = Max Ben = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (b_{ij} - c_{ij}) A_{ij} \quad (3)$$

اهداف سطح پیرو

۱- حداکثر کردن سود اقتصادی هر منطقه

$$Max f_{11} = Max P_i = \sum_{j=1}^J (b_{1j} - c_{1j}) A_{1j} \quad (4)$$

حداکثر کردن سود استان اصفهان

$$Max f_{12} = Max P_i = \sum_{j=1}^J (b_{2j} - c_{2j}) A_{2j} \quad (5)$$

حداکثر کردن سود استان چهارمحال بختیاری

$$Max f_{13} = Max P_i = \sum_{j=1}^J (b_{3j} - c_{3j}) A_{3j} \quad (6)$$

حداکثر کردن سود استان یزد

محدودیت‌ها

محدودیت آب موجود

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ij} \leq TQ \quad (7)$$

محدودیت تقاضای آب

$$D_{ij.min} \leq A_{ij} \leq D_{ij.max} \quad \forall i, j \quad (8)$$

محدودیت‌های غیر منفی

$$A_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (9)$$

در اینجا i مناطق فرعی، j بخش‌های مختلف مصرف کننده آب، f_{01} تابع هدف سطح رهبر برای حداکثر کردن برابری در تخصیص آب در حوضه، f_{02} تابع هدف دوم سطح رهبر جهت حداکثر کردن منافع اقتصادی حوضه، f_{11} ، f_{12} ، f_{13} توابع هدف



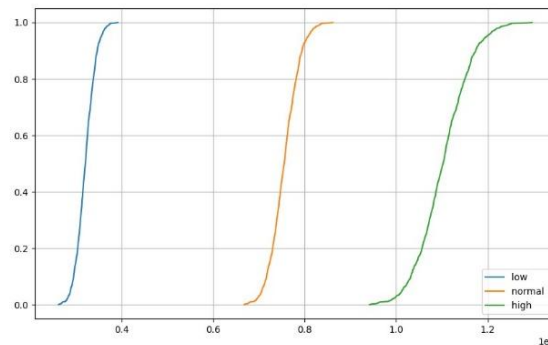
سطح پیرو به منظور حداکثر کردن منافع اقتصادی هر منطقه، $Gini$ ضریب جینی، Ben منافع اقتصادی، P_i سود اقتصادی هر منطقه، A_{ij} آب تخصیص یافته به بخش j در منطقه i ، b_{ij} میزان بازده ناخالص به ازای هر واحد آب مصرف شده بخش j در منطقه i ، C_{ij} هزینه هر واحد آب مصرف شده در بخش j در منطقه i ، TQ کل آب موجود، $D_{ij.min}$ حداقل نیاز آبی بخش j در منطقه i ، $D_{ij.max}$ حداکثر نیاز آبی بخش j در منطقه i ، I تعداد مناطق فرعی، EB_{ij} سود کل اقتصادی حوزه آبریز.

سناریو سازی

برای مقابله با چالش ها و عدم قطعیت در آینده، تکنیک سناریو سازی با تغییر میزان آب در دسترس اعمال می شود. از آنجائیکه جریان رودخانه ماهیت تصادفی دارد نمی توان از داده های ثابت و معین برای میزان جریان رودخانه استفاده نمود بایستی رفتار سیستم را با استفاده از روشهای شبیه سازی در آینده پیش بینی کرد. داده های مورد استفاده در مطالعه شامل جریان ورودی آب رودخانه زاینده رود در طی سالهای ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱ می باشد. با استفاده از روش تحقیق لی و همکاران (۲۰۱۹) جریان آب در این رودخانه را می تواند به سه جریان نرمال، جریان زیاد و جریان کم تقسیم نمود. برای این منظور، بایستی توزیع نرمال مقادیر جریان در زیر سطوح مختلف جریان را بدست آورد که از روش باکس - مولر که به صورت زیر بیان می شود، استفاده شد (Huang, 2099; Li et al., 2016).

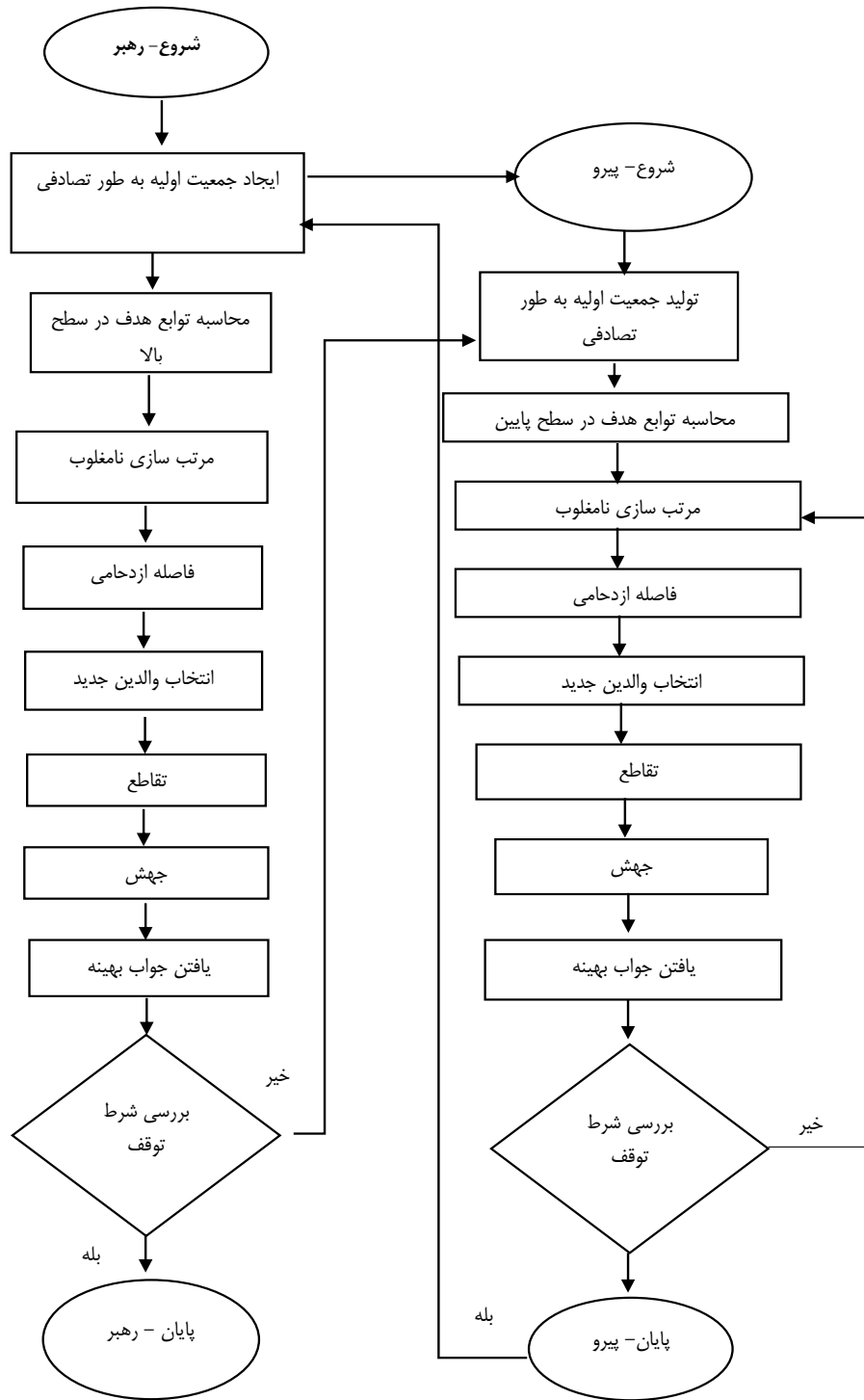
$$Q = \mu + \sigma \sqrt{\frac{-2 \ln[(2U_1-1)^2 + (2U_2-1)^2]}{(2U_1-1)^2 + (2U_2-1)^2}} (2U_1 - 1) \quad (10)$$

در اینجا μ و σ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقدار آب موجود را نشان می دهند. U_1 و U_2 اعداد تصادفی هستند که دارای توزیع نرمال می باشند؛ و $(2U_1 - 1)^2 + (2U_2 - 1)^2 \leq 1$. شکل ۱، مقدار آب سطحی موجود را در سطوح مختلف جریان نشان می دهد.



شکل (۲): توزیع تجمعی مقدار آب موجود تحت سطوح مختلف جریان

با توجه به نتایج حاصل از روش باکس - مولر سه سناریو برای این مطالعه تعریف شد. شامل سناریو جریان کم آب، سناریو جریان نرمال آب و سناریو جریان زیاد آب. مدل مورد استفاده در مطالعه یک مدل INLP است که حل اینگونه مسائل با روش های دقیق مشکل است جهت حل اینگونه مسائل از الگوریتم چند هدفه مبتنی بر بهینه پارتو به نام الگوریتم ژنتیک مرتب سازی نامغلوب NSGA-II استفاده شده است که یکی از پر کاربردترین روشهای بهینه سازی چندهدفه در تحقیقات انجام شده در سالهای اخیر می باشد. در شکل (۳) فلوچارت این الگوریتم برای مدل مورد مطالعه آورده شده است.



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم مورد استفاده در پژوهش حاضر



بحث و نتایج

در مطالعه حاضر جهت افزایش سود کل سیستم و کاهش نابرابری در تخصیص آب و همچنین حداکثر کردن سود در هر منطقه یک مدل بهینه سازی تخصیص آب ایجاد شد. روش بهینه سازی مورد استفاده در این مدل، روش الگوریتم NSGA-II می باشد. سناریوی پایه به منظور برآورد توابع هدف، شامل میزان آب در دسترس در سال

۱۴۰۱-۱۴۰۰ می باشد با توجه به میزان آب در دسترس در این سال، سناریو پایه از سالهایی می باشد که جریان آب زیاد بوده است. متغیرهای تصمیم مساله شامل: (۱) میزان آب تخصیص داده به هر منطقه (۲) میزان آب تخصیص داده به هر بخش در هر منطقه می باشد که مدل در پی یافتن آنهاست. در جدول ۱، نتایج حاصل از تخصیص بهینه آب بین مناطق و بخشهای مختلف در سناریو پایه آورده شده است.

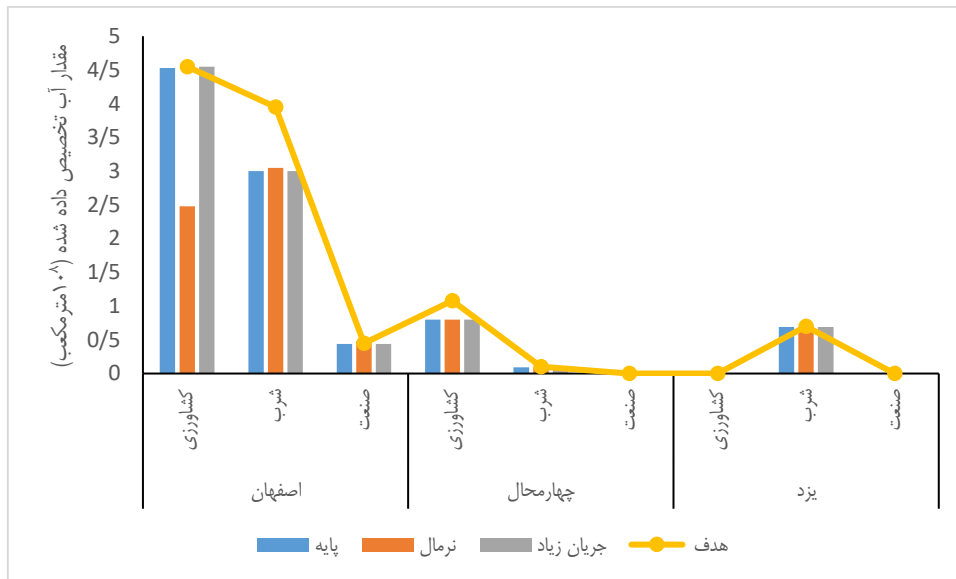
جدول (۱): نتایج حاصل از تخمین مدل در سناریو پایه

منطقه	اصفهان	چهارمحال بختیاری	یزد
مقدار آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی (10^8 مترمکعب)	۴/۵۳	۰/۸	۰
مقدار آب تخصیص یافته به بخش شرب (10^8 مترمکعب)	۳	۰/۰۹۹	۰/۶۹
مقدار آب تخصیص یافته به بخش صنعت (10^8 مترمکعب)	۰/۴۴	۰	۰
سود بخش کشاورزی (10^8 ریال)	۴۲۸	۴۰/۵	۰
سود بخش شرب (10^8 ریال)	۷۰۳	۱۱/۳	۰
سود بخش صنعت (10^8 ریال)	۶۱/۷	۰	۶۳
سود هر منطقه (10^8 ریال)	۱۱۹۲	۵۱/۸	۶۳
مقدار آب تخصیص یافته به هر منطقه (10^8 مترمکعب)	۷/۹۷	۱/۷۹	۰/۶۹
سود کل (10^8 ریال)	۱۳۰۷		
ضریب جینی	۰/۲۴		

مأخذ: یافته‌های تحقیق

با توجه به نتایج مشاهده می شود بیشترین آب به استان اصفهان و کمترین آب به استان یزد تخصیص داده شده است و در بین مصرف کنندگان مختلف بیشترین آب به بخش کشاورزی استان اصفهان و کمترین آب به بخش صنعت استان اصفهان تخصیص داده شده است. با توجه به آب تخصیص داده شده به هر بخش بیشترین سود متعلق به بخش شرب استان اصفهان بوده است و کمترین سود را نیز بخش شرب استان چهارمحال بختیاری بدست آورده است. استان اصفهان با $119/2$ میلیارد ریال دارای بیشترین

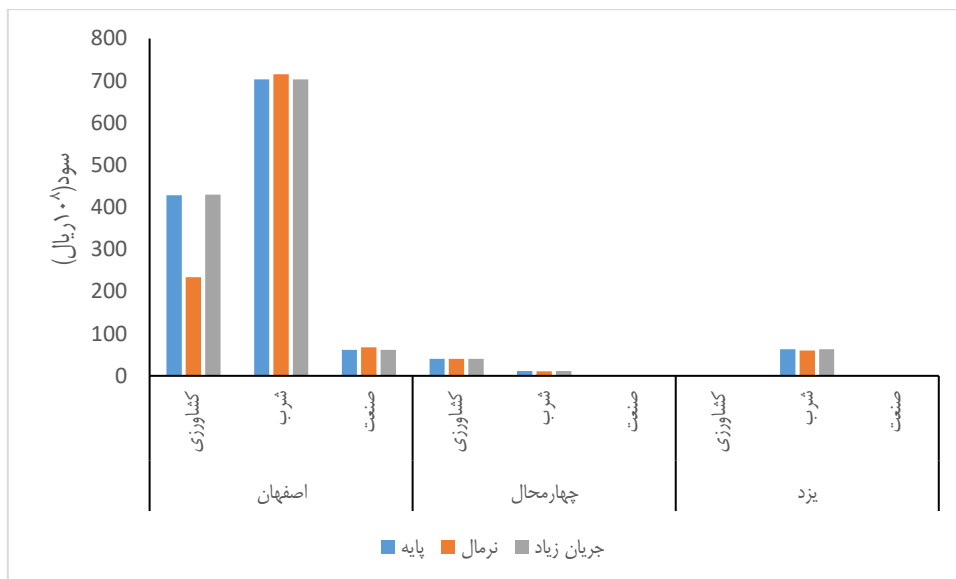
سود به ازای آب تخصیص داده شده، می باشد. سود کل حاصل از مدلسازی و تخصیص اب بین مناطق و بخشهای مختلف $130/7$ میلیارد ریال بدست آمده است. ضریب جینی نیز $0/24$ بدست آمده و از آنجائیکه این مقدار کمتر از یک و نزدیک به صفر می باشد نشان می دهد تخصیص آب بین بازیکنان علانه بوده است. شکل (۴) مقدار آب تخصیص داده شده به هر بازیکن را در سناریوهای مختلف نشان می دهد.



شکل (۴): مقدار آب تخصیص داده شده به هر بازیکن در سناریوهای مختلف

در حوضه رودخانه زاینده رود افزایش یافته است. علاوه بر این، از شکل (۴)، می‌توان مشاهده کرد که مقدار تخصیص هر بخش تحت سطح جریان زیاد تقریباً برابر با مقادیر هدف متناظر آنها هستند. این بدان معناست که میزان تقاضای آب هر بخش در سطح جریان زیاد به راحتی می‌تواند برآورده شود. در شکل (۵) مقدار سود حاصل از تخصیص آب برای هر بازیکن نشان داده شده است.

همانطور که نتایج نشان می‌دهد کل مقدار آب تخصیص داده شده در سطح جریان زیاد < نرمال < سطح جریان کم می‌باشد. در سناریو سطح جریان کم آب هیچ جواب بهینه‌ای برای مدل پیشنهادی وجود ندارد به این دلیل که حداقل آب مورد نیاز برای سطح جریان کم به دلیل کمترین میزان در دسترس بودن کل آب سطحی قابل برآورده نیست و تقاضای آب همراه با رشد سریع جمعیت و رشد اقتصادی



شکل (۵): مقدار سود حاصل از تخصیص آب برای هر بازیکن



به اهداف، مدل آب بیشتری به بخش شرب تخصیص داده است. در چهارمحال بختیاری مقدار سود در بخش کشاورزی در سناریوهای مختلف تفاوت نکرده و در بخش شرب بیشترین سود در سناریو جریان زیاد و کمترین سود در سناریو جریان نرمال بوده است. در جدول ۲ نتایج مقدار سود کل و ضریب جینی برای هر یک از سناریوها آورده شده است

با توجه به نتایج حاصله از حل مدل در سناریوهای مختلف مشاهده می‌شود در استان اصفهان بیشترین سود متعلق به بخش شرب می‌باشد و همینطور در این بخش در سناریو جریان نرمال آب، بیشترین سود به ازای آب تخصیص داده شده بدست آمده است که علت آن در این است با توجه به اینکه در این سناریو آب کمتری نسبت به حالت پایه و سناریو جریان زیاد در دسترس می‌باشد با توجه

جدول (۲): نتایج مقدار سود کل و ضریب جینی برای هر یک از سناریوها

جریان زیاد	نرمال	پایه	سود کل (ریال) ^۸
۱۳۰۸	۱۱۲۷	۱۳۰۷	
۰/۲۴۵۱	۰/۲۸۹۰	۰/۲۴۵۲	ضریب جینی

مأخذ: یافته‌های تحقیق با توجه به نتایج بیشترین سود و کمترین ضریب جینی در سناریو جریان زیاد وجود داشته و کمترین مقدار هم مربوط به سناریو جریان نرمال می‌باشد.

می‌شود. در استان اصفهان نیز بیشترین آب به بخش کشاورزی اختصاص داده شده است. با توجه به نتایج مطالعه پیشنهادات زیر ارائه می‌گردد:

- (۱) پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران جهت تخصیص عادلانه و کسب حداکثر سود از تخصیص منابع آبی بین استفاده کنندگان رقیب از مدل پیشنهادی استفاده نمایند.
- (۲) توجه به رویکردهای نوین با لحاظ مسائل اجتماعی و فرهنگ سازی عمومی همراه باشد تا بتوان به صورت گام به گام این موضوع مهم را تبیین نمود.
- (۳) بدون شک در سال‌های پیش رو مساله تامین آب شرب مسئله‌ای جدی بوده و لزوم کاهش مصارف دیگر و مدیریت صحیح آن‌ها به‌ویژه در بخش کشاورزی کمک شایانی به بحث بالارفتن قابلیت اطمینان تامین آب شرب خواهد نمود؛ لذا یکی از این راه‌حل‌ها، استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر ارزش اقتصادی آب در جهت کاهش مصارف، ایجاد بازارهای آب محلی با لحاظ مسائل سیاسی، اجتماعی و خواسته‌های منطقی حقا به بران است که قطعاً استفاده از تجربه‌های

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این تحقیق، یک مدل رهبر - پیرو برای مدیریت منابع آب منطقه‌ای در بین چندین بخش آبی توسعه و بومی سازی شد. این مطالعه یک روش نوآورانه است که برنامه‌ریزی چندهدفه و مدل رهبر - پیرو را به یک چارچوب مدل‌سازی یکپارچه پیوند می‌دهد. هدف از این مطالعه تخصیص بهینه آب بین استان‌ها و بخشهای مختلف در حوضه رودخانه زاینده‌رود در سناریوهای مختلف می‌باشد بنابراین یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر NSGA-II برای بهینه‌سازی هدفی مانند حداکثر کردن سود کل اقتصادی و حداقل کردن نابرابری در تخصیص آب توسعه یافت. در این مطالعه، مدیران دولتی رهبر که آب را بین سه استان تقسیم می‌کنند و مدیران محلی در هر استان به عنوان پیرو در نظر گرفته شده اند که آب را به بخشهای مختلف تخصیص می‌دهند. نتایج حاصل از تخمین مدل نشان داد چنانچه مقدار آب موجود را بخواهیم با این مدل بین استان‌های مختلف تخصیص دهیم با توجه به اینکه آب کشاورزی، شرب و صنعت استان اصفهان از این رودخانه تامین می‌شود بیشترین آب به استان اصفهان تخصیص داده

بین‌المللی در بخش ارزش گذاری آب‌های سطحی و
زیرزمینی ضرورتی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

منابع

- Alizadeh, M.R., Nikoo, M.R. and Rakhshandehroo, G.R., 2017. Developing a multi-objective conflict-resolution model for optimal groundwater management based on fallback bargaining models and social choice rules: a case study. *Water resources management* 31 (5), 1457e1472.
- Ashton, W.J. and Bayer, M.B., 1983. Water supply and urban growth planning: a partnership. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 19 (5), 779e783. <https://doi.org/10.1111/j.1752-688.1983.tb02802.x>
- Fu, J., Zhong, P. A., Xu, B., Zhu, F., Chen, J. and Li, J. 2021. Comparison of transboundary water resources allocation models based on game theory and multi-objective optimization. *Water*, 13(10), 1421.
- Fu, J., Zhong, Pa., Chen, J. et al. 2019. Water Resources Allocation in Transboundary River Basins Based on a Game Model Considering Inflow Forecasting Errors. *Water Resour Manage* 33, 2809–2825
- Ghaffari Moghadam, Z., Moradi, E., Hashemi Tabar, M., and 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.
- Hu, Z., Wei, C., Yao, L., Li, C. and Zeng, Z. 2016. Integrating equality and stability to resolve water allocation issues with a multiobjective bilevel programming model. *J. Water Resour Plann. Manage.* 142(7): 1-12.
- Jafari, S.M. and Nikoo, M.R. 2016. Groundwater risk assessment based on optimization framework using DRASTIC method. *Arabian Journal of Geosciences* 9 (20), 742.
- Jahanshahi, S., Kerachian, R. and Emanjomehzadeh, O. A. 2023. Leader-Follower Framework for Sustainable Water Pricing and Allocation. *Water Resour Manage* 37, 1257–1274.
- Kamruzzaman, M., Beecham, S., Zuppi, G.M., 2012. A model for water sharing in the Ganges River Basin. *Water Environ. J.* 26 (3), 308e318.
- Kicsiny, R., Piscopo, V., Scarelli, A., Varga, Z., 2014. Dynamic Stackelberg game model for water rationalization in drought emergency. *Journal of hydrology* 517, 557e565.
- Latifi, M., Rakhshandehroo, G., Nikoo, M.R., Sadegh, M., 2019. A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management. *J. Clean. Prod.* 241, 118323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118323>
- Li, M., Guo, P., Singh, V.P., 2016. An efficient irrigation water allocation model under uncertainty. *Agric. Syst.* 144, 46–57
- Matsumoto, A., Szidarovszky, F., 2016. *Game Theory and its Applications*. Springer, p. 105. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54786-0> (Chapter 9)
- Motlaghzadeh, K., Eyni A., Behboudian, M., Pourmoghim, P., Ashrafi, S., Kerachian R. and Hipel, K. 2023. A multi-agent decision-making framework for evaluating water and environmental resources management scenarios under climate change. *J Hydrology Sci Total Environ* 864:161060.
- Mooselu, M. G., Nikoo, M. R., Latifi, M., Sadegh, M., Al-Wardy, M., and Al-Rawas, G. A. 2020. A multi-objective optimal allocation of treated wastewater in urban areas using leader-follower game. *Journal of Cleaner Production* 267, 122189.
- Nikoo, M.R., Beiglou, P.H.B., Mahjouri, N. 2016. Optimizing multiple-pollutant waste load allocation in rivers: an interval parameter game theoretic model. *Water resources management* 30 (12), 4201e4220.
- Niksokhan, M. H., Kerachian, R., & Karamouz, M. 2009. A game theoretic approach for trading discharge permits in rivers. *Water Science and Technology* 60(3), 793-804.



- Sedghamiz, A., Nikoo, M.R., Heidarpour, M., Sadegh, M. 2018. Developing a non-cooperative optimization model for water and Crop area allocation based on leader-followers game. *J. Hydrol.* 567, 51e59.
- Tavakoli, A., Kerachian, R., Nikoo, M.R., Soltani, M., Estalaki, S.M. 2014. Water and waste load allocation in rivers with emphasis on agricultural return flows: application of fractional factorial analysis. *Environmental monitoring and assessment* 186 (9), 5935e5949.
- Wu, J., Luo, J., Du, X., Zhang, H. and Qin, S. 2022. Optimizing water allocation in an inter-basin water diversion project with equity-efficiency tradeoff: A bi-level multi-objective programming model under uncertainty. *J Clean Prod* 371:133606
- Xu, J., Hou, S., Yao, L. and Li, C. 2017. Integrated waste load allocation for river water pollution control under uncertainty: a case study of Tuojiang River, China. *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* 1e19.