



## Transboundary Water Resources Allocation Based on the Optimal Proportional Bankruptcy Rule: A Case Study of the Sirwan-Diyala Transboundary Basin

B. Asl-Rousta<sup>1\*</sup>, S. J. Mousavi<sup>2</sup>

### Abstract

One of the challenges in water resources planning and management is allocating water under scarcity, where available resources are insufficient to meet demands. In such cases, water allocation can be approached using bankruptcy rules. However, applying these rules to complex water resource systems requires addressing both the spatial heterogeneity and temporal mismatch between water availability and demands. In this study, optimal proportional bankruptcy coefficients are obtained using NSGAI-MODSIM multi-objective simulation-optimization model, specifically developed for the Sirwan-Diyala transboundary basin shared by Iran and Iraq. The model incorporates spatial and temporal variability of water development plans through the MODSIM decision-support system. Within the NSGA-II multi-objective optimization algorithm, the objective functions are the maximization of each country's self-utility function. To evaluate the solutions, a stability index is utilized, measuring the distance from each country's best allocation status. Results indicated that under the proposed allocation scheme, Iraq would need to reduce its agricultural water demand by 14%. Additionally, when temporal reliability for meeting agricultural demands is included in the objective functions, both countries must further reduce their agricultural demands by 9% and 62% for Iran and Iraq, respectively. The results also indicated that meeting the high agricultural demand in Iraq leads to ecological unsustainability on the Iraqi-side of the basin.

**Keywords:** Optimal Proportional Bankruptcy Rule, Optimization-Simulation, NSGAI-MODSIM, Sirwan-Diyala Transboundary River Basin.

Received: April 9, 2025

Accepted: August 7, 2025

## تخصیص منابع آب فرامرزی براساس قاعده ورشکستگی تناسب بهینه؛ مطالعه موردی: حوضه فرامرزی سیروان-دیاله

بنت‌الهدی اصل روستا<sup>۱\*</sup> و سید جمشید موسوی<sup>۲</sup>

### چکیده

یکی از چالش‌های پیش رو در برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب، تخصیص آب در شرایط کمبود است، زمانی که مقدار منابع آب موجود برای تأمین کامل تقاضاها کافی نیست. در این شرایط، مسئله تخصیص منابع آبی را می‌توان با استفاده از قواعد ورشکستگی فرمول‌بندی و حل کرد. با این وجود، استفاده از قواعد ورشکستگی در مسأله تخصیص آب در سیستم‌های منابع آب پیچیده، مستلزم احتساب ناهمگنی مکانی و توزیع زمانی منابع آب در مقایسه با نیازها است. در این تحقیق، ضرایب ورشکستگی تناسب بهینه با استفاده از مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی چندهدفه NSGAI-MODSIM برای حوضه سیروان-دیاله مشترک بین ایران و عراق، استخراج شده است. در این مدل، ناهمگنی زمانی و مکانی طرح‌های توسعه منابع آب در سیستم تصمیم‌یار رایانه‌ای تخصیص منابع-مصارف MODSIM شبیه‌سازی شده است. توابع هدف در مدل بهینه‌ساز چندهدفه تخصیص نیز که در قالب الگوریتم تکاملی NSGAI فرمول‌بندی و حل شده است، بیشینه‌سازی مطلوبیت کشورها هستند. برای بررسی پایداری جواب‌ها، از شاخص کمترین انحراف از بهترین وضعیت تخصیص منابع آب برای کشورها استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در جواب پیشنهادی، کشور همسایه، عراق، باید ۱۴ درصد از تقاضای آب کشاورزی خود را کاهش دهد. همچنین، در صورت احتساب اطمینان‌پذیری زمانی تأمین نیاز در توابع هدف، لازم است هر دو کشور مقدار تقاضاهای کشاورزی خود را به میزان بیشتری (ایران ۹ درصد و عراق ۶۲ درصد) کاهش دهند. نتایج همچنین نشان می‌دهند تأمین تقاضای بالای کشاورزی در عراق سبب ناپایداری اکولوژیکی در بخش عراقی حوضه می‌شود.

**کلمات کلیدی:** قاعده ورشکستگی تناسب بهینه، بهینه‌سازی-شبیه‌سازی، NSGAI-MODSIM، حوضه رودخانه فرامرزی سیروان-دیاله.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۵/۱۶

1- Assistant Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: hodarousta@ut.ac.ir

2- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. Email: jmosavi@aut.ac.ir

\*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.515904.2850](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.515904.2850)

۱- استادیار، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

رشد جمعیت و توسعه مناطق شهری و صنعتی و کشاورزی، بر دسترسی به منابع آب شیرین برای مصارف انسانی و نیازهای محیط‌زیستی تأثیر گذاشته است (Dinar et al., 2013). بسیاری از این منابع آب شیرین، فرامرزی هستند، تا آنجا که تقریباً ۲۷۶ حوضه رودخانه‌ای بین‌المللی در سراسر جهان وجود دارد که بین ۱۴۸ کشور کرانه‌ای<sup>۱</sup>، مشترک هستند (De Stefano et al., 2012). در نتیجه، ایجاد محدودیت در دسترسی به منابع آب شیرین مشترک می‌تواند به ایجاد تنش و درگیری و یا انجام اقدامات همکاری‌محور مشترک برای حفظ این منابع بین کشورهای کرانه‌ای منجر شود. در شرایط کمبود آب، وجود مکانیزم‌های تخصیص آب مورد توافق همه کشورهای کرانه‌ای ضروری بوده و فقدان آن ممکن است به اقدامات یک‌جانبه برخی از کشورها بدون توجه به پایداری کل حوضه و در نتیجه بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب مشترک منجر شود که به چنین وضعیتی "تراژدی منابع مشترک"<sup>۲</sup> گفته می‌شود (Degefu and He, 2016; Degefu et al., 2018; Madani, 2010).

برای مطالعه و شبیه‌سازی اختلاف یا همکاری در تخصیص منابع آب حوضه رودخانه‌های مشترک می‌توان روش‌های نظریه بازی‌ها را مورد استفاده قرار داد (Madani et al., 2014). بازی‌های همکاری‌محور (CG)<sup>۳</sup> زمانی استفاده می‌شوند که منافع افزایشی ناشی از همکاری بین طرفین وجود داشته باشد (Kucukmehmetoglu, 2009; Teasley and McKinney, 2011). در شرایط کمبود آب یا نبود منافع افزایشی، بازی‌های ورشکستگی (BG)<sup>۴</sup> که در دسته بازی‌های همکاری‌محور طبقه‌بندی می‌شوند (Von Neumann and Morgenstern, 1944)، به‌عنوان روش‌هایی کارا برای تخصیص یک دارایی<sup>۵</sup> (E) میان گروهی از مدعیان (متقاضیان) (C)<sup>۶</sup>، جایی که مجموع ادعاها (تقاضاها) از کل دارایی (منابع) موجود فراتر می‌رود، در نظر گرفته می‌شوند (Degefu et al., 2018; Rightnar and Dinar, 2020; Yuan et al., 2023; Zheng et al., 2022). تخصیص‌های بازی‌های همکاری‌محور استاندارد از بازی‌های ورشکستگی کاملاً متفاوت است؛ زیرا روش‌های CG بر تخصیص منافع افزایشی حاصل از همکاری تمرکز دارند در حالی که روش‌های BG بر مبنای تخصیص کل کمبود میان طرفین هستند (Madani et al., 2014). سه قاعده<sup>۷</sup> کلاسیک و رایج در بازی‌های ورشکستگی عبارتند از: قاعده تناسب (PRO)<sup>۸</sup>، قاعده مقید به ضرر یکسان (CEL)<sup>۹</sup> و قاعده مقید به سود یکسان (CEA)<sup>۱۰</sup> (Mianabadi et al., 2014).

در سال‌های اخیر، استفاده از بازی‌های ورشکستگی (BG) در مسائل مختلف تخصیص منابع از جمله تخصیص منابع آب افزایش یافته

است. از اولین تلاش‌ها برای استفاده از قواعد ورشکستگی در مسأله تخصیص آب (Ansink and Weikard (2012) ابتدا مسأله تخصیص آب در رودخانه را به دنباله‌ای از مسائل دو عامله‌ی تقسیم آب تبدیل نمودند. این مسائل کاهش‌یافته<sup>۱۱</sup> از نظر ریاضی، معادل مسائل ورشکستگی بودند و بنابراین توانستند آن‌ها را با استفاده از قواعد ورشکستگی حل کنند. از چهار قاعده کلاسیک ورشکستگی PRO، CEL، CEA و تالمود<sup>۱۲</sup> TAL استفاده شد و نام این روش بازتخصیص منابع آب را قواعد تقسیم متوالی (SSR<sup>۱۳</sup>) گذاشتند. ایشان با استفاده از این روش اثر ترتیب یا توالی حضور ذی‌نفعان (از بالادست تا پایین‌دست) را از مسأله تقسیم آب حذف نمودند. (Madani et al. (2014) در تلاش برای احتساب تغییرپذیری مکانی و زمانی سیستم‌های منابع آب از یک مدل ساده بهینه‌سازی غیرخطی شبکه جریان برای استخراج طرح‌های تخصیص مبتنی بر ورشکستگی در حوضه‌های رودخانه‌ای کم‌آب استفاده کردند. آنها از چهار روش کلاسیک تناسب، تناسب تعدیل شده (AP<sup>۱۴</sup>)، CEL، CEA استفاده نمودند و یک شاخص پایداری جدید برای ارزیابی میزان پایداری جواب‌ها ارائه نمودند. نتایج تحقیق برای سناریوهای مختلف جریان هیدرولوژیکی و میزان تقاضای مختلف نشان داد پایداری جواب‌ها به میزان جریان رودخانه و میزان تقاضا حساس است. (Mianabadi et al. (2014) یک قاعده جدید ورشکستگی را برای تخصیص منابع آب مشترک بر اساس نرخ مشارکت و نرخ ادعاهای کشورهای کرانه‌ای، با در نظر گرفتن کنوانسیون ۱۹۹۷ سازمان ملل توسعه دادند و نتایج را با روش‌های PRO، CEL، CEA و SSR مبتنی بر PRO مقایسه کردند. نتایج نشان دهنده تخصیص‌های متفاوت روش پیشنهادی از روش‌های کلاسیک بود با این برتری که روش پیشنهادی می‌توانست در حل مناقشات بر سر تخصیص آب در حوضه‌های فرامرزی کارایی بیشتری داشته باشد؛ چراکه میزان مشارکت کشورهای کرانه نیز در آن در نظر گرفته شده بود. (Sechi and Zucca (2015) از قواعد ورشکستگی PRO، CEL، CEA، TAL و AP برای تخصیص آب در یک سیستم پیچیده منابع آب در ایتالیا استفاده کرده و براساس مفهوم "اشتقاق به پرداخت"<sup>۱۵</sup> برای ذی‌نفعان اولویت در نظر گرفتند. نتایج نشان داد تخصیص مبتنی بر روش‌های TAL و AP عملکرد بهتری در توازن منابع موجود داشته است. (Degefu et al. (2018) تئوری چانه‌زنی و قواعد ورشکستگی را با در نظر گرفتن بهره‌وری، عدالت و پایداری برای بازتخصیص آب و رفاه ناشی از تخصیص آب بین کشورهای کرانه رود فرات (ترکیه، سوریه و عراق) ترکیب کردند. نتایج نشان داد چهارچوب پیشنهادی سبب افزایش کارایی مصرف آب شد. همچنین، رفاه مالی (مازاد تولید ناخالص داخلی) حاصل از

بازتخصیص آب ۴۳/۴۳ درصد از رفاه مالی تولید شده حاصل از رفتار یکجانبه کشورها بیشتر بود. (Zheng et al., 2022) به منظور تخصیص آب در شرایط کمبود از پنج قاعده ورشکستگی PRO، CEA، CEL، TAL و AP و یک قاعده تخصیص جدید با نام قاعده حداقل همپوشانی اصلاح شده (AM<sup>16</sup>) که ویژگی‌ها و قیدها بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب را در نظر می‌گرفت استفاده کردند. در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی طرح‌های توسعه منابع آب شهر اژوه<sup>۱۷</sup> کشور چین از مدل GWAS<sup>18</sup> استفاده شد و در نهایت از پنج روش رأی‌گیری برای انتخاب بین گزینه‌های مختلف تخصیص استفاده شد. نتایج نشان دهنده برتری روش AMO براساس ۴ روش از ۵ روش رأی‌گیری و کارآمدی این روش در تخصیص آب در شرایط کمبود است.

در ایران نیز با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک حاکم بر بسیاری از حوضه‌های آبریز و بارگذاری بیش از حد بر منابع آبی، مسأله بازتخصیص منابع آب در شرایط کمبود مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. به عنوان مثال Oftadeh and Shourian (2016) کاربرد دو روش ورشکستگی PRO و یک روش پیشنهادی با نام روش حفاظت از محیط‌زیست با ورشکستگی عامل‌ها (ABEP<sup>19</sup>) در حل اختلاف آبی بین بخش کشاورزی و نیاز محیط‌زیست دریاچه ارومیه در حوضه زرينه‌رود به‌عنوان مهم‌ترین و بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه بررسی کرده‌اند، علاوه بر دو روش مذکور، توقف کشاورزی آبی به عنوان یک گزینه دیگر بررسی و نتایج آن با دو روش ورشکستگی مقایسه شده است. بر اساس نتایج، توقف تخصیص آب به کشاورزی می‌تواند بیش از قواعد ورشکستگی به احیای دریاچه در معرض خطر ارومیه کمک کند ولیکن این امر توجیه‌پذیر و عملی نیست، مگر اینکه با خرید حقایق آب از کشاورزان یا مالکان زمین توسط سازمان‌های دولتی مسئول یا بخش‌های خصوصی مرتبط همراه شود. (Jamalomidi and Moridi (2020) با بهره‌گیری از قواعد ورشکستگی PRO، CEL، CEA، TAL و پینایل (PIN<sup>20</sup>) به بازتخصیص منابع آب زیرزمینی آبخوان حاجی آباد در هرمزگان پرداختند و اثر اعمال این قواعد بر تغییرات تراز آبخوان را از طریق مدل MODFLOW بررسی نمودند. نتایج نشان داد از نظر بهبود سطح تراز آب زیرزمینی یک روش واحدی برای نواحی مختلف آبخوان نمی‌توان در نظر گرفت، هرچند روش CEL پایداری بیشتری از سایر روش‌ها دارد. (Bahrami Jovein et al. (2023) برای بازتخصیص منابع آبخوان مشترک نیشابور-سبزوار-عطایه، ابتدا با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی مبتنی بر معیارهای توسعه پایدار در حوزه‌های کشاورزی، شرب و صنعت برای هر یک از دشت‌های نیشابور، سبزوار و عطایه وزن‌هایی در نظر گرفتند، سپس از روش‌های ورشکستگی

به صورت وزن‌دار استفاده کردند. بدین ترتیب روش‌های تناسب وزن‌دار WPRO<sup>21</sup>، مقید به سود یکسان وزن‌دار WCEA<sup>22</sup>، مقید به ضرر یکسان وزن‌دار WCEL<sup>23</sup>، و مقید به ضرر یکسان وزن‌دار اصلاح‌شده (MWCEL<sup>24</sup>)، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، برای مقایسه مقبولیت روش‌های ورشکستگی مورد استفاده سه شاخص اکثریت آراء، قدرت و پایداری تخصیص ورشکستگی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد از بین شاخص‌های مقایسه، شاخص پایداری تخصیص ورشکستگی بهترین شاخص بوده که براساس آن روش WCEA به عنوان پایدارترین روش تخصیص برگزیده شد. (Sabri and Zarghami (2023) از قواعد ورشکستگی PRO، CEL، CEA، TAL، PIN و AP در بازتخصیص آب بین ذینفعان از بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شرب آبخوان دشت دامغان بهره گرفتند، برای شبیه‌سازی اثر اعمال روش‌های مذکور بر تغییرات تراز آب زیرزمینی آبخوان از مدل MODFLOW استفاده نمودند و برای ارزیابی پایداری جواب‌ها شاخص‌های اکثریت آراء، پایداری در رفتار و تراز آب زیرزمینی با در نظر گرفتن عدم قطعیت و یک شاخص پیشنهادی که مجموع وزن‌دار شاخص‌های مذکور بود را به کار گرفتند. نتایج شاخص پیشنهادی نشان دهنده برتری روش CEL بود. (Asl-Rousta and Mousavi (2025) یک چارچوب شبیه‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر نظریه ورشکستگی برای استفاده عادلانه و منطقی از منابع آب در حوضه رودخانه‌های فرامرزی توسعه دادند. توابع هدف مدل بهینه‌سازی این تحقیق عبارت بود از بیشینه نمودن پایداری محیط‌زیستی و بیشینه نمودن بهره‌وری اقتصادی در سطح کل حوضه. در این تحقیق همچنین از یک سازوکار مبتنی بر اصل عقلانیت و مفهوم برابری برای انتخاب پاسخ پایدار قابل قبول برای ذی‌نفعان استفاده شد. ایشان چهارچوب پیشنهادی خود را برای حوضه رودخانه فرامرزی سیروان-دیاله مشترک بین ایران و عراق مورد آزمون قرار دادند، نتایج نشان دهنده لزوم کاهش ۱۲ درصدی تقاضای کشاورزی برای کشور عراق بود.

بررسی تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد در اکثر تحقیقات، ناهمگنی (تغییرپذیری) زمانی و مکانی منابع آب و تقاضاهای آبی دیده نشده است و قواعد ورشکستگی صرفاً به صورت کلی بر میزان تقاضا به صورت حجمی اعمال شده‌اند و یا در صورت وجود مدل‌سازی فاقد جزئیات لازم از تغییرات مورد اشاره بوده‌اند (Madani et al., 2014; Oftadeh and Shourian, 2016; Jamalomidi and Moridi, 2020; Zheng et al., 2022; Sabri and Zarghami, 2023). تنها در تحقیق (Asl-Rousta and Mousavi (2025) تغییرپذیری زمانی و مکانی منابع آب و تقاضاهای آبی و همچنین نحوه قرارگیری تقاضاها از بالادست به

پایین دست و نیز اولویت‌های تخصیص، به صورت بلندمدت از طریق مدل تخصیص منابع-مصارف MODSIM شبیه‌سازی شده است. ولیکن هدف اصلی تحقیق مذکور توسعه یک چهارچوب برای تخصیص عادلانه منابع آب بوده است و به همین دلیل توابع هدف مدل بهینه‌سازی برای کل حوضه به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. در حالی که در حوضه رودخانه‌های بین‌المللی مشترک بین دو یا چند کشور فرض همکاری کامل کشورها برای حفظ پایداری کل حوضه بخصوص برای حوضه‌های مناطق خشک دچار تنش آبی، می‌تواند دور از واقعیت باشد (Dinar et al., 2013). حتی در صورت وجود همکاری‌های ظاهری، باز هم عموماً کشورها بصورت غیرعلنی در صدد حداکثر نمودن مطلوبیت‌های خود و تأمین حداکثری رفاه شهروندان خود هستند. لذا در تحقیق حاضر از ابزار توسعه یافته توسط (Asl-Rousta and Mousavi, 2025) بهره گرفته شده است تا فرضیات مبتنی بر واقعیت‌های حاکم بر حوضه رودخانه‌های بین‌المللی اعمال شود و ضرایب ورشکستگی کشورها متناسب با این واقعیت‌ها تعیین شود. در این راستا از سوی دیگر بیان شد که در ابزار توسعه یافته تغییرپذیری زمانی تقاضاها احتساب شده است، با توجه به این که در حوضه فرامرزی سیروان-دیاله فصل تقاضای حداکثری آب در دو کشور یکسان است، تحویل زمانی آب نیز حائز اهمیت فراوان است. در این راستا نوآوری دیگر این تحقیق بررسی اثر احتساب نیل به سطوح حداکثری اطمینان پذیری زمانی تأمین تقاضاها بر ضرایب ورشکستگی به‌عنوان گامی دیگر در احتساب تغییرپذیری زمانی تقاضاها در تعیین ضرایب ورشکستگی کشورها است.

## ۲- روش انجام تحقیق

### ۲-۱- معرفی محدوده مورد مطالعه

رودخانه فرامرزی سیروان-دیاله به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های رودخانه دجله، میان ایران و عراق مشترک است. حوضه آبریز سیروان در غرب ایران در استان‌های کردستان و کرمانشاه قرار دارد و از غرب به مرز ایران و عراق، از شرق به استان همدان و حوضه قروه دهگلان، از شمال به حوضه آبریز رودخانه‌های قزل‌اوزن و زرینه‌رود و از جنوب و جنوب شرقی به سرشاخه‌های کرخه (گاماسیاب و قره‌سو) محدود می‌شود. رودخانه سیروان از رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب ایران سرچشمه می‌گیرد، به سمت غرب جریان پیدا می‌کند تا به مرز ایران و عراق برسد (Asl-Rousta et al., 2017)، حدود ۳۰ کیلومتر مرز بین ایران و عراق را تشکیل می‌دهد (UN-ESCWA and BGR, 2013) و سپس وارد عراق می‌شود و از آن نقطه به بعد به نام دیاله شناخته می‌شود.

رودخانه الوند نیز در این حوضه، و در استان کرمانشاه از غرب به شرق جریان داشته و پس از خروج از کشور، در عراق به دیاله می‌پیوندد. دو رودخانه سیروان و الوند مهم‌ترین رودخانه‌های این حوضه هستند، بین این دو رودخانه تعدادی رودخانه با آبدهی کمتر نیز وجود دارد که از ایران سرچشمه گرفته و به عراق منتهی می‌شوند.

تعدادی سد در این حوضه با اهداف تأمین آب، تولید انرژی برقایی و کنترل سیلاب در ایران و عراق ساخته شده‌اند (Avarideh et al., 2017). برنامه‌های توسعه منابع آب در بخش ایرانی از سال ۱۹۴۰ برنامه‌ریزی شده بودند ولی اجرای آن‌ها به دلیل جنگ تحمیلی هشت‌ساله و همچنین دشواری‌های ساخت‌وساز در مناطق کوهستانی به تعویق افتاد (Avarideh et al., 2017). با بازگشت ساکنان استان‌های مرزی ایران به خانه‌های خود پس از جنگ و نیاز به کاهش فقر و افزایش رفاه در منطقه، دولت برنامه‌های توسعه منابع آب را در بخش ایرانی این حوضه از سر گرفت. در سوی دیگر مرز، عراق ساخت سدهای بزرگ و طرح‌های توسعه منابع آب و بهره‌برداری از رودخانه‌های مشترک با ایران را با راندمان بسیار پایین، زودتر شروع کرده بود (Avarideh et al., 2017). در نتیجه، افزایش بهره‌برداری از منابع آب در هر دو سوی مرز سبب شد تقاضاهای آبی بیشتر از منابع شده و حوضه در وضعیت ورشکستگی قرار گیرد. شکل ۱ حوضه سیروان-دیاله را به‌صورت طرحواره نشان می‌دهد. براساس این شکل Zone 1 در ایران بر Zone 3 در عراق تأثیری ندارد و Zone 2 در ایران تنها بر Zone 5 در عراق تأثیر می‌گذارد.

## ۲-۲- قواعد ورشکستگی

مسئله کلاسیک ورشکستگی، که شاخه‌ای از نظریه بازی‌های همکارانه است به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن یک منبع (E) باید بین گروهی از مدعیان (C) توزیع شود؛ اما مقدار منبع برای تأمین تمام ادعاها کافی نباشد. بنابراین، منبع باید به‌گونه‌ای توزیع شود که هر مدعی مقداری غیرمنفی دریافت کند که از ادعای او بیشتر نباشد. یکی از مسائل رایج در برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب، تخصیص آب در شرایط کمبود است، زمانی که مقدار منابع آب موجود برای تأمین کامل تقاضاها کافی نیست. در این حالت، مسئله را می‌توان با استفاده از روش‌های بازی ورشکستگی (BG) حل کرد.

قاعده تناسب (Proportional-PRO) یکی از قواعد کلاسیک ورشکستگی است (Mianabadi et al., 2015) که مطابق با آن،

همه مدعیان به یک نسبت از ادعاهای خود را دریافت می‌کنند (رابطه (۱)):

$$x_s^{\text{PRO}} = \rho \cdot c_s \quad \text{where} \quad \rho = \frac{E}{C} \quad (1)$$

که در آن  $s$  نشان دهنده هر مدعی،  $c_s$  میزان ادعای هر مدعی،  $E$  و  $C$  به ترتیب میزان کل دارایی و میزان کل ادعا و  $x_s^{\text{PRO}}$  تخصیص به هر مدعی براساس قاعده تناسب است.

فرض اساسی در قواعد کلاسیک ورشکستگی از جمله قاعده تناسب این است که دسترسی به منابع به صورت همگن باشد، در حالی که سیستم‌های منابع آب به لحاظ مکانی و توزیع زمانی منابع آب در مقایسه با نیازها ناهمگن هستند (Madani et al., 2014)، بنابراین، این قواعد ممکن است در صورت استفاده در قالب‌های اصلی خود، تخصیص‌های آب غیرقابل اجرا برای حوضه رودخانه‌ها تولید کنند (Madani et al., 2014). یکی دیگر از مسائل مربوط به سیستم‌های رودخانه‌ای، به‌ویژه هنگامی که مشترک هستند، ارزش

آب و عدم تقارن بین طرفین است. در این تحقیق به‌منظور احتساب محدودیت‌های مورد اشاره، از یک مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی چندهدفه برای استخراج ضرایب ورشکستگی متناسب بهینه (OpPro) استفاده شده است. به‌منظور شبیه‌سازی زمانی و مکانی امان‌های حوضه آبریز از سیستم تصمیم‌یار رایانه‌ای تخصیص منابع-مصارف MODSIM استفاده شده است و این نرم‌افزار به‌صورت برخط به الگوریتم بهینه‌سازی دوهدفه NSGAII متصل شده است و تلاش شده است با در نظر گرفتن ضرایب مناسب در توابع هدف مدل NSGAII عدم تقارن کشورهای کرانه‌ای شبیه‌سازی شود. در نهایت و با توجه به این که خروجی مدل NSGAII-MODSIM توسعه یافته، یک منحنی پارتو از ضرایب ورشکستگی بهینه OpPro است، به‌منظور انتخاب از میان پاسخ‌های به‌دست آمده یک شاخص پایداری برمبنای انحراف جواب‌ها از بهترین وضعیت تخصیص برای هر کشور، تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ روندنمای کلی تحقیق را نشان می‌دهد.

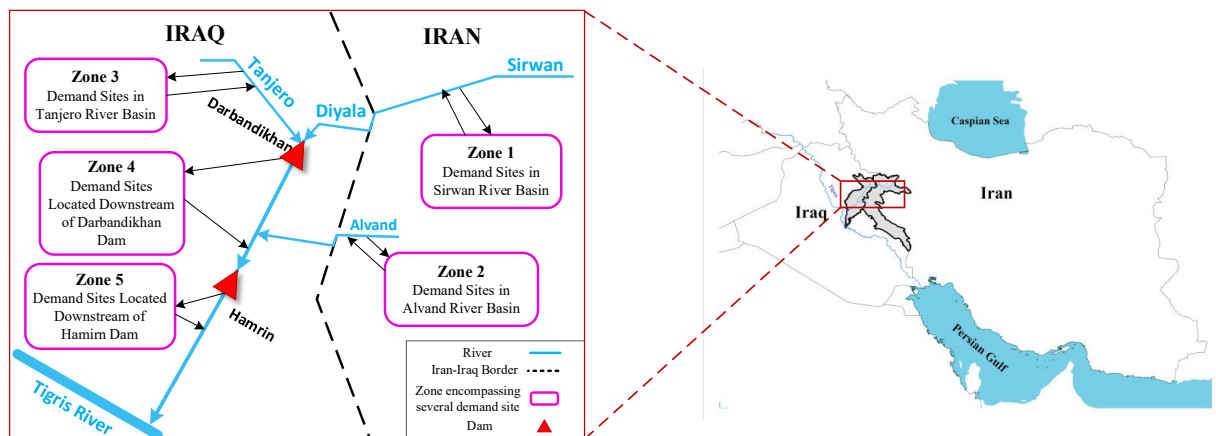


Fig. 1- Schematic illustration of the Sirwan-Diyala transboundary river basin

شکل ۱- طرحواره حوضه فرامرزی سیروان-دیاله

کدهای سفارشی با زبان‌های Visual Basic.NET یا C#.NET است که از طریق Microsoft.NET Framework در این مدل کامپایل می‌شوند. این ویژگی به کاربران امکان می‌دهد تا به متغیرهای اصلی و کلاس‌های شیء‌مدار دسترسی داشته باشند و بتوانند بدون نیاز به بازبرنامه‌نویسی و بازکامپایل کد منبع، تنظیمات سفارشی برای حوزه‌های آبریز پیچیده اعمال کنند. با استفاده از قابلیت کدنویسی سفارشی (custom coding)، کاربران می‌توانند در هر تکرار اجرای مدل، مقادیر متغیرهای مورد نظر را به مقادیر دلخواه تغییر داده و نتایج شبیه‌سازی را مقایسه کنند. در مدل MODSIM توسعه داده شده برای منطقه مورد مطالعه، ترتیب

## ۳-۲- چارچوب مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی

### ۳-۲-۱- مدل شبیه‌سازی

در این مطالعه مدل تخصیص منابع و مصارف MODSIM (Labadie, 2006)، برای شبیه‌سازی فرآیندها و عناصر سیستم حوزه آبریز مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل از یک الگوریتم بهینه‌سازی جریان شبکه‌ای در هر دوره استفاده می‌کند تا آب را به گره‌های مختلف براساس ملاحظات فیزیکی، هیدرولوژیکی و نهدادی از پیش تعریف‌شده تخصیص دهد (Shourian et al., 2008). یکی از ویژگی‌های MODSIM توانایی آن در تهیه

اولویت تقاضاها محیط‌زیست، شرب، صنعت و سپس کشاورزی در نظر گرفته شده است. همچنین، اولویت بالایی برای استفاده آب

در عراق در نظر گرفته شده است.

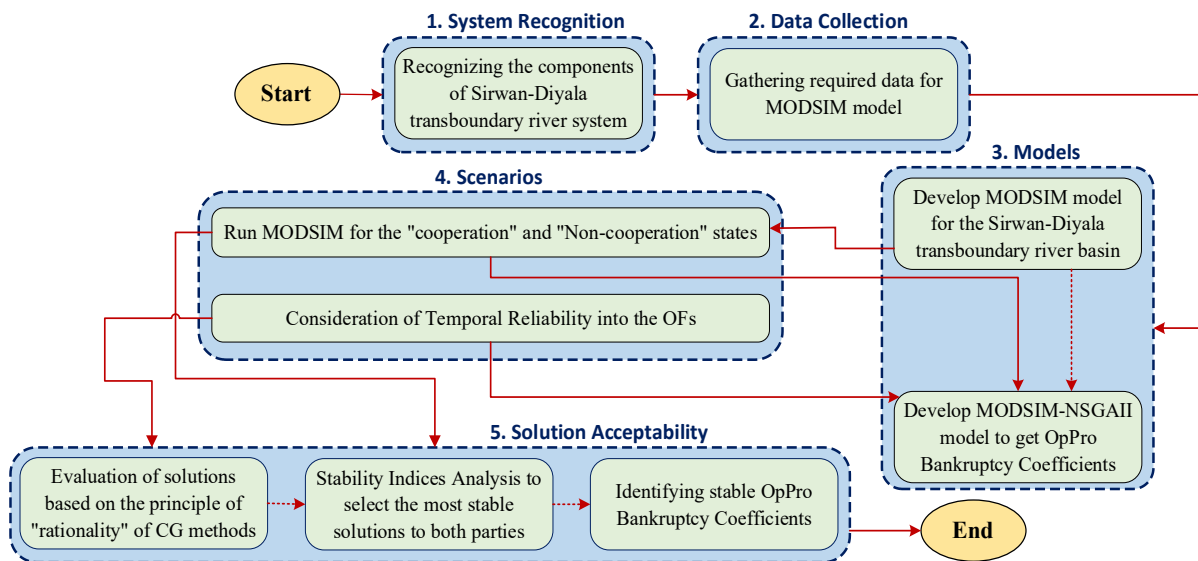


Fig. 2- The flow diagram of the study

شکل ۲- روندنمای کلی تحقیق

### ۲-۳-۲- مدل بهینه‌سازی

هر مدل بهینه‌سازی شامل توابع هدف، قیدها، متغیرهای تصمیم و یک الگوریتم مناسب برای حل است. (Mousavi and Shourian, 2010).

### - توابع هدف

توابع مطلوبیت کشورهای ایران و عراق به‌عنوان توابع هدف مدل بهینه‌سازی دوهدفه در نظر گرفته شده‌اند و مدل بهینه‌سازی درصد حداکثر نمودن همزمان تابع مطلوبیت ایران و تابع مطلوبیت عراق است. این توابع به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$f_1(y) = AgBen_{Ir} + C_0 (WS_{Ir} \times SEC_{Ir}) \quad (2)$$

$$f_2(y) = AgBen_{Iq} + C_0 (WS_{Iq} \times SEC_{Iq}) \quad (3)$$

که در آن  $AgBen_{Iq}$  و  $AgBen_{Ir}$  منافع حاصل از کشاورزی به‌ترتیب در ایران و عراق،  $SEC_{Iq}$  و  $SEC_{Ir}$  شاخص پایداری اکولوژیکی به‌ترتیب در ایران و عراق،  $WS_{Iq}$  و  $WS_{Ir}$  شاخص کمبود آب به‌ترتیب در ایران و عراق،  $C_0$  ضریب تعدیل است. مراحل محاسبه منافع حاصل از کشاورزی در ایران و عراق به‌ترتیب زیر است:

۱- الگوی کشت غالب در سیروان و دیاله شناسایی شد. مشخص شد محصول غالب در این مناطق "گندم" است (Lucani and Saade, 2012);

۲- مقدار آب مصرفی برای تولید یک تن گندم در سیروان و دیاله از water footprint network برای دوره زمانی ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ استخراج (Mekonnen and Hoekstra, 2010) شده است. این مقدار در سیروان و دیاله به ترتیب ۴۴۱۷ و ۵۷۰۹ متر مکعب تخمین زده شده است؛

۳- قیمت گندم ۴۶۰ دلار به ازای هر تن در نظر گرفته شده است (Tridge, 2019; USDA, 2019). بر این اساس، منافع حاصل از کشاورزی در ایران و عراق به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$AgBen_{Ir} = 460 \times \frac{WAg_{Ir}}{0.004417} \quad (4)$$

$$AgBen_{Iq} = 460 \times \frac{WAg_{Iq}}{0.005709} \quad (5)$$

که در آن  $WAg_{Iq}$  و  $WAg_{Ir}$  (به میلیون مترمکعب) حجم سالانه آب تخصیص داده شده به کشاورزی به ترتیب در ایران و عراق است.

شاخص‌های کمبود آب (WS) برای ایران و عراق به ترتیب مراحل زیر محاسبه می‌شود:

اکولوژیکی،  $\alpha'$  اطمینان‌پذیری حجمی تأمین نیازهای اکولوژیکی،  $\gamma$  تاب‌آوری تأمین نیازهای اکولوژیکی.

در روابط قبل  $\alpha$ ،  $\alpha'$ ،  $\gamma$ ،  $WAg_{Ir}$  و  $WAg_{Iq}$  خروجی‌های مدل شبیه‌سازی MODSIM هستند که در مدل بهینه‌سازی NSGAI مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین انتخاب ضرایب تابع هدف متفاوت  $\frac{460}{0.004417}$  و  $\frac{460}{0.005709}$  و همچنین ضرایب  $WS_{Iq}$  و  $WS_{Ir}$  به منظور احتساب عدم تقارن و وجود تفاوت در میزان مصرف آب و وضعیت منابع آب ایران و عراق است. احتساب عدم تقارن دو کشور به منظور افزایش مقبولیت جواب‌های خروجی صورت گرفته است.

#### متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی ضرایب ورشکستگی OpPro برای ایران و عراق ( $\rho_{Iq}$  و  $\rho_{Ir}$ ) هستند که قرار است از طریق مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی به دست آیند. مقادیر این متغیرها توسط مدل بهینه‌سازی NSGAI تولید شده و به‌عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی MODSIM وارد می‌شوند.

#### قیدها

در مدل بهینه‌سازی دو نوع قید وجود دارد. نوع اول شامل قیدها از نوع تساوی‌ها و نامساوی‌ها هستند که مستقیماً توسط الگوریتم NSGA-II در نظر گرفته می‌شوند. نوع دوم، قیدهای هستند که درون مدل شبیه‌سازی MODSIM وجود دارند.

در این مطالعه، دو قید نامساوی (روابط (۹) و (۱۰)) مقادیر متغیرهای تصمیم را به حدود بالا و پایین آن‌ها محدود می‌کنند. درصد تقاضای کشاورزی تأمین‌شده در شرایط «عدم همکاری»، به‌عنوان حد پایین ضرایب ورشکستگی در نظر گرفته شده است تا اصل «عقلانیت» بازی‌های همکارانه رعایت شود.

$$\rho_{Ir}^{\min} \leq \rho_{Ir} \leq 100 \quad (۹)$$

$$\rho_{Iq}^{\min} \leq \rho_{Iq} \leq 100 \quad (۱۰)$$

که در آن  $\rho_{Iq}^{\min}$  و  $\rho_{Ir}^{\min}$  درصد تأمین تقاضای کشاورزی ایران و عراق در وضعیت «عدم همکاری» هستند و از شبیه‌سازی وضعیت «عدم همکاری» در مدل MODSIM به دست می‌آیند.

#### ۲-۳-۳- ارتباط مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

در مرحله اول از مدل NSGAI جمعیت  $P_0$  با تعداد  $N$  عضو (کروموزوم)، هر عضو (کروموزوم) شامل دو ژن (متغیرهای تصمیم،  $\rho_{Iq}$  و  $\rho_{Ir}$ ) به صورت تصادفی تولید می‌شود. متغیرهای تصمیم به

۱- نقشه رستر شاخص WS که مقادیر پیکسل‌های آن طبق رابطه پیشنهادی توسط (Mekonnen and Hoekstra, 2016) (رابطه (۶)) محاسبه شده است و برای کل جهان در دسترس است، از water footprint network تهیه شده است (Mekonnen and Hoekstra, 2016). در رابطه (۶)، Blue Water Footprint، ردپای آب آبی، Natural runoff جریان طبیعی رودخانه و Environmental flow requirements نیاز اکولوژیکی رودخانه است؛

۲- نقشه مذکور برای حوزه‌های سیروان و دیاله به صورت جداگانه استخراج شده است؛

۳- مقادیر میانگین شاخص‌های WS برای ایران (سیروان) و عراق (دیاله) با استفاده از ابزار محاسبات در GIS محاسبه شده است:

$$WS = \frac{\text{Blue Water Footprint}}{\text{Natural runoff} - \text{Environmental flow requirements}} \quad (۶)$$

خروجی مراحل بالا در جدول ۱ ارائه شده است.

**Table 1- WS index values of Iran and Iraq for the period of 1996-2005 (Mekonnen and Hoekstra, 2016)**

جدول ۱- مقادیر شاخص WS برای ایران و عراق برای دوره ۲۰۰۵-۱۹۹۶ (Mekonnen and Hoekstra, 2016)	
$WS_{Ir}$	$WS_{Iq}$
0.787417	2.378536

شاخص‌های پایداری اکولوژیکی ( $SEC_{Iq}$  و  $SEC_{Ir}$ ) امکان تأمین پایدار نیازهای زیست‌محیطی را نشان می‌دهند. در این مطالعه میانگین هندسی شاخص‌های پایداری قابلیت اطمینان<sup>۲۵</sup> و برگشت‌پذیری<sup>۲۶</sup> تأمین نیازهای اکولوژیکی ایران و عراق برای محاسبه  $SEC_{Iq}$  و  $SEC_{Ir}$  به صورت زیر استفاده شده است (Loucks, 1997; Sandoval-Solis et al., 2011):

$$SEC_{Ir} = \left( \sum_{n=1}^N (\alpha_n \times \alpha'_n \times \gamma_n)^{\frac{1}{3}} \right) / N \quad (۷)$$

$$SEC_{Iq} = \left( \sum_{m=1}^M (\alpha_m \times \alpha'_m \times \gamma_m)^{\frac{1}{3}} \right) / M \quad (۸)$$

که در آن  $N$  و  $M$  تعداد سایت‌های تقاضای نیاز اکولوژیکی به ترتیب در ایران و عراق،  $\alpha$  اطمینان‌پذیری زمانی تأمین نیازهای

مدل MODSIM خورنده (وارد) می‌شوند، مدل MODSIM برای هر یک از N عضو اجرا شده و مقادیر توابع مطلوبیت ( $f_1(y)$  و ( $f_2(y)$ ) محاسبه شده و برای ارزیابی به مدل NSGAI برگردانده می‌شوند. در NSGAI، مرتب‌سازی نامغلوب<sup>۲۷</sup> انجام می‌گیرد و جمعیت جبهه‌بندی می‌شود، سپس فاصله ازدحامی<sup>۲۸</sup> محاسبه می‌شود. با استفاده از تورنامنت دوگانه<sup>۲۹</sup> بین اعضا بر اساس رتبه جبهه و فاصله ازدحامی، والدین برای تولید نسل جدید انتخاب می‌شوند. سپس با استفاده از عملگرهای ترکیب<sup>۳۰</sup> و جهش<sup>۳۱</sup>، نسل جدید فرزندان تولید می‌شوند. جمعیت والد و فرزند با هم ترکیب می‌شوند و جمعیت  $P_t$  با اندازه  $2N$  ایجاد می‌شود. سپس مجدداً مرتب‌سازی نامغلوب انجام شده و N عضو برتر (بر اساس جبهه و فاصله ازدحامی) انتخاب می‌شوند و مجدداً به مدل MODSIM خورنده می‌شود. مراحل قبل به تعداد تکرار معینی انجام می‌گیرد تا جبهه<sup>۳۲</sup> (منحنی) پارتو نهایی حاصل شود.

#### ۲-۴- پایداری جواب‌ها

پاسخ مدل بهینه‌سازی دهدفه، یک منحنی پارتو است که هر نقطه از آن می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل بالقوه براساس ترجیحات تصمیم‌گیرندگان در نظر گرفته شود. بنابراین در شرایط ورشکستگی آبی که در آن طرفین مجبور به کاهش تقاضاهای خود تا مقدار مشخصی هستند، باید شاخص‌هایی وجود داشته باشد که توسط طرفین قابل قبول باشد. تعامل بین ایران و عراق شامل دو وضعیت حدی «همکاری» و «عدم همکاری» است. در مورد تخصیص آب، بهترین وضعیت برای ایران به‌عنوان کشور بالادست، وضعیت «عدم همکاری» است که در آن ایران استفاده از آب در عراق را در نظر نمی‌گیرد و تنها بخشی از آب که فراتر از تقاضای آب در ایران است به عراق جاری می‌شود. از سوی دیگر، بهترین وضعیت برای عراق وضعیت «همکاری» است که در آن ایران استفاده از آب در عراق را حتی زمانی که خودش با کمبود مواجه است، در اولویت در نظر می‌گیرد. در این مطالعه یک شاخص پایداری بر مبنای فاصله از بهترین وضعیت‌های تخصیص آب برای دو کشور به‌صورت روابط (۱۱) و (۱۲) تعریف شده است. پاسخی که در آن به‌صورت همزمان  $StI_{IR}$  و  $StI_{IQ}$  دارای مقادیر حداقل یا نزدیک به حداقل باشد (فاصله هر کشور از بهترین وضعیت خودش حداقل باشد) به‌عنوان پاسخ پایدار برای دو کشور در نظر گرفته می‌شود.

$$StI_{IR} = \frac{WAg_{IR} - WAg_{IR}^{IRBest}}{WAg_{IR}^{IRBest}} \quad (11)$$

$$StI_{IQ} = \frac{WAg_{IQ} - WAg_{IQ}^{IQBest}}{WAg_{IQ}^{IQBest}} \quad (12)$$

که در آن،  $StI_{IR}$  و  $StI_{IQ}$  شاخص‌های پایداری به‌ترتیب برای ایران و عراق،  $WAg_{IR}^{IRBest}$  حجم سالانه آب تخصیص داده شده به کشاورزی در ایران برای بهترین وضعیت ایران،  $WAg_{IQ}^{IQBest}$  حجم سالانه آب تخصیص داده شده به کشاورزی در عراق برای بهترین وضعیت عراق هستند.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- سناریوی پایه

مدل شبیه‌سازی MODSIM برای کل حوزه آبریز سیروان-دیاله توسعه داده شده است. در این مدل، داده‌های مربوط به تقاضای آب در بخش ایرانی از وزارت نیرو ایران و داده‌های مربوط به تقاضای آب در بخش عراقی از تحقیقات (2010) Hussein و Al-Faraj (2015) and Scholz and به‌دست آمده‌اند. این مدل یک مدل بزرگ مقیاس با ۵۶۰ گره (node) و ۵۷۵ اتصال (link) است. مدل MODSIM توسعه داده شده برای دو وضعیت حدی «همکاری» و «عدم همکاری» اجرا شده تا حدود پایین متغیرهای تصمیم (روابط (۹) و (۱۰)) و  $WAg_{IR}^{IRBest}$  و  $WAg_{IQ}^{IQBest}$  (روابط (۱۱) و (۱۲)) به دست آیند. در مدل توسعه‌یافته NSGAI-MODSIM، مقادیر تصادفی ضرایب ورشکستگی برای ایران و عراق (متغیرهای تصمیم،  $\rho_{IR}$  و  $\rho_{IQ}$ ) ابتدا توسط NSGAI تولید می‌شوند و این مقادیر به مدل MODSIM وارد می‌شوند. در بخش ۲-۲ تشریح شد که تحت قاعده ورشکستگی تناسب، مدعیان تنها بخشی کاهش یافته از ادعاها/تقاضاهای خود را دریافت می‌کنند (رابطه (۱))، بنابراین، مقادیر تقاضاهای کشاورزی در ایران در ضریب ورشکستگی تولیدشده برای ایران و مقادیر مربوط به عراق در ضریب تولیدشده برای عراق ضرب می‌شوند. سپس مدل MODSIM با مقادیر تقاضای کاهش یافته اجرا می‌شود و مقادیر توابع مطلوبیت محاسبه می‌گردند و به مدل NSGAI برمی‌گردند. این سناریو، «سناریوی پایه» نام دارد و خروجی‌های آن در جدول ۲ و منحنی پارتو خروجی در شکل ۳ ارائه شده است. باتوجه به جدول ۲، مقادیر ضرایب ورشکستگی ایران از ۷۸ تا ۱۰۰ متغیر است که به‌معنای نیاز به کاهش ۰ تا ۲۲ درصدی تقاضا کشاورزی ایران است. همچنین، مقادیر ضرایب ورشکستگی عراق از ۳۷ تا ۱۰۰ متغیر است که به‌معنای نیاز به کاهش ۰ تا ۶۳ درصدی تقاضا کشاورزی عراق است. بنابراین این نتایج حاکی از آن است که به‌طور کلی عراق باید به‌میزان بیشتری تقاضاهای خود را کاهش دهد. ارزیابی پاسخ‌ها برای انتخاب پایدارترین جواب نشان می‌دهد جواب ۶ با مقادیر  $StI_{IR}$  و  $StI_{IQ}$  به‌ترتیب ۰/۰۲- و ۰/۰۳- پایدارترین جواب با مقادیر  $\rho_{IR}$  و  $\rho_{IQ}$  به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۸۶ است. بنابراین

بهبوددهنده در نظر گرفته شده است با نتایج تحقیق Asl-Rousta and Mousavi (2025) (که در آن  $\rho_{Iq}$  و  $\rho_{Ir}$  برابر ۱۰۰ و ۸۸ به دست آمده بود) نشان می‌دهد در صورتی که هدف پایداری کل حوضه بوده و کشورها درصدد تخصیص عادلانه و منطقی منابع آب مشترک باشند، نیاز به کاهش تقاضاهای به‌میزان کمتری (۱۲ درصد) برای کشور عراق وجود دارد نسبت به حالتی که کشورها منافع خود را در نظر می‌گیرند و هدف حداکثرسازی مطلوبیت کشورها بوده و کشورها درصدد کم کردن فاصله از بهترین وضعیت خود هستند (۱۴ درصد).

مقایسه مقادیر ضرایب ورشکستگی با شاخص پایداری اکولوژیکی (جدول ۲ و شکل ۵ الف) نشان می‌دهد هرچه مقدار ضرایب ورشکستگی عدد کوچکتری باشد و در نتیجه تقاضاهای کشاورزی کاهش بیشتری داشته باشند، مقدار شاخص پایداری اکولوژیکی افزایش می‌یابد. بالعکس هرچه کشورها بیشتر به منافع کوتاه مدت خود توجه داشته باشند، پایداری اکولوژیکی کاهش می‌یابد و کشورها به وضعیت تراژدی منابع مشترک نزدیک‌تر خواهند شد.

مطابق با پایدارترین جواب، عراق باید تقاضای خود را به میزان ۱۴ درصد کاهش دهد. مقادیر  $\rho_{Iq}$  و  $\rho_{Ir}$  به دست آمده درحقیقت مقادیر بهینه ضرایب ورشکستگی برای ایران و عراق با در نظر گرفتن ناهمگنی مکانی و توزیع زمانی منابع آب در مقایسه با تقاضاها در سطح حوضه‌های آبریز و نیز حداکثر نمودن توابع مطلوبیت ایران و عراق هستند که این ضرایب به صورت پویا و توسط یک چارچوب بهینه‌سازی شبیه‌سازی به دست آمده‌اند. در تحقیقات قبلی، ناهمگنی مکانی و زمانی و مکانی سیستم‌های منابع آب در استخراج ضرایب ورشکستگی در تعداد محدودی از تحقیقات و به صورت محدود در نظر گرفته شده بودند (Madani et al., 2014; Oftadeh and Shourian, 2016; Jamalomididi and Moridi, 2020; Zheng et al.; 2022; Sabri and Zarghami, 2023) ولیکن در این تحقیق قواعد ورشکستگی به صورت ایستا احتساب شده بودند. در تحقیق (Asl-Rousta and Mousavi (2025) نیز توابع هدف برای کل حوضه در نظر گرفته شده بودند. مقایسه نتایج سناریوی پایه که در آن مطلوبیت کشورها به عنوان تابع هدف مدل

Table 2- Results of the MODSIM-NSGAI model for the “Baseline Scenario”

جدول ۲- نتایج مدل NSGAI-MODSIM برای سناریوی پایه

Solution	SEC <sub>Ir</sub>	SEC <sub>Iq</sub>	f <sub>1</sub> (y)	f <sub>2</sub> (y)	$\rho_{Ir}$	$\rho_{Iq}$	St <sub>Ir</sub>	St <sub>Iq</sub>
			E+08	E+08				
1	0.61	0.44	1.26	1.46	78	100	-0.19	0.04
2	0.59	0.54	1.56	1.17	100	37	0.02	-0.25
3	0.60	0.43	1.45	1.43	95	100	-0.06	0.01
4	0.59	0.52	1.54	1.25	100	47	0.00	-0.17
5	0.60	0.49	1.52	1.33	100	62	-0.01	-0.10
<b>6</b>	<b>0.60</b>	<b>0.44</b>	<b>1.50</b>	<b>1.39</b>	<b>100</b>	<b>86</b>	<b>-0.02</b>	<b>-0.03</b>
7	0.60	0.51	1.52	1.30	100	57	-0.01	-0.13
8	0.60	0.52	1.53	1.28	100	51	0.00	-0.15
9	0.60	0.43	1.49	1.42	99	97	-0.03	0.00
10	0.61	0.43	1.40	1.43	91	100	-0.09	0.01
11	0.60	0.53	1.56	1.19	100	39	0.02	-0.23
12	0.61	0.43	1.33	1.45	84	100	-0.15	0.02
13	0.60	0.48	1.51	1.35	100	70	-0.02	-0.07
14	0.60	0.47	1.50	1.36	100	74	-0.02	-0.06
15	0.60	0.54	1.55	1.22	100	41	0.01	-0.21
16	0.61	0.43	1.28	1.46	80	99	-0.18	0.03
17	0.61	0.43	1.30	1.45	82	100	-0.16	0.03
18	0.61	0.43	1.35	1.44	86	100	-0.13	0.02

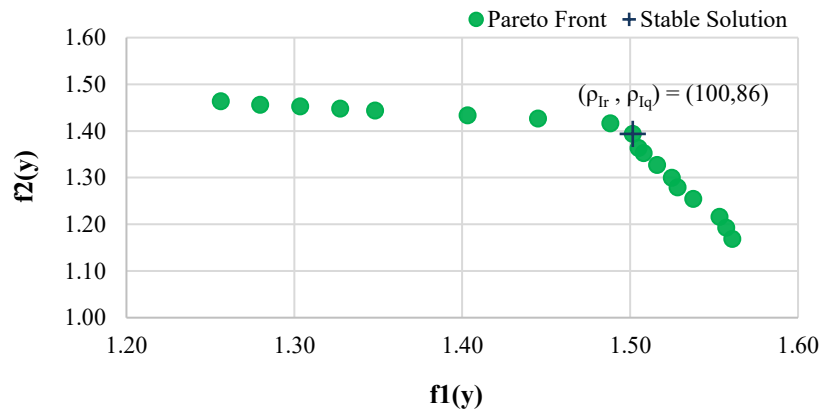


Fig. 3- Pareto front solutions of the MODSIM-NSGAI model for the “Baseline Scenario”

شکل ۳- منحنی پارتو خروجی مدل NSGAI-MODSIM در سناریوی پایه

$$f_1(y) = AgBen_{IR} + C_0 (WS_{IR} \times SEC_{IR}) + C_1 \times T\alpha_{IR} \quad (13)$$

$$f_2(y) = AgBen_{IQ} + C_0 (WS_{IQ} \times SEC_{IQ}) + C_1 \times T\alpha_{IQ} \quad (14)$$

که در آن  $T\alpha_{IR}$  اطمینان‌پذیری زمانی تأمین تقاضاهای کشاورزی در ایران،  $T\alpha_{IQ}$  اطمینان‌پذیری زمانی تأمین تقاضاهای کشاورزی در عراق،  $C_1$  ضریب تعدیل است. نتایج این سناریو در جدول ۳ و منحنی پارتو خروجی در شکل ۴ ارائه شده است.

### ۲-۳- سناریوی احتساب اطمینان‌پذیری زمانی

در توابع هدف «سناریوی پایه» (روابط (۶) و (۷))، تنها تأمین حجمی تقاضاهای کشاورزی در نظر گرفته شده است، در حالی که با توجه به متغیر بودن تقاضاهای کشاورزی در فصول مختلف و همچنین همزمانی فصول کشاورزی در دو کشور، تأمین زمانی این تقاضا نیز دارای اهمیت است. لذا در این سناریوی، توابع هدف به صورت زیر تغییر داده شده‌اند تا اثر احتساب اطمینان‌پذیری زمانی تأمین تقاضای کشاورزی در توابع هدف بر نتایج بررسی شود.

Table 3- Result of the MODSIM-NSGAI model for the “Temporal Reliability Consideration Scenario”

جدول ۳- نتایج مدل MODSIM-NSGAI برای سناریوی احتساب اطمینان‌پذیری زمانی

Solution	SEC <sub>IR</sub>	SEC <sub>IQ</sub>	f <sub>1</sub> (y) E+08	f <sub>2</sub> (y) E+08	ρ <sub>IR</sub>	ρ <sub>IQ</sub>	StI <sub>IR</sub>	StI <sub>IQ</sub>
1	0.61	0.55	2.98	2.74	80	40	-0.16	-0.20
<b>2</b>	<b>0.61</b>	<b>0.54</b>	<b>3.09</b>	<b>2.71</b>	<b>91</b>	<b>39</b>	<b>-0.06</b>	<b>-0.22</b>
3	0.61	0.54	3.00	2.73	82	40	-0.14	-0.20
4	0.61	0.54	3.02	2.73	84	40	-0.12	-0.21
5	0.60	0.55	3.11	2.71	94	38	-0.03	-0.23
6	0.61	0.54	3.03	2.72	85	40	-0.11	-0.21
7	0.61	0.54	3.04	2.72	86	38	-0.10	-0.23
8	0.59	0.55	3.15	2.71	98	38	0.00	-0.24
9	0.60	0.55	3.07	2.71	89	39	-0.07	-0.22
10	0.61	0.54	3.01	2.73	83	40	-0.13	-0.21
11	0.61	0.54	3.03	2.72	85	38	-0.11	-0.23
12	0.61	0.55	3.05	2.72	87	39	-0.09	-0.22
13	0.61	0.54	3.06	2.71	88	38	-0.08	-0.23
14	0.60	0.55	3.13	2.71	96	38	-0.02	-0.24
15	0.59	0.55	3.12	2.71	95	38	-0.02	-0.24

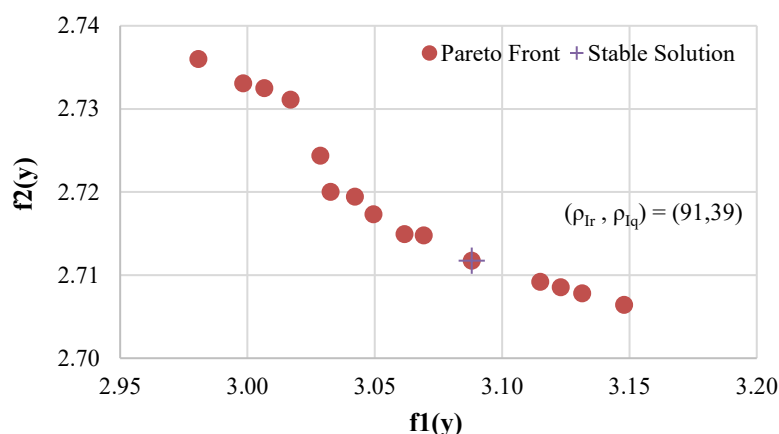


Fig. 4- Pareto front solutions of the MODSIM-NSGAI model for the "Temporal Reliability Consideration Scenario"

شکل ۴- منحنی پارتو خروجی مدل MODSIM-NSGAI در سناریوی احتساب اطمینان پذیری زمانی

بر بخش کشاورزی این کشور اثرگذار است ولیکن مقایسه تغییرات شاخص پایداری اکولوژیکی برای کشور عراق ( $SEC_{Iq}$ ) در سناریوی پایه و سناریوی احتساب اطمینان پذیری زمانی (شکل ۵) نشان می‌دهد، کاهش بالای تقاضای کشاورزی توسط این کشور در سناریوی احتساب اطمینان پذیری زمانی نه تنها منجر به پایداری زمانی تأمین تقاضاهای کشاورزی می‌شود، بلکه سبب افزایش قابل توجه شاخص پایداری اکولوژیکی می‌شود و بنابراین تأمین میزان فعلی تقاضای کشاورزی در عراق سبب عدم پایداری اکولوژیکی در این کشور می‌شود.

#### ۴- جمع بندی

یکی از مشکلات استفاده از قواعد ورشکستگی در تخصیص منابع آب حوضه‌های دچار کمبود، عدم احتساب ناهمگنی مکانی و توزیع زمانی منابع آب در مقایسه با نیازها است. در این تحقیق با استخراج قواعد ورشکستگی بهینه از طریق توسعه مدل بهینه‌سازی شبیه‌سازی چندهدفه NSGAI-MODSIM در حوضه فرامرزی سیروان-دیاله مشترک بین ایران و عراق، علاوه بر احتساب ناهمگنی زمانی و مکانی طرح‌های توسعه منابع آب در استخراج ضرایب ورشکستگی این موضوع بررسی شد که اگر کشورها بخواهند در یک بازی ورشکستگی توابع مطلوبیت خود را بیشینه کنند (که بیشتر بر واقعیت حوضه‌های مشترک بین‌المللی منطبق است)، ضرایب ورشکستگی چگونه تغییر خواهند نمود. نتایج نشان داد در این شرایط عراق باید میزان ۱۴ درصد و بیشتر از حالتی که تخصیص عادلانه و منطقی آب در سطح حوضه و پایداری کل حوضه در نظر گرفته شود، تقاضاهای کشاورزی خود را کاهش دهد.

باتوجه به جدول ۳، ملاحظه می‌شود احتساب اطمینان پذیری تأمین تقاضا کشاورزی در تابع هدف سبب شده است ضرایب ورشکستگی برای هر دو کشور ایران و عراق مقادیر کمتری باشد به گونه‌ای که ضرایب ورشکستگی ایران از ۸۰ تا ۹۸ متغیر است که به معنای نیاز به کاهش ۲ تا ۲۰ درصدی تقاضا کشاورزی ایران است. همچنین، مقادیر ضرایب ورشکستگی عراق از ۳۸ تا ۴۰ متغیر است که به معنای نیاز به کاهش ۶۰ تا ۶۲ درصدی تقاضا کشاورزی عراق است. این نشان می‌دهد هر دو کشور باید تقاضاهای خود را به میزان بیشتری کاهش دهند تا اطمینان پذیری تأمین تقاضای کشاورزی افزایش یابد. به علاوه عراق به دلیل مقادیر بالای تقاضای کشاورزی (حدود ۲/۵ برابر بیشتر از ایران) باید به میزان بیشتری این تقاضا را کاهش دهد تا تأمین زمانی آب با شکست روبرو نشود. این کاهش تقاضا در عراق می‌تواند از طریق افزایش راندمان استفاده از آب (که در حال حاضر ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود) و همچنین حذف کشت مجدد در تابستان (Avarideh et al., 2017) انجام گیرد. تحلیل پایداری جواب‌ها و انتخاب جواب با مقادیر حداقلی  $StI_{IR}$  و  $StI_{Iq}$  نیز نشان می‌دهد جواب شماره ۲ (در جدول با خط زیر نمایش داده شده است) می‌تواند یک جواب پایدار باشد. مقادیر  $p_{Ir}$  و  $p_{Iq}$  برای این جواب به ترتیب برابر ۹۱ و ۳۸ است که نشان می‌دهد ایران و عراق باید تقاضاهای کشاورزی خود را به ترتیب به میزان ۹ و ۶۲ درصد کاهش دهند.

مقایسه تغییرات شاخص پایداری اکولوژیکی ایران ( $SEC_{Ir}$ ) در سناریوی پایه و سناریوی احتساب اطمینان پذیری زمانی (شکل ۵) نشان می‌دهد این شاخص با کم شدن تقاضای کشاورزی تغییرات محسوسی نداشته و کم شدن تقاضای کشاورزی توسط ایران صرفاً

ورشکستگی تناسب بهینه از نقاط قوت این تحقیق به شمار می رود ولیکن توسعه چنین مدلی نیازمند داده‌های دقیق از طرح‌های توسعه منابع آب کشورها است که معمولا این داده‌ها توسط کشورها به اشتراک گذاشته نمی‌شود و این موضوع از جمله محدودیت‌های این تحقیق به شمار می‌رود، لذا کاربرد چارچوب مدل‌سازی این تحقیق می‌تواند برای حوضه‌های فرامرزی داخل یک کشور کارآمدی بالاتری داشته باشد. همچنین، در این تحقیق ضرایب ورشکستگی تنها برای بخش کشاورزی استخراج شده بود، لذا احتساب بخش صنعت در توابع مطلوبیت (در صورت وجود داده) و استخراج ضرایب ورشکستگی مجزا برای این بخش در هریک از کشورها می‌تواند موضوع تحقیق آتی باشد.

در این تحقیق همچنین اثر احتساب اطمینان‌پذیری زمانی تأمین تقاضاهای کشاورزی در توابع هدف، بر ضرایب ورشکستگی بهینه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد به‌منظور حداکثر نمودن اطمینان‌پذیری زمانی در تخصیص این منابع آب مشترک، لازم است هر دو کشور مقدار تقاضاهای کشاورزی خود را به میزان بیشتری (ایران ۹ درصد و عراق ۶۲ درصد) کاهش دهند. به‌علاوه نتایج این بخش از تحقیق نشان داد تأمین تقاضای بالای کشاورزی در عراق سبب عدم پایداری اکولوژیکی در این کشور می‌شود. در پایان لازم به ذکر است هرچند شبیه‌سازی طرح‌های توسعه منابع آب توسط مدل منابع مصارف MODSIM و احتساب تغییرپذیری زمانی و مکانی و اولویت پایه این طرح‌ها در استخراج ضرایب

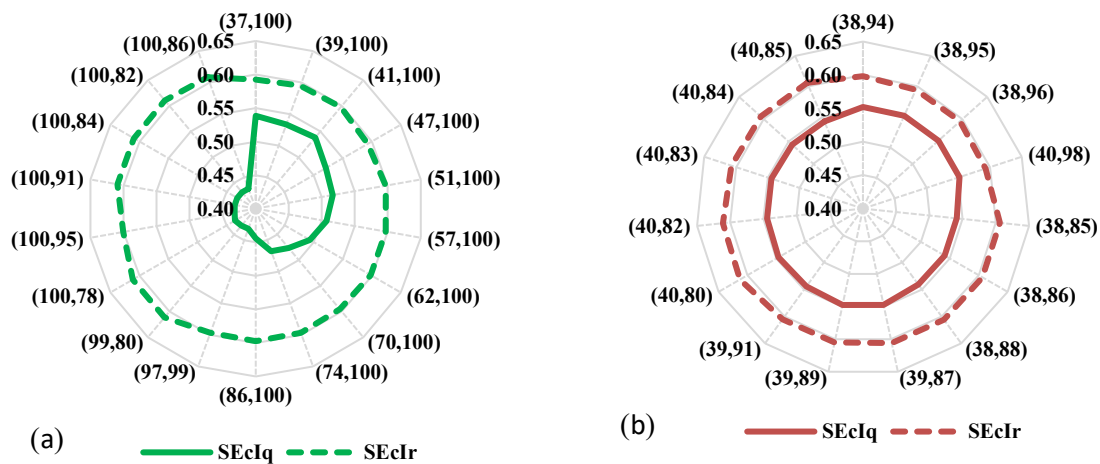


Fig. 5- Variations in the Ecological Sustainability Index in (a) the Baseline Scenario, and (b) the Temporal Reliability Consideration Scenario””

شکل ۵- تغییرات شاخص پایداری اکولوژیکی در (a) سناریوی پایه، (b) سناریوی احتساب اطمینان‌پذیری زمانی

- 17- Ezhou
- 18- General Water Allocation and Simulation Model
- 19- Agents Bankruptcy to Protect Environment
- 20- Piniles
- 21- Weighted Proportional
- 22- Weighted Constrained Equal Awards
- 23- Weighted Constrained Equal Losses
- 24- Modified Weighted Constrained Equal Losses
- 25- Reliability
- 26- Resiliency
- 27- Non-dominated Sorting
- 28- Crowding Distance
- 29- Binary Tournament
- 30- Crossover
- 31- Mutation
- 32- Front

پی‌نوشت‌ها

- 1- Riparian
- 2- Tragedy of the Commons
- 3- Cooperative Games
- 4- Bankruptcy Games
- 5- Asset
- 6- Claimants
- 7- Rule
- 8- Proportional Rule
- 9- Constrained Equal Losses
- 10- Constrained Equal Awards
- 11- Reduced Problems
- 12- Talmud
- 13- Sequential Sharing Rules
- 14- Adjusted Proportional Rule
- 15- Willingness to Pay
- 16- Adjust Minimal Overlap Rule

## ۵- مراجع

- Al-Faraj FA, Scholz M (2015) Impact of upstream anthropogenic river regulation on downstream water availability in transboundary river watersheds. *International Journal of Water Resources Development* 31(1):28-49
- Ansink E, Weikard H-P (2012) Sequential sharing rules for river sharing problems. *Social Choice and Welfare* 38:187-210
- Asl-Rousta B, Mousavi SJ (2025) Bankruptcy rules and sustainable water management: An NSGAI-MODSIM simulation multi-objective optimization framework for equitable transboundary water allocation. *Environmental and Sustainability Indicators* 26:100648
- Asl-Rousta B, Mousavi SJ, Ehtiat M (2017) Model selection techniques in SWAT-based hydrological modelling. EWRA2017-10th world congress on water resources and environment, Panta Rhei, Athens, Greece, pp. 5-9
- Avarideh F, Attari J, Moridi A (2017) Modelling equitable and reasonable water sharing in transboundary rivers: The case of Sirwan-Diyala river. *Water Resources Management* 31(4):1191-1207
- Bahrami Jovein E, Javidi Sabbaghian R, Tolouei Virani MA, Roghani B, Fereshtehpour M (2023) Development of a model for reallocation of shared aquifer resources among stakeholders based on the bankruptcy approach; Case study of Neyshabour-Sabzevar-Ataiyeh. *Iran-Water Resources Research* 19(3):39-56 (In Persian)
- De Stefano L, Duncan J, Dinar S, Stahl K, Strzepek KM, Wolf AT (2012) Climate change and the institutional resilience of international river basins. *Journal of Peace Research* 49(1):193-209
- Degefu DM, He W (2016) Allocating water under bankruptcy scenario. *Water Resources Management* 30(11):3949-3964
- Degefu DM, He W, Yuan L, Min A, Zhang Q (2018) Bankruptcy to surplus: Sharing transboundary river basin's water under scarcity. *Water Resources Management* 32:2735-2751
- Dinar A, Dinar S, Mckinney DC, Mccaffrey SC (2013) *Bridges over water: Understanding transboundary water conflict, negotiation and cooperation*. World Scientific Publishing Company
- Hussein HA (2010) Dependable discharges of the upper and middle diyala basins. *Journal of Engineering* 16(2):4960-4969
- Jamalomidi M, and Moridi A (2021) Bankruptcy method in reduction of groundwater resources conflicts and aquifer balancing (Case study: Haji Abad Aquifer). *Iran-Water Resources Research* 16(4):1-14 (In Persian)
- Kucukmehmetoglu M (2009) A game theoretic approach to assess the impacts of major investments on transboundary water resources: the case of the Euphrates and Tigris. *Water resources management* 23(15):3069-3099
- Labadie J W (2006) MODSIM: Decision support system for integrated river basin management. *International Congress on environmental Modeling and Software Society, Burlington, VT USA*
- Loucks DP (1997) Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal* 42(4):513-530
- Lucani P, Saade M (2012) *Iraq: Agriculture sector note*. Food and Agriculture Organisation of the United Nations and the World Bank
- Madani K (2010) Game theory and water resources. *Journal of Hydrology* 381(3-4):225-238
- Madani K, Zarezadeh M, Morid S (2014) A new framework for resolving conflicts over transboundary rivers using bankruptcy methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(8):3055-3068
- Mekonnen M M, Hoekstra A Y (2010) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Value of Water Research Report Series No. 47*. UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands
- Mekonnen M M, Hoekstra A Y (2016) Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* 2(2):e1500323
- Mianabadi H, Mostert E, Pande S, van de Giesen N (2015) Weighted bankruptcy rules and transboundary water resources allocation. *Water Resources Management* 29:2303-2321
- Mianabadi H, Mostert E, Zarghami M, van de Giesen N (2014) A new bankruptcy method for conflict resolution in water resources allocation. *Journal of Environmental Management* 144:152-159
- Mousavi SJ, Shourian M (2010) Adaptive sequentially space-filling metamodeling applied in optimal water quantity allocation at basin scale. *Water Resources Research* 46(3)

- Oftadeh E, Shourian M, and Saghafian B (2016) Evaluation of the bankruptcy approach for water resources allocation conflict resolution at basin scale, Iran's Lake Urmia experience. *Water Resources Management* 30:3519-3533
- Rightnar J, Dinar A (2020) The welfare implications of bankruptcy allocation of the Colorado River water: The case of the Salton Sea Region. *Water Resources Management* 34:2353-2370
- Sabri S, Zarghami M (2023) Developing uncertain bankruptcy models for fair extraction of underground water in Damghan Plain Iran. *Iran-Water Resources Research* 19(3):104-117 (In Persian)
- Sandoval-Solis S, McKinney D, Loucks DP (2011) Sustainability index for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(5):381-390
- Sechi GM, Zucca R (2015) Water resource allocation in critical scarcity conditions: A bankruptcy game approach. *Water Resources Management* 29(2):541-555
- Shourian M, Mousavi S, Tahershamsi A (2008) Basin-wide water resources planning by integrating PSO algorithm and MODSIM. *Water Resources Management* 22:1347-1366
- Teasley RL, McKinney DC (2011) Calculating the benefits of transboundary river basin cooperation: Syr Darya Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management* 137(6):481-490
- Tridge – Market Intelligence (2019) Overview of Wheat Market in Iran.
- UN-ESCWA (United Nations Economic and Social Commission for Western Asia), BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe) (2013) Inventory of shared water resources in Western Asia. UN, Beirut.
- USDA (The United States Department of Agriculture) (2019) Iraq, Grain and Feed Annual. USDA
- Von Neumann J, Morgenstern O (1944) Theory of games and economic behavior. Princeton Univ. Press, Princeton
- Yuan L, Wu X, He W, Degefu DM, Kong Y, Yang Y, et al. (2023) Utilizing the strategic concession behavior in a bargaining game for optimal allocation of water in a transboundary river basin during water bankruptcy. *Environmental Impact Assessment Review* 102:107162
- Zheng Y, Sang X, Liu Z, Zhang S, Liu P (2022) Water allocation management under scarcity: A bankruptcy approach. *Water Resources Management* 36:2891-2912