

# Leader-Follower and Nash Bargaining Game Theory Models for Optimum Waste Load Allocation, Gheslagh River as Case Study

*M. Saadatpour<sup>1</sup>, H. Khoshkam<sup>2</sup>*

1. Assist. Prof., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (Corresponding Author) msaadatpour@iust.ac.ir
2. MSc Graduated Student of Civil and Environmental Engineering, College of Environment, Karaj, Alborz, Iran

*(Received July 31, 2016 Accepted Jan. 1, 2017)*

#### To cite this article :

Saadatpour, M., Khoshkam, H., 2018, "Leader-follower and nash bargaining game theory models for optimum waste load allocation, gheslagh river as case study." *Journal of Water and Wastewater*, 29 (4), 118-131.  
Doi: 10.22093/wwj.2017.58676.2231 (In Persian)

#### Abstract

Waste load allocation (WLA) is one of the most important elements when evaluating in water quality management problems. Due to multiple and sometimes conflict objectives in WLA problems, a set of Pareto optimal solutions is derived with evolutionary algorithms in which one of these Pareto fronts could be influenced by conflicts. In this research study, simulation-optimization approach was applied by QUAL2Kw simulation model and particle swarm optimization (PSO) as optimization algorithm to assign cBOD point source pollutions for specific location along Gheslagh River. To reduce the conflicts between beneficiaries for the optimum operation of water resources in river, the level leader-follower and the Nash bargaining game theory models were applied. The results showed that the construction, maintenance and operation costs of the treatment plants for leader-follower and Nash bargaining game theories were about 192 and 293 billion Rial, respectively. The penalties for violating the environmental regulations set by the Iranian environmental protection agency (EPA) for the above theory models were found to be about 32 and 3.9 billion Rial, respectively. Furthermore, the estimated penalty tariff for each overdischarge of allowed cBOD under Stackelberg and Nash bargaining game theories were about 10.8 and 3 Rial, per environmental violation, respectively. The estimated penalty tariff in Stackelberg game is extremely close to current Iran's EPA penalty tariff.

**Keywords:** Particle Swarm Optimization Algorithm, Leader-Follower Game, Nash Bargaining Game, Optimum Waste Load Allocation, QUAL2Kw Model.



# رویکرد تئوری بازی‌های رهبر-پیرو و چانه‌زنی نش در تخصیص بهینه بار آلاینده رودخانه، مطالعه موردی رودخانه قشلاق

مطهره سعادت پور<sup>۱</sup>، هلاله خوشکام<sup>۲</sup>

۱- استادیار، عضو هیات علمی گروه آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده مسئول) [msaadatpour@iust.ac.ir](mailto:msaadatpour@iust.ac.ir)  
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، کرج، البرز، ایران

(دریافت ۹۵/۵/۱۰ پذیرش ۹۵/۱۰/۱۲)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

سعادت پور، م، خوشکام، ه، ۱۳۹۷، "رویکرد تئوری بازی‌های رهبر-پیرو و چانه‌زنی نش در تخصیص بهینه بار آلاینده رودخانه، مطالعه موردی رودخانه قشلاق" مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۴)، ۱۳۱-۱۱۸. Doi: 10.22093/wwj.2017.58676.2231

## چکیده

تخصیص بهینه بار آلودگی یکی از مهم‌ترین مسائل در حوزه مدیریت کیفی منابع آب است. در این مسئله ذی‌نفعان متعددی با اهداف ارتقای شرایط کیفیت آب و پرداخت هزینه‌های کمتر بابت تصفیه واحدهای آلاینده 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 توصیه می‌شود. در این پژوهش از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw و الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات به‌منظور تخصیص بهینه بار آلودگی‌های cBOD (اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی کربنه) امتداد رودخانه قشلاق استفاده شد. به‌منظور مواجهه با تعارضات اهداف ذینفعان حاضر در بهره‌برداری از منابع آب این رودخانه از رویکرد تئوری بازی‌ها و تکنیک‌های رهبر-پیرو و تئوری چانه‌زنی نش استفاده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل در مسئله این پژوهش، هزینه‌های احداث، نگهداری و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها در بازی استاکلبرگ و تئوری چانه‌زنی نش به ترتیب ۱۹۱/۵۷ و ۲۹۳/۳۹ میلیارد ریال و جریمه‌های تخطی از استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست در این دو بازی به ترتیب ۳۱/۸۶ و ۳/۸۹ میلیارد ریال برآورد شد. همچنین تعرفه جریمه در بازی استاکلبرگ و تئوری چانه‌زنی نش به ترتیب ۱۰/۷۵ و ۳ ریال به ازای هر واحد تخطی از استاندارد مجاز تخلیه cBOD برآورد شد. مقدار تعرفه جریمه برآورد شده در بازی استاکلبرگ به‌مقدار تعرفه کنونی سازمان حفاظت محیط زیست بسیار نزدیک است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم هوش جمعی ذرات، بازی رهبر-پیرو، بازی چانه‌زنی نش، تخصیص بهینه بار آلودگی، مدل QUAL2kw

## ۱- مقدمه

تصمیم‌سایر ذینفعان وابسته است و هیچ تصمیم‌گیرنده‌ای احاطه کامل بر تصمیم‌گیری همگان نخواهد داشت. در این راستا، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به تنهایی قادر نخواهد بود مسائل چندهدفه مباحث مدیریت کیفیت منابع آبی را لحاظ نماید؛ زیرا در مواردی ممکن است از استراتژی‌ها و رفتارهای هر یک از ذینفعان چشم‌پوشی شود (Madani, 2010). از این رو، استفاده از تئوری

یکی از جنبه‌های مهم مدیریت کیفی منابع آب، تخصیص بهینه بار آلاینده‌ها در سیستم رودخانه‌ها است. در مسئله تخصیص بهینه بار آلودگی که در آن اهداف تأمین کیفیت مناسب منابع آبی با لحاظ نمودن اهداف اقتصادی دنبال می‌شود، نهادهای قانون‌گذار و ذینفعان متعددی حضور دارند که گاهی اهداف متضادی را دنبال می‌نمایند. نتایج تصمیم‌گیری برخی از این ذینفعان در مواردی به



نیست، می‌تواند کارایی مناسبی داشته باشد. (Madani et al., 2014)

نیکو و همکاران در سال ۲۰۱۶، به منظور تخصیص بهینه بار چند آلودگی در رودخانه زرجوب گیلان از رویکردهای همکارانه و غیرهمکارانه تئوری بازی‌ها استفاده نمودند. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه توسط مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw انجام شد و سناریوهای ممکن تخصیص بار آلودگی توسط این مدل مورد ارزیابی قرار گرفت و هزینه‌های تصفیه آلودگی متناسب با هر سناریو در رویکرد بهینه‌سازی در نظر گرفته شد. (Nikoo et al., 2016)

در این میان، بازی‌های رهبر-پیرو<sup>۲</sup> نیز توجهاتی را در این حوزه به خود اختصاص داده است. مسئله اختلاف آب میان هند و بنگلادش با فرض وجود یک داور تحت عنوان رهبر (تحت داوری سازمان ملل) در بازی استاکلبرگ<sup>۳</sup> بررسی شد (Anandalingam and Apprey, 1991).

در سال ۲۰۰۱، بازی میان دو بازیگر در حالی که یکی از آنها امتیاز اولین حرکت کننده را دارا باشد، در نظر گرفته شد و استراتژی تعادلی حاصل از این مدل با مدل متقارن معمولی مقایسه شد و نشان داده شد که در مدل اولین حرکت کننده (رهبر)، بهره‌برداری محافظه کارانه تری از محیط زیست نتیجه می‌دهد (Benchekroun and Long, 2001). مدل انتقال مالیات (MTT<sup>۴</sup>) بر اساس بازی استاکلبرگ و در قالب یک بهینه‌سازی دو مرحله‌ای، میان مدیر و هر ناحیه از حوضه آبریز ارائه شد. در مدیریت حوضه آبریز ابتدا نرخ انتقال مالیات بر آلودگی انتخاب می‌شود و این انتخاب منجر به ارائه واکنش از سوی هر ناحیه می‌شود (Zhao et al., 2012). به منظور تقسیم آب زیرزمینی میان بخش اجتماعی معرفی شده توسط قدرت محلی و بخش تولید (کشاورزی)، یک بازی قطعی تسلسل استراتژی دو بازیگر با گسستگی زمانی دینامیک استاکلبرگ با مدت زمان محدود ثابت و ساختار اطلاعات حلقه بسته به کار برده شد. قدرت مرکزی در مسئله مورد بررسی رهبر و بخش تولید، پیروی کننده است. راه حل نهایی براساس فرایند چانه‌زنی حاصل می‌شود، به نحوی که در هر گام ابتدا قدرت مرکزی طرح پیشنهادی خود را ارائه می‌دهد و پاسخ توافق

بازی‌ها به منظور مواجهه با تضادهای تصمیم‌گیری و نیز مشارکت ذینفعان متعدد در مسئله تخصیص بهینه بار آلودگی، بسیار کارا خواهد بود.

امروزه تئوری بازی‌ها دارای کاربرد گسترده‌ای در تمام زمینه‌ها به ویژه مدیریت منابع آب است. لی در سال ۲۰۱۲ به منظور ایجاد تعادل در توسعه اقتصادی (کاربری اراضی و توسعه) و آثار محیط زیستی (حفاظت از کیفیت آب و کنترل تغذیه‌گرایی) در مدیریت حوضه آبریز، از تئوری بازی چانه‌زنی نش<sup>۱</sup>، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده نمود؛ که در آن در نخستین دور از چانه‌زنی نش، هر کدام از بازیگران مقدار هدف خود را مشخص می‌سازند و سپس مقدار تابع هدف هر بازیگر به عنوان قیدی برای گروه مقابل لحاظ می‌شود. مدل بهینه‌سازی حل می‌شود و سپس در صورت رضایت‌بخش بودن نتایج برای تمام بازیگران، تعادل نش حاصل می‌شود و بازی به پایان می‌رسد. در غیر این صورت هدف هر بازیگر به طور مستقل مجدداً تنظیم می‌شود و مسئله بهینه‌سازی دوباره حل می‌شود (Lee, 2012). تئوری بازی‌های فازی همکارانه، تابع هستک و تابع تبدیل فازی به منظور حل تعارضات و عدم قطعیت‌های مسئله تخصیص همزمان منابع آبی و بار آلودگی در حوضه آبریز رودخانه دز واقع در جنوب غربی ایران مورد استفاده قرار گرفته است (Nikoo et al., 2012). مدنی و همکاران در سال ۲۰۱۴ روش جدیدی بر پایه ورشکستگی برای رفع اختلاف تخصیص آب فرامرزی در مواردی که میزان نیاز آبی یا ادعای ذینفعان حوضه بیش از آب در دسترس است، به کار بردند. یافته‌های آنان، پیشنهادهایی به کارگیری سیاست‌های مهمی را ارائه نمود، به این معنی که قوانین تخصیص ثابت برای حفاظت از همکاری در تخصیص آب فرامرزی، قابل اعتماد نیست و ممکن است در اثر تغییرات اقتصادی-اجتماعی و شرایط آب و هوایی مانند ناپایداری هیدرولوژیکی آسیب پذیر باشد.

روش پیشنهادی آنها اگرچه، لزوماً رفاه کلی را در حوضه رودخانه بیشینه نمی‌کند و یا ممکن است منجر به تخصیص بهینه نسبی از نگاه اقتصادی شود اما در مواردی که پرداخت جانبی امکان پذیر نیست و ذینفعان تمایل زیادی به همکاری ندارند یا اطلاعات عایدات هر یک از ذینفعان در دسترس یا اعتمادپذیر

<sup>2</sup> Leader-Follower

<sup>3</sup> Stackelberg

<sup>4</sup> Model of Transfer Tax

<sup>1</sup> Nash Bargaining Theory



تخصیص بهینه بار آلودگی این پژوهش، ندرتاً در مطالعات پیشین برای یک رودخانه واقعی مشاهده شده است.

## ۲- روش پژوهش

### ۲-۱- مدل بازی استاکلبرگ پویا (رهبر - پیرو)

در بازی رهبر - پیرو تقدم حرکت با رهبر است و پس از آن پیروان بازی، به حرکت می‌پردازند. هر رهبری می‌تواند اطلاعات کامل در مورد سیستم داشته باشد و لیکن آگاهی نسبت به دیگر رهبران (در صورت وجود) ممکن نیست. هر پیرو نیز پیش از اقدام، نسبت به تصمیم رهبر / رهبران آگاه است، وی تنها اطلاعات مربوط به خود را می‌داند و از تصمیمات دیگر پیروان آگاهی ندارد. متداول‌ترین بازی رهبر - پیرو که در این پژوهش نیز مطرح شده است، براساس یک رهبر و چندین پیرو است. پس از حرکت رهبر، پیروی کنندگان پیش از اقدام به هر عملی از حرکت رهبر آگاه می‌شوند. عمل پیروی کنندگان به اقدام رهبر وابسته است و رهبر این موضوع را می‌داند و واکنش پیروان را به‌عنوان داده در نظر می‌گیرد (Safari et al., 2014, Szidarovszky, 2008).

پس از آنکه رهبر حرکت خود را انجام می‌دهد، پیروان به‌عنوان بهترین پاسخ به انتخاب استراتژی‌هایی که بازده آنها را حداکثر می‌نماید، می‌پردازند. بهترین پاسخ براساس تصمیمات شناخته شده از رهبر و مفهوم راه حل‌های گزینش شده توسط پیروان است. از آنجایی که پیروی کنندگان به‌طور همزمان و بدون آگاهی از انتخاب دیگر پیروان، تصمیم‌گیری می‌نمایند و بر سر منابع محدود، به رقابت می‌پردازند، یک فرض منطقی این است که پیروی کنندگان، راه حل چانه‌زنی مانند راه حل نش را پیش گیرند، که به‌طور واضحی وابسته به تصمیم اتخاذ شده توسط رهبر است. بنابراین پاسخ‌های پیروی کنندگان به‌عنوان توابعی از اقدام رهبر شناخته می‌شوند. به همین طریق رهبر می‌تواند به ارزیابی اقدامات پیروی کنندگان پیش از انتخاب هر عملی بپردازد و بازده هر عمل خود را تخمین نماید. مقادیر بازده و بهره سپس مقایسه می‌شوند و عملی که بالاترین بازدهی را دارد توسط رهبر اتخاذ می‌شود. درآمد کاملاً وابسته به روش تعامل پیروی کنندگان با یکدیگر است. یک راه حل جایگزین این‌گونه فرض می‌شود که پس از هر اقدام رهبر، پیروی کنندگان تعادل چانه زنی نش را برمی‌گزینند. همچنین آنها ممکن است راه

یا عدم توافق را دریافت می‌نماید و سپس نوبت طرح پیشنهادی بخش تولید می‌شود. تابع درآمد در مسئله مورد بررسی توسط آنان، برای کشاورزان سود حاصل از فروش محصولات منهای هزینه‌های پرداختی برای مالیات و خرید آب بوده است. همچنین برای مدیریت مرکزی در منطقه، درآمد حاصل از دریافت مالیات از کشاورزان و نیز فروش آب بوده است (Kicsiny et al., 2014). در مطالعه حوضه آبریز زرینه رود مدل رهبر - پیرو در دو سطح، جهت پیشینه کردن سود خالص در شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌عنوان رهبر و مصارف کشاورزی، شهری و صنعتی به‌عنوان پیروان با در نظر گرفتن قیده‌های سیستم به‌کار گرفته شد.

نتایج حاصل از روش بازی استاکلبرگ با بازی همکارانه و راه حل چانه زنی نش در صورت حرکت همزمان بازیگران مورد مقایسه قرار گرفت (Safari et al., 2014). از مدل بهینه‌سازی دو مرحله‌ای و بر اساس استراتژی تعادل استاکلبرگ - نش با ضرایب فازی برای رویارویی با مسائل محیط زیستی در کمیت و کیفیت آب زیرزمینی در بهره‌برداری از معادن بزرگ مقیاس زغال سنگ، استفاده شد. پس از اعمال مدل بر روی معدن زغال سنگ لوآن<sup>۱</sup> در چین، نتایج حاصله اثربخشی کاهش تعارض را حاصل نمود و معدن‌کاران را به سمت بهره‌برداری با رویکرد دوستدارانه‌تری از محیط زیست سوق داد (Xu et al., 2015).

در این پژوهش، دو رویکرد تئوری بازی‌های رهبر - پیرو و تئوری چانه‌زنی نش استفاده شد تا تعارضات میان گروه‌های ذینفع تا حد امکان کاهش یابد و نتایج این دو رویکرد مورد مقایسه قرار گرفت. در رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی پیشنهادی در این پژوهش، مدل شبیه‌سازی عددی و هیدرودینامیک یک بعدی دائمی QUAL2Kw به‌منظور تعیین پاسخ‌های کیفی رودخانه در برابر سناریوهای مختلف کنترل بار آلودگی واحدهای آلاینده در ارتباط با الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات در حل مسئله، مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه ابزارها و رویکردهای مورد استفاده در این پژوهش به تنهایی ابزارها و رویکردهای جدیدی محسوب نمی‌شوند اما چگونگی ترکیب آنها در مسئله مورد بررسی قطعاً نوآوری در سطح مسائل تخصیص بهینه بار آلودگی خواهد بود. همچنین استفاده از تئوری بازی استاکلبرگ (رهبر - پیرو) در مسئله

<sup>۱</sup> Lu'an



مانند تمام الگوریتم‌های تکاملی، برای ذرات در شروع الگوریتم، موقعیت و سرعت تصادفی لحاظ می‌شود. تناسب هر ذره در مقایسه با تابع هدف ارزیابی می‌شود. در تکرار بعدی (تجمع بعدی)، متناسب بودن ذرات در تابع هدف برای تعریف بهترین موقعیت هر ذره در مقایسه با همان ذره در ازدحام قبلی  $P_{best}$  و بهترین موقعیت بین همه ذرات در میان تمام ازدحام‌ها  $g_{best}$  به کار می‌رود (Afshar et al., 2011). به عبارتی دیگر PSO یک تکنیک حافظه محور است. با افزایش تکرار، دسته ذرات به سمت بهترین موقعیت کلی ( $g_{best}$ ) با ردیابی بهترین موقعیت فردی خود ( $P_{best}$ ) حرکت خواهند کرد. در الگوریتم PSO سرعت و موقعیت هر ذره بروزرسانی می‌شود و حرکت ذرات به سمت نقطه بهینه توسط معادلاتی صورت می‌پذیرد (Al-Ani, 2012, Damghani et al., 2013)

#### ۲-۴- مدل شبیه‌سازی

QUAL2Kw (Q2K) مدل کیفیت آب رودخانه و جریان آب است که نسخه به‌روز شده مدل QUAL2E است. QUAL2Kw مدل شبیه‌سازی یک بعدی و هیدرولیک در حالت پایا (دائمی) است که به شبیه‌سازی درجه حرارت روزانه، سینتیک آب - کیفیت روزانه، بارهای آلودگی، حرارتی و خروجی‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آلاینده و حرارت می‌پردازد و قابلیت تقسیم‌بندی سیستم به بازه‌های با فضای نابرابر را داراست. به علاوه، چندین بارگذاری و خروجی می‌تواند در هر بازه لحاظ شود. در این مدل، به‌منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای نرخ واکنش، ته‌نشینی و برای بیشینه کردن تناسب نتایج شبیه‌سازی مدل در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی، کالیبراسیون اتوماتیک صورت می‌پذیرد (Pelletier and Chapra, 2008)

#### ۲-۵- مورد مطالعاتی

رودخانه قشلاق در استان کردستان یکی از رودخانه‌های مهم مرزی غرب کشور است که در تأمین نیاز آبی منطقه و استان، نقش ویژه‌ای ایفا می‌نماید. به دلیل عبور این رودخانه از مجاورت شهر سنندج، در طول مسیر بعد از سد قشلاق (وحدت) تا تلاقی با رودخانه گاوهرود، در معرض ورود آلوده‌کننده‌های مختلف قرار دارد و کیفیت آب رودخانه در معرض کاهش جدی است و در نتیجه

حل همکارانه مانند مقدار شیلی را انتخاب نمایند یا اینکه سلسله مراتبی را به این روش ایجاد کنند (Szidarovszky, 2008). در این پژوهش رویکرد یک رهبر که سازمان حفاظت محیط زیست ایران و چند پیرو که منابع آلاینده نقطه‌ای در امتداد رودخانه قشلاق می‌باشند، در نظر گرفته شده است و پیروی کنندگان راه حل چانه‌زنی نش را بر می‌گزینند.

#### ۲-۲- بازی چانه‌زنی نش

در تئوری چانه‌زنی نش تعداد  $n$  تصمیم‌گیرنده در نظر گرفته می‌شود، که با فرض  $X$  به عنوان فضای تصمیم و  $f_i : X \rightarrow R$  به عنوان تابع هدف تصمیم‌گیرنده  $i$ ، فضای ضابطه به روش زیر تعریف می‌شود

(۱)

$$H = \{u \mid u \in R^n, \underline{u} = (u_i), \quad u_i = f_i(x) \text{ with } \text{some } x \in X\}$$

هنگامی که تصمیم‌گیرندگان قادر به دستیابی به یک توافق نیستند، به مقادیر تابع هدف کمتری دست می‌یابند. اگر  $d_i$  این مقدار برای تصمیم‌گیرنده  $i$  و  $\underline{d} = (d_1, d_2, \dots, d_n)$  در نظر گرفته شود، تعارض توسط جفت  $(H, \underline{d})$  تعریف می‌شود. اگر  $H$  محدب، بسته و محدود باشد و حداقل یک  $f \in H$  وجود داشته باشد به طوری که  $f \geq \underline{d}$ ، راه حل چانه‌زنی نش  $f^* = \varphi(H, \underline{d})$  به عنوان راه حل بهینه تک مسئله می‌تواند حاصل شود (Safari et al. 2014).

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } (f_1 - d_1), (f_2 - d_2), \dots, (f_n - d_n), \\ & \text{subject to} \\ & f_i \geq d_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ & (f_1, f_2, \dots, f_n) \in H. \end{aligned} \quad (2)$$

این راه حل، تمام اصول نش را برآورده می‌سازد (Safari et al. 2014). باید توجه شود که در این مورد، پیروان در مسئله به‌طور همزمان به تصمیم‌گیری می‌پردازند.

#### ۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی

روش هوش جمعی ذرات<sup>۱</sup>، الگوریتم جستجو بر مبنای یک جمعیت است که شبیه‌سازی آن بر اساس رفتار اجتماعی دسته پرندگان صورت می‌گیرد (Al-Ani, 2012, Damghani et al., 2013).

<sup>1</sup> Particle Swarm Optimization (PSO)



حاشیه رودخانه و پساب خروجی از شبکه فاضلاب شهرک‌های صنعتی هستند. همچنین فاضلاب ناشی از کارگاه‌ها و صنایع داخل شهرها و مناطق مسکونی را نیز می‌توان به این بخش افزود. در حد فاصل سد قشلاق تا انتهای رودخانه، ۸ منبع آلاینده نقطه‌ای که داده‌های مکانی و کیفی آنها (بار cBOD) در دسترس بود (جدول ۱)، شناسایی و در مدل‌سازی اعمال شدند. همچنین خصوصیات هندسی و هیدرولیکی بازه‌های تعریف شده از رودخانه قشلاق در مدل QUAL2Kw در جدول ۲ آورده شده است. تابع هدف و قیدهای سازمان حفاظت محیط زیست و واحدهای آلاینده در بازی استاکلبرگ سازمان حفاظت محیط زیست افزایش درآمد حاصل از تعرفه تخطی دریافتی از منابع آلاینده با قید حفظ غلظت اکسیژن محلول در محدوده بزرگ‌تر یا مساوی ۵ میلی‌گرم در لیتر را دنبال

دبی آب طی فصل‌های مختلف سال دارای نوسان است. (Asheghmoala et al., 2014, Jafari Salim, 2009). کاهش شدید آب در ماه‌های تابستانی چه به دلیل کمبود بارش و تمام شدن ذخیره برف و چه به دلیل برداشت زیاد آب در مسیر حوضه آبریز، موجب می‌شود که آلودگی رودخانه افزایش یافته و با جریان کند آب نیز، قدرت خودپالایی رودخانه به شدت کاهش یابد.

منابع آلاینده شهری، صنعتی و کشاورزی از طریق تخلیه مستقیم فاضلاب، پساب، مواد زائد جامد، شیرابه و زه آب منابع آب را آلوده می‌نمایند. در رودخانه قشلاق آلودگی شهری شامل فاضلاب شهری سنج و همچنین فاضلاب روستاها و شهرک‌هایی که در مسیر قشلاق و یا سرشاخه‌های آن قرار دارند موجب آلودگی آن می‌شوند. آلودگی‌های صنعتی شامل پساب صنایع مستقر در

جدول ۱- منابع آلاینده نقطه‌ای موجود در طول رودخانه قشلاق (Asheghmoala et al., 2014)

Table 1. Point source pollution across the Gheslugh River (Asheghmoala et al., 2014)

Name of Discharger Unit	Reach Number	Distance from Downstream (km)	cBOD (mg/L)	Flow Rate (m <sup>3</sup> /s)	Discharge Loading rate (g/s)
Nanleh Sewage	1	41	200	0.1	20.8
Industrial Park	3	33	800	0.01	9.13
Sanandaj Livestock Slaughter	3	28	900	0.003	2.57
Fajr Concrete Foundation	4	25	50	0.004	0.2
Effluent of Wastewater Treatment Plant	4	23	97.94	1.4	136.63
Asphalt Production and Recycle	5	21	40	0.003	0.14
Landfill Leachate	5	19	2054.79	0.03	61.64
Par Chicken Slaughter	6	14	698.63	0.002	1.66

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی بازه‌های رودخانه قشلاق (Asheghmoala et al., 2014)

Table 2. Hydraulic features of reaches in Gheslugh River (Asheghmoala et al., 2014)

Reach Number	Reach Name	Length (Km)	Distance from Downstream (Km)	Elevation Above Sea Level (m)	Manning Roughness Coefficient	River's bed Width (m)	Bed Slope	Side Slope
0	Headwater		49.45	1479	0.09	4	0.003	0.03
1	Gheslugh Dam	10.45	39	1447	0.09	5.5	0.003	0.02
2	Salavat-Abad	4	35	1419	0.08	7.5	0.007	0.025
3	Baharan	6.35	28.56	1390	0.06	10	0.005	0.02
4	Sanandaj Sewage	5.7	22.95	1362	0.055	10	0.005	0.015
5	Landfill Leachate	5.4	17.55	1357	0.055	12.5	0.001	0.01
6	Par Chicken Slaughter	5.5	12.05	1332	0.05	12.5	0.005	0.01
7	Sou Junction	3.4	8.65	1311	0.05	10	0.006	0.005
8	Darvishan Junction	5.4	3.25	1293	0.045	10	0.003	0.005
9	Gavroud Junction	3.25	0	1226	0.05	10	0.021	0.01



$C_i$  هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری فاضلاب شهری و صنعتی به ترتیب طبق معادله ۷ و معادله ۸ و  $D_i$  نیز تابع جریمه طبق معادله ۵ برای واحد آلاینده آم، می‌باشند.

(۷)

$$\text{Min Cost} = \sum_{i=1}^8 C_i = \sum_{i=1,5} (P_i + 0.02A_i) + \sum_{j=2}^4 (P_j + 0.03A_j) + \sum_{j=6}^8 (P_j + 0.03A_j)$$

$$P_i = R \times \text{BOD}(i) \times Q(i) \times X(i) \quad (A)$$

که در این معادله

$R$  بیانگر هزینه احداث تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و صنعتی به ازای هر یک کیلوگرم بار آلودگی در روز به مبلغ به ترتیب ۲۳ و ۳۰ میلیون ریال (با عمر مفید ۲۵ سال) برای فاضلاب شهری و صنعتی می‌باشند.  $x(i)$ ،  $Q(i)$  و  $\text{BOD}(i)$  به ترتیب درصد حذف آلاینده، دبی واحد آلاینده ( $m^3/d$ ) و غلظت  $\text{cBOD}$  واحد آلاینده آم می‌باشند. واحدهای آلاینده ۱ و ۵ در امتداد رودخانه قشلاق، واحدهای آلاینده شهری و بقیه واحدهای آلاینده نیز صنعتی هستند.

$$A_i = P_i \times \left[ \frac{ii \times (1 + ii)^n}{(1 + ii)^n - 1} \right] \quad (9)$$

که در این معادله

$A_i$  بیانگر ارزش معادل سالانه،  $ii$  نرخ بهره (که در اینجا ۱۵ درصد فرض شده است)،  $n$  تعداد سال‌های بهره‌برداری،  $P_i$  هزینه سرمایه‌گذاری فعلی برای تصفیه‌خانه آم می‌باشند. در این پژوهش هزینه بهره‌برداری معادل ۳ درصد هزینه سالانه برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب صنعتی و ۲ درصد برای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری در نظر گرفته شده است (Asheghmoala, 2014).

در مسائل حل شده در این پژوهش، درصد‌های تصفیه فاضلاب منابع آلاینده نقطه‌ای ( $x(i)$ ) و مبلغ جریمه ( $fine$ ) به‌عنوان متغیر تصمیم انتخاب شدند. برای حل مسئله بهینه‌سازی مطرح شده با ساختار ترکیبی معادلات ۳، ۶ و ۴، شکل تک هدفه مسئله فوق ایجاد می‌شود. در این ساختار، معادله ۴ و معادله ۶ به‌عنوان قیدهای مسئله بهینه‌سازی با تابع هدف با معادله ۳ تعریف می‌شوند.

می‌نماید. تابع درآمد ناشی از دریافت جراثم محیط‌زیستی بر اساس مفاهیم این مبحث و نیز قوانین ارائه شده به استناد بند (ج) ماده (۱۰۴) و ماده (۱۳۴) قانون برنامه سوم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران با اصلاحاتی صورت پذیرفته است (DoE 2016). بر این اساس تابع هدف سازمان حفاظت محیط زیست به شرح زیر تعریف شده است

$$\text{Max} \sum_{i=1}^8 \text{EnvBenefit}_i \quad (3)$$

$$\text{st.} \quad \text{DO Concentration}_j \geq 5 \quad \forall j = 1, 2, \dots, 10 \quad (4)$$

$$\text{EnvBenefit}_i = \begin{cases} \left( 1.6 \times 1.5 \times (1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) \times Q'(i) \right) \times n \times \frac{((1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) - 50)}{50} \times \text{fine} & (1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) > 50 \\ 0 & \text{Else} \end{cases} \quad (5)$$

$\forall i = 1, 2, \dots, 8$

در معادله ۳ و ۴ به ترتیب  $\text{EnvBenefit}_i$  بیانگر جریمه دریافتی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست از واحد آلاینده آم در صورت تخلیه  $\text{cBOD}$  بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر و  $\text{DO Concentration}_j$  غلظت اکسیژن محلول در نقطه کنترل زام است. در معادله ۵ ضرایب  $1/6$  و  $1/5$  به ترتیب بیانگر حساسیت محیطی و منطقه‌ای رودخانه قشلاق (DoE 2016)،  $x(i)$  درصد حذف،  $\text{BOD}(i)$  غلظت آلودگی  $\text{cBOD}$  ( $mg/L$ )،  $Q'(i)$  دبی ( $m^3/y$ ) از منبع آلاینده آم،  $n$  تعداد سال‌های بهره‌برداری (که در این مسئله، ۲۵ سال است) و  $fine$  مبلغ ریالی جریمه است. منابع آلاینده نقطه‌ای که شامل فاضلاب‌های شهری و صنعتی می‌باشند، به دنبال مینیمم نمودن هزینه‌های تصفیه آلودگی  $\text{cBOD}$  و جریمه ناشی از تخطی از استاندارد (مقدار  $50 mg/L$ ) در استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست (معادله ۶) هستند.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^8 (C_i + D_i) \quad (6)$$

که در آن



## فاضلاب‌های صنعتی

(۱۳)

$$C_i = \left( 1 + \frac{0.03 \times 0.15 \times (1 + 0.15)^{2.5}}{(1 + 0.15)^{2.5} - 1} \right) (x(i) \times \text{BOD}(i) \times Q(i) \times 30)$$

$$-\frac{dC}{dx_i} = - \left( 1 + \frac{0.03 \times 0.15 \times (1 + 0.15)^{2.5}}{(1 + 0.15)^{2.5} - 1} \right) (\text{BOD}(i) \times Q(i) \times 30)$$

تابع لاگرائزین مربوط به جریمه پرداختی از سوی تخلیه‌کنندگان آلاینده‌های صنعتی همانند آلاینده‌های شهری (معادله ۱۲) است.

## ۲-۱-۵-۲- تابع هدف نهایی رهبر

پس از تعریف توابع هزینه و جریمه قابل پرداخت توسط واحدهای آلاینده نقطه‌ای و محاسبه توابع لاگرائزین آنها، گام بعدی ماکزیم نمودن تابع هدف سازمان حفاظت محیط زیست با لحاظ نمودن قید تأمین غلظت اکسیژن محلول در محدوده بالاتر از ۵ میلی‌گرم در لیتر و لاگرائزین توابع هزینه و جریمه هر یک از واحدهای آلاینده فوق به شرح زیر است

$$\text{Max} \sum_{i=1}^8 \left( 1.6 \times 1.5 \times (1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) \times Q'(i) \times n \times \right. \\ \left. - \text{Coe} \times \sum_{j=1}^{10} (\text{DO}_j - 5)^2 - \sum_{i=1}^8 \left( \frac{dC_i}{dx_i} + \frac{dD_i}{dx_i} \right) \right) \quad (14)$$

if  $(1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) > 50$   
if  $\text{DO}_j < 5$

$$\left( \frac{((1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) - 50)}{50} \times \text{fine} \right)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, 8$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, 10$$

در معادله ۱۴، به ترتیب ترم اول مربوط به درآمدهای ناشی از تخطی تخلیه بار آلودگی cBOD به رودخانه بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر (معادله ۳)، ترم دوم تخطی از استاندارد غلظت اکسیژن محلول (معادله ۴) و ترم سوم شکل لاگرائزین هزینه‌های احداث و بهره‌برداری تصفیه‌خانه‌ها و جریمه تخطی تخلیه بار آلودگی cBOD برای هر واحد آلاینده (معادله ۱۱ تا معادله ۱۳) است. ترم اول و آخر معادله فوق در صورت تخلیه cBOD بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در واحد تخلیه‌کننده آلاینده آم و ترم دوم این معادله در صورت غلظت اکسیژن محلول کمتر از ۵ میلی‌گرم در لیتر در نقطه

به عبارتی در این رویکرد، هدف رهبر با در نظر گرفتن توابع هدف پیروی کنندگان به عنوان قیدهایی مسئله بهینه می‌شود.

برای حل این مسئله با این ساختار فرمول‌بندی، توابع هدف منابع آلاینده نقطه‌ای (پیروان) (معادله ۶) به کمک روش ضرب لاگرائزین در تابع هدف سازمان حفاظت محیط زیست (رهبر) اعمال می‌شوند.

## ۲-۵-۱- اهداف پیروی کنندگان به عنوان قیود رهبر

روش ضرایب لاگرائزین به منظور دستیابی به یک راه حل بهینه در این مسئله ابزار کارایی را فراهم می‌نماید. برای این منظور ابتدا با ضرب عدد (۱-) تابع هدف پیروی کنندگان از مطلوبیت کاهش به مطلوبیت افزایشی تغییر می‌کند (معادله ۱۰) و همگونی میان آن و تابع هدف رهبر ایجاد می‌شود

$$\text{Max} \left( -1 \times \sum_{i=1}^8 (C_i + D_i) \right) \quad (10)$$

فرض می‌شود که پیروی کنندگان به‌طور همزمان تصمیم‌گیری می‌کنند و راه حل چانه‌زنی نش را برای یافتن بهترین پاسخ در پیش می‌گیرند. بهینه‌سازی تابع هدف پیروان همراه با تابع هدف رهبر دنبال می‌شود.

یکی از آسان‌ترین روش‌ها، به کارگیری فرم لاگرائزین توابع هدف پیروی کنندگان و افزودن آن‌ها به عنوان قیدهایی رهبر در ساختار معادله ۳ است.

## ۲-۱-۵-۱- توابع لاگرائزین پیروی کنندگان

## فاضلاب‌های شهری

(۱۱)

$$C_i = \left( 1 + \frac{0.02 \times 0.15 \times (1 + 0.15)^{2.5}}{(1 + 0.15)^{2.5} - 1} \right) (x(i) \times \text{BOD}(i) \times Q(i) \times 23)$$

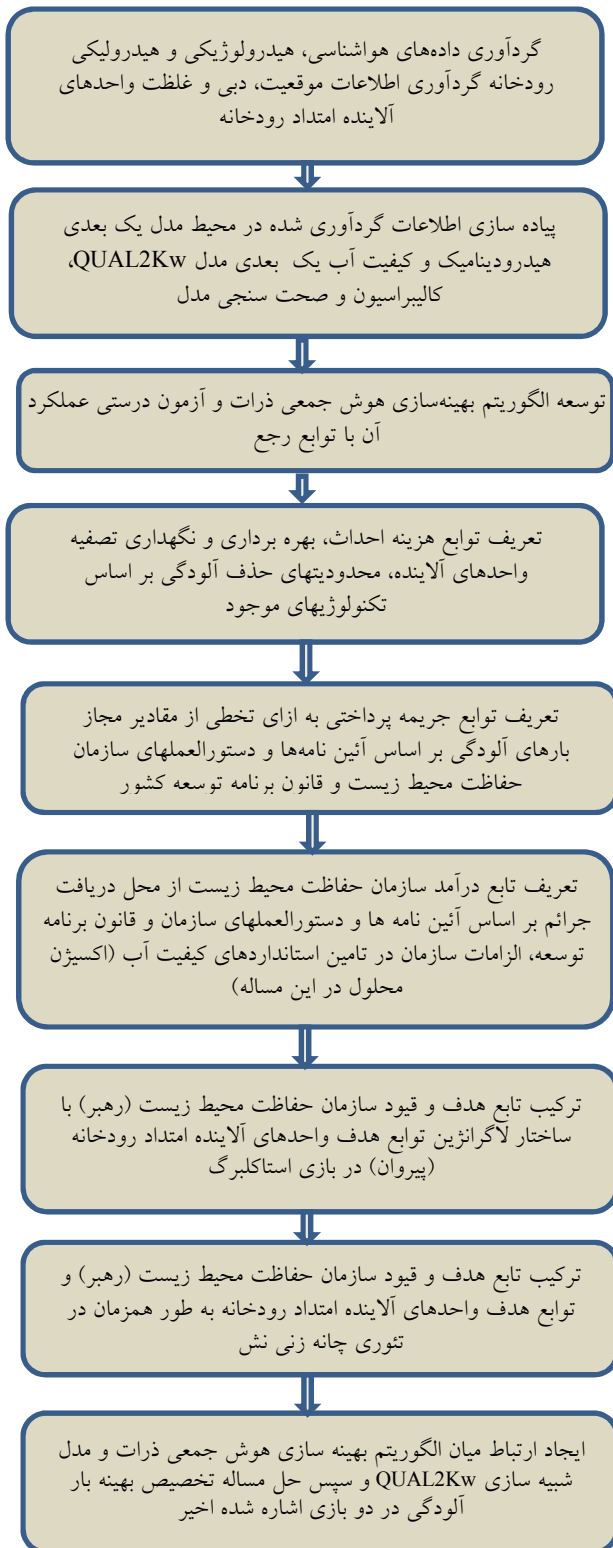
$$-\frac{dC}{dx_i} = - \left( 1 + \frac{0.02 \times 0.15 \times (1 + 0.15)^{2.5}}{(1 + 0.15)^{2.5} - 1} \right) (\text{BOD}(i) \times Q(i) \times 23) \quad (12)$$

$$-\frac{dD}{dx_i} = 1.6 \times 1.5 \times \text{BOD}(i) \times Q'(i) \times n \times \text{fine} [1 + \text{BOD}(i)(x(i) - 1) / 25]$$

if  $(1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) > 50$







**Fig. 1.** Procedure of using game theory approach for solving optimal waste load allocation problem  
 شکل ۱- گام‌های حل مسئله تخصیص بهینه بار آلودگی رودخانه قشلاق با رویکرد تئوری بازی‌ها

کنترل زام، در محاسبات لحاظ می‌شوند. با حل معادله ۱۴ بهینه‌سازی تخصیص بار آلاینده نقطه‌ای در امتداد رودخانه قشلاق با مشارکت ذینفعان در تصمیم‌گیری و در ساختار بازی استاکلبرگ حل می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات تک هدفه به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی برای حل این مسئله به‌کار گرفته شد.

### ۲-۶- مدل بازی چانه زنی نش

در مدل تئوری بازی‌های همکارانه چانه‌زنی نش، ۹ بازیگر شامل سازمان حفاظت محیط زیست و واحدهای آلاینده تخلیه‌کننده بار آلودگی (۸ واحد آلاینده) به‌صورت همزمان، با یکدیگر وارد بازی می‌شوند. تابع هدف تعریف شده برای این بازی همکارانه به شرح معادله ۱۵ تعریف می‌شوند. محاسبه تابع جریمه در صورت تخطی غلظت cBOD بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در جریان خروجی و پنالتی عدم رعایت استاندارد کیفیت آب در صورت غلظت اکسیژن محلول کمتر از ۵ میلی‌گرم در لیتر، لحاظ می‌شود

(۱۵)

$$\text{Max} \sum_{i=1}^8 \left( 1.6 \times 1.5 \times (1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) \times Q'(i) \times n \times \frac{((1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) - 50)}{50} \times \text{fine} \right) - \text{Coe} \times \sum_{j=1}^{10} (\text{DO}_j - 5)^2 \times \prod_{i=1}^8 \frac{1}{C_i + D_i}$$

if  $(1 - x(i)) \times \text{BOD}(i) > 50$   $\forall i = 1, 2, \dots, 8$   
 if  $\text{DO}_j < 5$   $\forall j = 1, 2, \dots, 10$

در این بازی همکارانه، توابع هدف کلیه بازیگران به‌طور همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد و بازیگران با همکاری با یکدیگر در ارائه تصمیم بهینه نهایی در مسئله تخصیص بار آلاینده cBOD مشارکت می‌نمایند. مقدار تعرفه جریمه و درصدهای حذف از واحدهای آلاینده در امتداد رودخانه قشلاق، از متغیرهای تصمیم مسئله هستند.

به‌طور کلی گام‌های حل مسئله تخصیص بهینه بار آلودگی در امتداد رودخانه قشلاق با بازی‌های استاکلبرگ و چانه‌زنی نش به شرح دیاگرام ارائه شده در شکل ۱ می‌باشند.

### ۳- نتایج و بحث

حل این مسئله تخصیص بار آلودگی cBOD از ۸ منبع نقطه‌ای در امتداد رودخانه قشلاق از ارتباط میان مدل شبیه‌سازی کیفیت آب QUAL2Kw و الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه هوش جمعی



الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات توسعه داده شده در این پژوهش نیز با تابع ریاضی Ackley با بعد متغیرهای تصمیم (تعداد متغیرهای تصمیم) ۳۰ و در بازه [۳۰-۳۰] مورد آزمون قرار گرفت و نتایج قابل قبولی ارائه شد (Khoshkam, 2016). سپس این الگوریتم با مدل شبیه‌سازی QUAL2Kw ارتباط داده شد و در حل مسئله تخصیص بهینه بار آلودگی‌های نقطه‌ای در امتداد رودخانه قشلاق با در نظر گرفتن نقش ذینفعان در دو مدل تئوری بازی‌های استاکلبرگ و همکارانه نش به کار گرفته شد. نتایج حل این مسئله با رویکرد پیشنهادی در این پژوهش به این شرح ارائه می‌شود: در ارتباط میان الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات و QUAL2Kw، مقادیر حذف آلودگی از هر یک از واحدهای آلاینده (مقادیر حذف توسط الگوریتم بهینه‌سازی به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسئله تعیین می‌گردند) در مقادیر بار آلودگی در صفحه PointSource مدل QUAL2Kw اعمال و پس از اجرای مدل QUAL2Kw، پارامتر کیفی اکسیژن محلول در نقاط پایش، از صفحه WQ Output مدل شبیه‌ساز برای کنترل قید تأمین استانداردهای کیفیت آب توسط زیربرنامه‌ای قرائت می‌شود. برای محاسبه جریمه زیست‌محیطی نیز، مقدار تخطی غلظت cBOD از صفحه PointSource نرم‌افزار QUAL2Kw قابل قرائت است و در مقدار تعرفه جریمه تعیین شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی هوش جمعی ذرات و سایر پارامترها و ضرایب تعیین شده بر اساس قوانین و توابع سازمان حفاظت محیط‌زیست، اعمال می‌شود.

در شکل ۴ مقدار حذف آلودگی cBOD از منابع آلاینده نقطه‌ای امتداد رودخانه قشلاق برای دو تکنیک تئوری بازی‌های حل شده در این پژوهش، ارائه شد. بر اساس نتایج حاصل، در تئوری بازی‌های همکارانه نش واحدهای آلاینده مقادیر حذف بیشتری نسبت به بازی استاکلبرگ در نظر می‌گیرند. هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری از واحدهای تصفیه آلودگی در شکل ۵ و جدول ۳ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج حاصل، در رویکرد چانه‌زنی نش نسبت به بازی استاکلبرگ، واحدهای آلاینده تمایل بیشتری به حذف آلودگی داشته و هزینه‌های بالاتری را نسبت به بازی استاکلبرگ می‌پردازند زیرا در بازی استاکلبرگ، سازمان حفاظت محیط‌زیست به دلیل نقش رهبر با در نظر گرفتن مقدار جریمه بالاتر ترجیح می‌دهد حذف آلودگی توسط واحدهای آلاینده تا جایی ادامه یابد که استانداردهای کیفیت آب رودخانه

ذرات در ساختار PSO-QUAL2Kw با در نظر گرفتن نقش ذینفعان در فرایند تصمیم‌گیری حل شد. ابتدا مدل شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه قشلاق در محیط QUAL2Kw پس از وارد نمودن داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، کیفی و شیمیایی رودخانه به‌عنوان ورودی به مدل، آماده و سپس کالیبراسیون مدل صورت پذیرفت (Khoshkam, 2016). داده‌های اکسیژن محلول و نیاز اکسیژن خواهی بیولوژیکی به‌منظور داده‌های کالیبراسیون در رودخانه قشلاق در ۱۰ نقطه کنترل، مورد استفاده قرار گرفتند. با تنظیم پارامترهای ضریب هواگیری و ضریب تجزیه ماده آلی، فرایند کالیبراسیون دنبال شد و همگرایی مناسبی میان داده‌های اندازه‌گیری شده (میدانی) و نتایج شبیه‌سازی ایجاد گردید. نتایج این شبیه‌سازی و کالیبراسیون در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

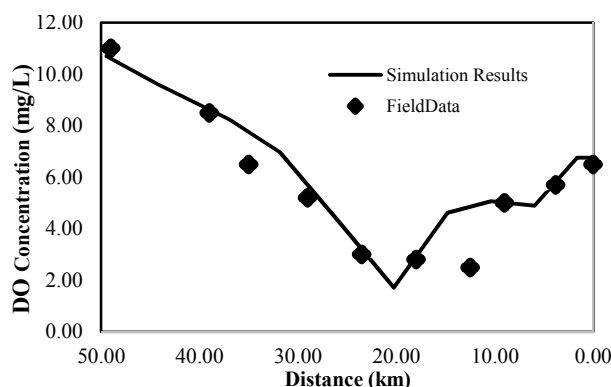


Fig. 2. Comparison of DO concentration obtained from simulation and observed for Gheshlagh River

شکل ۲- روند تغییرات اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و داده‌های میدانی در طول رودخانه قشلاق

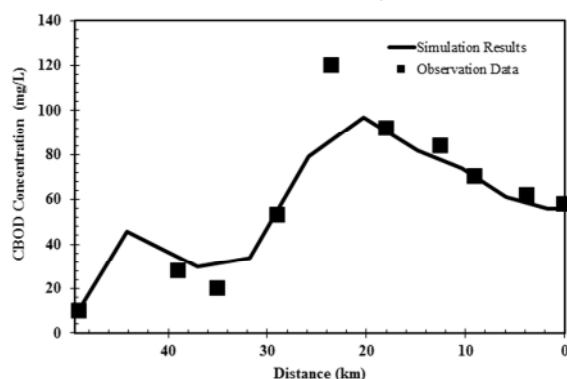


Fig. 3. Comparison of cBOD concentrations obtained from simulation and observed data in Gheshlagh River

شکل ۳- روند تغییرات cBOD شبیه‌سازی شده و داده‌های میدانی در طول رودخانه قشلاق



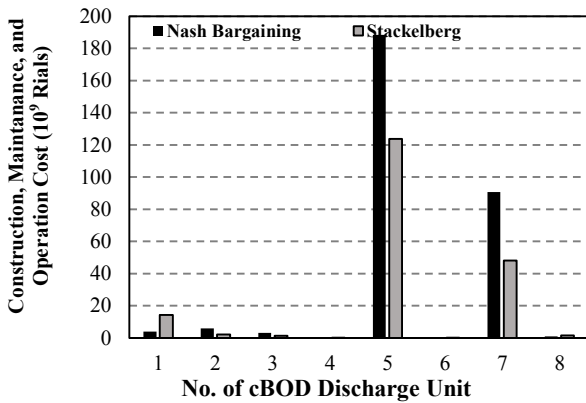


Fig. 5. Construction, maintenance, and operation costs of cBOD at discharge units under two different game theories

شکل ۵- هزینه‌های احداث و نگهداری تصفیه‌خانه در تکنیک‌های مختلف تئوری بازی‌ها

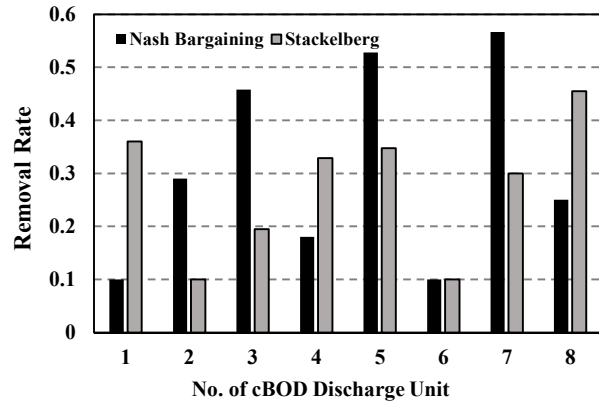


Fig. 4. Removal rates of cBOD at different discharge units under two different game theories

شکل ۴- مقادیر حذف آلودگی منابع آلاینده در رویکردهای مختلف تئوری بازی‌ها

مقادیر بالای شدت جرمی cBOD ورودی به رودخانه قشلاق است. مقادیر جریمه پرداختی توسط هر یک از واحدهای آلاینده به دلیل رهاسازی cBOD با غلظت بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در جدول ۴ و شکل ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از حل مدل در بازی استاکلبرگ، همانگونه که قبلاً نیز ذکر شد به دلیل نقش رهبر توسط سازمان حفاظت محیط زیست در صدهای حذف کمتری توسط واحدهای آلاینده در نظر گرفته می‌شود زیرا پس از فراهم شدن شرایط کیفی مطلوب (غلظت اکسیژن محلول بیش از ۵ میلی‌گرم در لیتر)، مشکلی از نظر سازمان حفاظت محیط زیست در مورد مقادیر رهاسازی cBOD وجود نخواهد داشت و با اعمال

(غلظت اکسیژن محلول ۵ میلی‌گرم در لیتر) تأمین شود و کنترل و نظارت بر رهاسازی مقادیر غیر مجاز cBOD (که البته سبب تهدید غلظت اکسیژن محلول پیکره آبی نشود)، با اعمال جرائم زیست محیطی تخلیه‌های غیر مجاز آلاینده، صورت خواهد پذیرفت. در تئوری بازی چانه‌زنی نش، به دلیل حضور همزمان بازیگران در فرایند تصمیم‌گیری، واحدهای آلاینده ترجیح می‌دهند تا حد امکان حذف بیشتری را از منابع آلاینده به انجام برسانند تا جریمه کمتری به سازمان حفاظت محیط زیست بابت رهاسازی cBOD با غلظت بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر بپردازند. هزینه‌های زیاد حذف آلودگی cBOD از واحدهای آلاینده ۵ و ۷ به دلیل

جدول ۳- هزینه‌های احداث و نگهداری تصفیه‌خانه در تکنیک‌های مختلف تئوری بازی‌ها

Table 3. Construction, maintenance, and operation costs at different discharge units for two different game theory methods

Number of discharger	Number of discharger								Total cost (billion Rial)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Nash bargaining	3.99	6.03	3.22	0.09	188.33	0.03	90.79	0.91	293.39
Stackelberg	14.36	2.08	1.37	0.17	123.82	0.03	48.09	1.65	191.57

جدول ۴- جریمه پرداختی توسط واحدهای آلاینده در تکنیک‌های مختلف تئوری بازی‌ها

Table 4. Fine paid by cBOD discharge units in various game theory approaches

Number of discharger	Number of discharger								Total cost (billion Rial)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Nash bargaining	1.11	0.44	0.11	0.00	0.00	0.00	2.15	0.08	3.89
Stackelberg	3.18	2.73	0.82	0.00	7.93	0.00	16.94	0.27	31.86



درآمد از محل پرداخت جرائم توسط واحدهای آلاینده. این واحدهای صنعتی و شهری نیز متحمل هزینه‌های کمتری شوند. اما در بازی استاکلبرگ، به دلیل نقش سازمان حفاظت محیط زیست به عنوان رهبر، کسب درآمد حداکثر از واحدهای آلاینده متخلف با در نظر گرفتن جرائم بیشتر، مورد توجه بیشتری است. اگرچه کاهش هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری از تصفیه‌خانه‌ها و هزینه‌های جرائم تخلف نیز به عنوان قیدهای سیستم، مورد توجه بوده است.

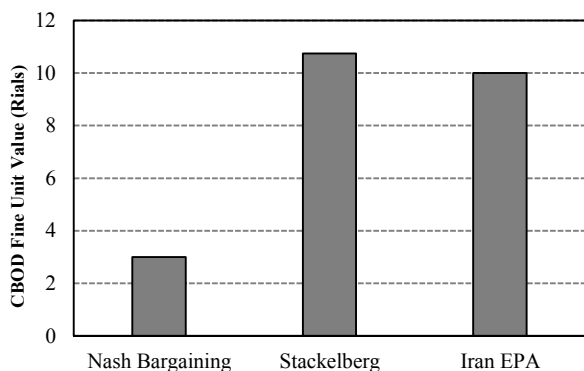


Fig. 7. cBOD fine unit value under two different game theories compared with with Iran EPA value

شکل ۷- مقادیر تعرفه جریمه در تکنیک‌های مختلف بازی و مقایسه با شرایط کنونی

مقادیر هزینه‌های پرداخت شده بابت بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها و جرائم پرداختی به سازمان حفاظت محیط زیست توسط هر یک از واحدهای آلاینده به تفکیک برای هر واحد آلاینده مشخص می‌شود. سازمان محیط زیست با اعمال جرائم برای تخلیه بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر cBOD، به اعمال نقش نظارتی و کنترلی خود می‌پردازد (جدول ۵). همچنین، درآمدهای کسب شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست نیز در هر یک از رویکردهای

جدول ۵- مقایسه هزینه‌های پرداختی واحدهای آلاینده و درآمد سازمان محیط زیست

Table 5. Fine paid for over discharging cBOD at each discharge unit and the total income gained by Iran EPA under two different game theories

Game theory method	Costs paid by Every cBOD Discharger Unit (billion Rial)								Environmental Protection Agency's income (billion Rial)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Nash bargaining	5.09	6.47	3.33	0.09	188.33	0.03	92.93	0.99	3.89
Stackelberg	17.53	4.81	2.19	0.17	131.75	0.03	65.03	1.92	31.86

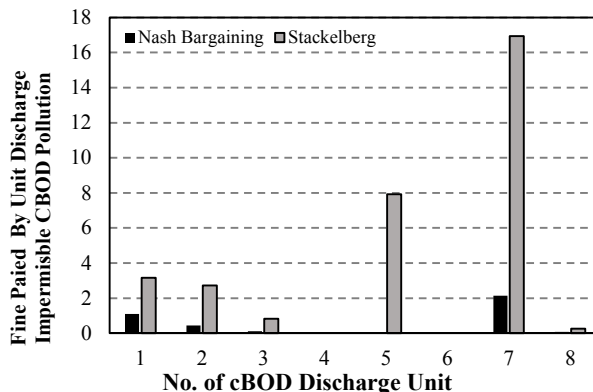


Fig. 6. Fines paid by violating cBOD discharge load at different discharge unit under two different game theories

شکل ۶- جریمه پرداختی توسط واحدهای آلاینده در تکنیک‌های مختلف تئوری بازی‌ها

جرائمی برای تخلیه بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر cBOD، به اعمال نقش نظارتی و کنترلی خود می‌پردازد.

بر اساس نتایج، مقادیر جریمه بیشتری در روش استاکلبرگ نسبت به چانه‌زنی نش برای عدم رعایت استانداردهای کیفیت آب در نظر گرفته می‌شود که این مقایسه در شکل ۷ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج حاصل مقدار جریمه در نظر گرفته شده در بازی استاکلبرگ به مقدار انتخابی کنونی توسط سازمان حفاظت محیط زیست نزدیک است. در بازی چانه‌زنی نش، به دلیل ورود همزمان کلیه بازیگران، واحدهای آلاینده ترجیح می‌دهند تا حد امکان تصفیه‌خانه‌های با کارایی حذف آلودگی cBOD بیشتری احداث نمایند و هزینه‌های بیشتری بابت احداث، نگهداری و بهره‌برداری از تصفیه‌خانه‌ها بپردازند تا به این ترتیب متحمل جرائم کمتری در تخلیه cBOD با غلظت بیش از ۵۰ میلی‌گرم در لیتر شوند. همچنین در این بازی، مقدار جریمه کمتری توسط سازمان حفاظت محیط زیست تعریف می‌شود به گونه‌ای که ضمن کسب



محیط‌زیست درآمد بالاتری را نسبت به بازی چانه‌زنی نش با تعریف تعرفه جریمه بالاتر کسب می‌نماید. به عبارتی، در روش استاکلبرگ در مقایسه با روش چانه‌زنی نش، رهبر (سازمان حفاظت محیط‌زیست) از اولویت و مزیت بالاتری نسبت به پیروان (واحدهای آلاینده) برخوردار است و درآمد بیشتری نصیب آن می‌شود. اما هزینه‌های پرداخت شده در بازی چانه‌زنی نش توسط واحدهای آلاینده نسبت به بازی استاکلبرگ مقدار بیشتری است. مقدار تعرفه جریمه تعیین شده در بازی استاکلبرگ به مقدار تعیین شده کنونی توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست بسیار نزدیک است. لازم به یادآوری است در هر دو بازی، تأمین کیفیت اکسیژن محلول آب در نقاط کنترل تعریف شده به صورت کامل فراهم می‌شود. ادامه پژوهش‌ها در این حوزه برای آینده، می‌تواند به صورت مسائل زیر تعریف شود:

- ۱- فراهم نمودن اطلاعات مربوط به میزان بار آلودگی تولید شده به ازای سرانه تولید. درآمد خالص سرانه تولید در واحدهای صنعتی و تولیدی، می‌تواند در محاسبه درآمد کلی خالص و تصمیم‌گیری‌ها اطلاعات ارزشمندی فراهم نماید؛
- ۲- منظور نمودن منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در کنار منابع آلاینده نقطه‌ای و بهینه‌سازی برنامه‌های مجموع بیشینه روزانه مجاز؛
- ۳- تخصیص بار چند آلودگی با رویکرد تئوری بازی‌ها و ابزارهای پیشنهادی در این پژوهش؛
- ۴- لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها، نگاه پویا به مباحث هیدرولوژیکی و هواشناسی در حل مسئله مورد مطالعه در این پژوهش.

تئوری بازی‌ها در این جدول ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل تصمیم‌گیری با حضور ذینفعان در صورت استفاده از تئوری بازی‌های استاکلبرگ درآمد بیشتری عاید سازمان حفاظت محیط‌زیست می‌نماید و مجموع هزینه‌های پرداخت شده توسط واحدهای صنعتی و شهری به منظور تصفیه آلودگی، در امتداد رودخانه قشلاق در مقایسه با تئوری بازی‌های چانه‌زنی نش در اغلب موارد کمتر است. به عبارتی می‌توان گفت در تئوری بازی‌های چانه‌زنی نش، نقش کلیه بازیگران در کنار یکدیگر و با همکاری با یکدیگر در نظر گرفته شده و نتایج حاصل در مقایسه با بازی استاکلبرگ نیز، گویای این نتیجه است.

#### ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این پژوهش، به منظور در نظر گرفتن مشارکت ذینفعان در فرایند تصمیم‌گیری بهینه مسئله تخصیص بار آلودگی cBOD در امتداد رودخانه قشلاق، از رویکرد تئوری بازی‌ها استفاده شد. ذی‌نفعان حاضر در این مسئله (سازمان حفاظت محیط‌زیست و هر یک از واحدهای آلاینده در امتداد مسیر رودخانه) به صورت بازیگرانی در فرایند تصمیم‌گیری تخصیص بهینه بار آلودگی وارد شدند و سپس مشارکت آنان در فرایند تصمیم‌گیری با دو ساختار بازی استاکلبرگ و بازی چانه‌زنی نش مورد توجه قرار گرفت. متغیرهای تصمیم در این مسئله نیز مقدار تعرفه جریمه و درصدهای حذف آلودگی cBOD از ۸ منبع آلاینده نقطه‌ای در امتداد مسیر رودخانه قشلاق واقع در استان کردستان در ایران بوده‌اند.

بر اساس نتایج حاصل در بازی استاکلبرگ، سازمان حفاظت

## References

- Afshar, A., Kazemi, H. & Saadatpour, M. 2011. Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale Water Quality Model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran. *Water Resource Management*, 25, 2613-2632.
- Al-Ani, D. 2012. Energy optimization strategy for system-operational problems. PhD Thesis, MSc Thesis University, Canada.
- Anandalingam, G. & Apprey, V. 1991. Multi-level programming and conflict resolution. *European Journal of Operational Research*, 51, 233-247.
- Asheghmoala, M., Fazel, A.M. & Homami, M. 2014. The effect of river assimilative capacity in determination of allowable water quality parameters in sewages. *Environmental Science and Engineering*, 1 (4), 37-49. (In Persian)



- Benčekroun, H. & Long, N.V. 2001. *Leader and follower: A differential game model*. McGill University and CIRANO, Montreal, Canada.
- Damghani, K.K., Abtahi, A.R. & Tavana, M. 2013. A new multi-objective particle swarm optimization method for solving reliability redundancy allocation problems. *Reliability Engineering & System Safety*, 111, 58-75.
- Department of Environment (DoE). 2016. Environmental crime. Viewed 29 July 2016, <http://hse.nigc.ir/Portal/File/ShowFile.aspx? > .> (In Persian)
- Jafari Salim, B. 2009. Identification of pollution sources and pollution load determination in Gheshlagh river. MSc Thesis, College of Environment, Tehran University, Tehran Iran. (In Persian)
- Kicsiny, R., Piscopo, V., Scarelli, A. & Varga, Z. 2014. Dynamic Stackelberg game model for water rationalization in drought emergency. *Journal of Hydrology*, 517, 557-565.
- Khoshkam, H. 2016. Simulation-optimization approach for waste load allocation in river. MSc Thesis, College of Environment, Karaj, Iran. (In Persian)
- Nikoo, M.R., Kerachian, R. & Azadnia, A.A. 2012. A fuzzy transformation model for water and waste load allocation in rivers. *Proceedings of International Conference on Ecological, Environmental and Biological Sciences*, Dubai, 7-8<sup>th</sup> January.
- Madani, K. 2010. Game theory and water resources. *Journal of Hydrology*, 381, 225-238.
- Lee, C.S. 2012. Multi-objective game-theory models for conflict analysis in reservoir watershed management. *Chemosphere*, 87, 608-613.
- Madani, K., Zarezadeh, M. & Morid, S. 2014. A new framework for resolving conflicts over transboundary rivers using bankruptcy methods. *Hydrology Earth System Science*, 18, 3055-3068.
- Nikoo, M.R., BahmanBeiglou, P.H. & Mahjouri, N. 2016. Optimizing multiple-pollutant waste load allocation in rivers: an interval parameter game theoretic model. *Water Resources Management*, 30(12), 4201-4220.
- Pelletier, G. & Chapra, S. 2008. QUAL2Kw: Theory and documentation; A modeling Framework for simulating river and stream water quality: Documentation and users manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA.
- Safari, N., Zarghami, M. & Szidarovszky, F. 2014. Nash bargaining and leader-follower models in water allocation: Application to the Zarrinehrud River basin, Iran. *Applied Mathematical Modelling*, 38, 1959-1968.
- Szidarovszky, F. 2008. *Game Theory*. Classnotes of Game Theory Workshop, Sharif University, Tehran, Iran.
- Xu, J., Lv, C., Zhang, M., Yao, L. & Zeng, Z. 2015. Equilibrium strategy-based optimization method for the coal-water conflict: A perspective from China. *Journal of Environmental Management*, 160, 312-323.
- Zhao, L., Qian, Y., Huang, R., Li, C., Xue, J. & Hu, Y. 2012. Model of transfer tax on transboundary water pollution in China's river basin. *Operations Research Letters*, 40, 218-222.

