

حل مناقشات در مدیریت تخصیص منابع آب با استفاده از نظریه بازی، مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه

محمد دانش یزدی^۱

احمد ابریشمچی^۲

مسعود تجریشی^۳

(دریافت ۹۰/۶/۱۹)

آخرین اصلاحات دریافتی ۹۲/۲/۲۰

پذیرش ۹۲/۲/۲۷

چکیده

در سالهای اخیر، پیامدهای اجتنابناپذیر سیر صعودی تقاضا و همچنین کاهش ذخایر منابع طبیعی مختلف، به خصوص آب، موجب افزایش مناقشات در زمینه چگونگی بهره‌برداری و همچنین تخصیص آنها به ذینفعان مختلف شده است. رویکرد تخصیص آب صرفاً براساس حقابه اولیه معمولاً منجر به استفاده کارآمد از آب در کل یک حوضه آبریز نخواهد شد. در این میان، نیاز به یک روش جامع و پایدار به منظور انجام تخصیص به‌نحوی که تمامی گروههای ذینفع در بالاترین سطح رضایت قرار داشته باشند، ضروری به نظر می‌رسد. یکی از این روشها، نظریه بازی بوده که به کمک ابزارهای موجود در آن، می‌توان به تخصیص منابع مورد استفاده مشترک توسط ذینفعان مختلف با رعایت سه اصل کارآمدی، برابری و پایداری پرداخت. در این تحقیق ابتدا یک مدل جامع برنامه‌ریزی خطی برای به‌دست آوردن الگوی تخصیص اولیه بر اساس حقابه اولیه کاربران توسعه داده شد. سپس با استفاده از نتایج مدل برنامه‌ریزی منابع آب به‌همراه مفاهیم نظریه بازی مانند هسته، ارزش شاپلی و شاخص پایداری، حالات مختلف همکاری بین ذینفعان مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها با انتخاب حوضه آبریز دریاچه ارومیه با منابع آبی محدود و آب‌بران متعدد به‌عنوان مطالعه موردی، کارایی و مزیت‌های بالقوه این روش نشان داده شد. طبق نتایج مدل بهینه‌سازی، استان کردستان دارای بهترین وضعیت در تأمین نیازهای آبی خود و استان آذربایجان شرقی دارای بیشترین کمبود به لحاظ تأمین منابع آبی هر دو بخش کشاورزی و محیط‌زیستی بود. علاوه بر این با پیروی از الگوی تخصیص ارائه شده، میزان آب ورودی به دریاچه ارومیه بیشتر از نیازهای زیست محیطی آن در طول دوره زمانی مورد مطالعه خواهد بود. بنابراین، نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از این واقعیت بود که نظریه بازی‌های همکاری‌ها همکارانه به‌همراه یک مدل جامع مدیریت منابع آب می‌تواند به‌طور مؤثری برای ارزیابی حالات مختلف همکاری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: تخصیص آب، حل مناقشه، نظریه بازی‌های همکاری‌ها، مدل برنامه‌ریزی منابع آب

Conflict Resolution of Water Resources Allocations Using the Game Theoretic Approach: The Case of Orumieh River Basin

M. Danesh-Yazdi¹

A. Abrishamchi²

M. Tajrishy³

(Received Sep. 10, 2011 Revised May 10, 2013 Accepted May 17, 2013)

Abstract

During recent years, unavoidable consequences of increased demand for, and decreased supply of, various natural resources, especially water, have caused increased conflict over their exploitation and also allocation to different stakeholders. Water allocations merely based on a water rights approach usually do not make efficient use of water for the whole river basin. Thus, there is a need for a comprehensive and stable allocation method that can satisfy all involved interest groups in the best manner. One of these methods is game theory that can be used to allocate the water resources among riparian parties regarding principles of equity, efficiency and sustainability. In this study, first a comprehensive linear programming model has been developed to achieve the optimal allocation pattern based on the initial water rights of stakeholders. Then, by using the results of the water planning model combined with the game theoretical concepts such as the Core, the Shapely Value, and, the Gately propensity to disrupt index, possible cases of cooperation among riparian parties have been evaluated.

1. Grad. M.Sc. Student, Dept. of Civil Eng., Sharif University of Tech., Tehran
(Corresponding Author) +1612-803-8577 mdanesh66@gmail.com

2. Prof., Dept. of Civil Eng. and UNESCO Chair in Water and Environment
Management for Sustainable Cities, Sharif University of Tech., Tehran

3. Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng. and UNESCO Chair in Water and
Environment Management for Sustainable Cities, Sharif University of
Tech., Tehran

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف،
تهران (نویسنده مسئول) ۸۵۷۷-۸۰۳-۱۶۱۲ mdanesh66@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و کرسی یونسکو در مدیریت آب و محیط زیست
برای شهرهای پایدار، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و کرسی یونسکو در مدیریت آب و محیط زیست
برای شهرهای پایدار، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

Finally, through the case study of the Orumieh River Basin in Iran with scarce water resources and multiple users, effectiveness and potential advantages of this approach have been shown. The results of the optimization model showed that the Kordestan province has the best situation in supplying its demands relative to the other provinces and in contrast, the East Azarbayejan has the most deficiency in supplying its demands in both agriculture and environmental sectors. Moreover, by following the given allocation pattern, the amount of water entering the Lake Orumieh will be more than its environmental demand during the planning. Therefore, the results of this study showed that cooperative game theory can be applied successfully to assess the cases of cooperation in the Orumieh River Basin in conjunction with a comprehensive water planning model.

Keywords: Water Allocation, Conflict Resolution, Cooperative Game Theory, Water Planning Model.

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، رشد روز افزون جمعیت و توسعه اقتصادی در سرتاسر دنیا منجر به افزایش تقاضا برای منابع محدود شده و مدیریت آنها را با مناقشات جدی مواجه کرده است. علاوه بر این، منابع آب مشترک که توسط دو یا چند آب‌بر تقسیم شده و به مصرف می‌رسند، باعث تشدید پیچیدگی در مدیریت و برنامه‌ریزی بخش منابع آب شده است. تاکنون، بیش از ۲۰۰ حوضه آبریز در سرتاسر دنیا شناسایی شده که منابع آب آنها به‌طور مشترک توسط دو یا چند آب‌بر به مصرف می‌رسد.

منشأ مناقشات موجود در مدیریت منابع آب مشترک بین چند آب‌بر را عمدتاً می‌توان وجود عدم نوعی تقارن در اطلاعات، قدرت و یا موقعیت دانست. مجموعه این ناتقارنی‌ها این امکان را به برخی از ذینفعان داده تا دارای نوعی قدرت استراتژیک در چگونگی تقسیم و استفاده از منابع آب موجود در یک حوضه نسبت به سایرین باشند [۱]. در میان راهکارهای متعدد ارائه شده توسط محققان برای حل مناقشات موجود بین آب‌بران مختلف و بهبود مدیریت منابع آب، نظریه بازی‌های همکارانه یکی از بهترین روشها بوده و به‌طور موفق مورد استفاده قرار گرفته است. در واقع، این نظریه یک ابزار است که به کمک آن می‌توان تعیین نمود که آیا اولاً در عمل امکان برقراری نوعی همکاری بین آب‌بران وجود دارد یا خیر و ثانیاً، تحت آن نوع همکاری، آب‌بران بتوانند به عوایدی دست یابند که در صورت عدم همکاری از آن محروم بوده‌اند. همچنین با استفاده از یک سری روشهای مبتنی بر این نظریه می‌توان به تخصیص عواید حاصل از همکاری بین ذینفعان با رعایت سه اصل کارآمدی^۱ و برابری^۲ و پایداری^۳ پرداخت. برای تعیین این عواید در یک حوضه آبریز، استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

در یک دهه گذشته، تقسیم منابع آب موجود در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و

کردستان منشأ افزایش مناقشات موجود در این حوضه بوده است. در سالهای اخیر، کاهش چشمگیر ریزشهای جوی، وقوع خشکسالی‌های متوالی به‌خصوص طی سالهای ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۱ و نیز افزایش قابل ملاحظه طرح‌های توسعه و بهره‌برداری از آب برای مصارف کشاورزی و سایر کاربری‌ها، منجر به کاهش مقدار آب ورودی به دریاچه ارومیه شده است. بنابراین، یک چنین عوامل طبیعی و انسان‌ساخت، انسجام اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دریاچه و تالاب‌های مربوط را در معرض تهدید قرار داده و نگرانی‌های شدیدی در جوامع علمی، محلی، استانی، ملی و حتی بین‌المللی به‌وجود آورده است.

یکی از اولین کاربردهای نظریه بازی در مدیریت منابع آب توسط روگرس در سال ۱۹۶۹ بر روی یک مطالعه موردی در رود گنگ بین پاکستان و هند انجام شد [۲]. پس از آن، نظریه بازی‌های همکارانه به‌طور وسیعی در موضوعات مختلف مدیریت منابع آب مانند تخصیص هزینه در پروژه‌های توسعه منابع آب مورد استفاده قرار گرفت. هنی و دیکینسون در سال ۱۹۸۲ دو روش MCRS^۴ و SCRB^۵ را برای تخصیص هزینه یک پروژه منابع آب بین ذینفعان مختلف در یک بازی همکارانه به کار بردند [۳].

لجانو و داوس در سال ۱۹۹۵ از یک روش بازی چندنفره تحت عنوان نوکلئوس^۶ نرمال شده برای تخصیص هزینه و سود در یک پروژه استفاده دوباره از آب در کالیفرنیا جنوبی استفاده کردند [۴]. آنها نتایج این روش را با سایر روشها مانند نوکلئوس و ارزش شاپلی مقایسه کرده و نشان دادند که روش نوکلئوس نرمال شده اطمینان بیشتری را برای ائتلاف‌های دارای چند عضو، برای پیوستن به ائتلاف کلی^۷ به‌وجود می‌آورد.

بسیاری از بازی‌های همکارانه‌ای که در حل مناقشات موجود در یک حوضه آبریز به کار گرفته شده‌اند، از مدل‌های بهینه‌سازی برای محاسبه توابع مشخصه بازی استفاده نموده‌اند. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۶ از یک مدل برنامه‌ریزی غیر خطی با لحاظ کردن

⁴ Minimum Cost Remaining Savings

⁵ Separable Costs Remaining Benefits

⁶ Nucleolus

⁷ Grand Coalition

¹ Efficiency

² Equality

³ Stability

۲- روش تحقیق

۲-۱- ساختار فیزیکی مدل حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مدل توسعه داده شده شامل سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان و نیز دریاچه ارومیه بود که در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. این مدل در برگیرنده ۱۱۷ گره تقاضای آب کشاورزی، ۶ مخزن تأمین آب در حال بهره‌برداری و ۱۹ رودخانه اصلی است که منابع تغذیه دریاچه ارومیه هستند. بخشی از ساختار فیزیکی حوضه که در سمت شرقی دریاچه واقع شده و شامل گره‌های تقاضای آب کشاورزی، سد و رودخانه مهاباد است، در شکل ۲ نشان داده شده است.

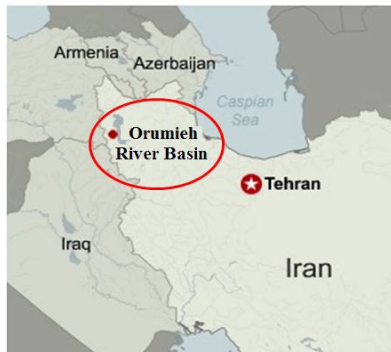
مخازن در حال بهره‌برداری به همراه جریان‌های میان حوضه‌ای^۱، تأمین‌کننده نیازهای کشاورزی، شهری، صنعتی و محیط زیستی بوده و فرض شده است که نیاز هر گره تقاضا توسط نزدیک‌ترین گره تأمین آب برآورده خواهد شد. علاوه بر این، دو لینک درون حوضه‌ای نیز در شبکه وجود دارد که هیچ کدام از استان آذربایجان غربی سرچشمه نمی‌گیرند. در واقع، یکی از لینک‌ها استان

قیود فیزیکی حوضه در مدل، برای پیشینه کردن سود اقتصادی خالص هر بازیکن در حوضه آبریز نیل استفاده شده است (۵ و ۶). همچنین مدنی در سال ۲۰۱۰ با به‌کارگیری یک سری از بازی‌های غیر همکارانه، دامنه کاربرد نظریه بازی در زمینه مدیریت منابع آب و حل مناقشات موجود در این بخش را مورد ارزیابی قرار داده است [۷].

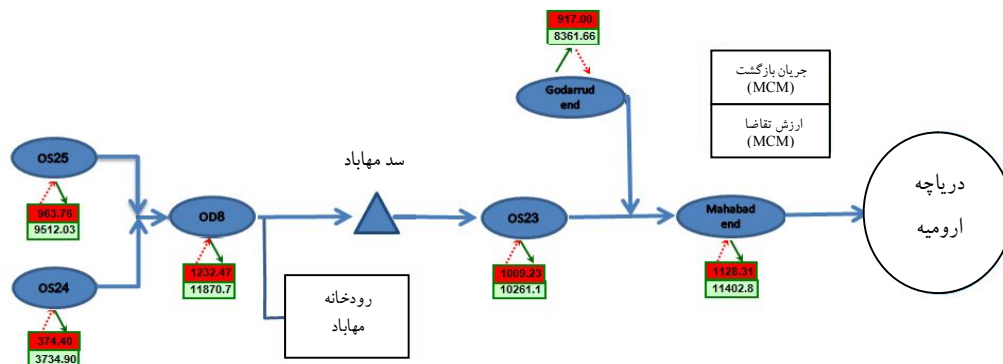
در این مطالعه، ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی^۱ برای محاسبه کل سود خالص حاصل از مصرف آب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه توسعه داده شد. سپس، بسته به نوع همکاری آب‌بران با یکدیگر، برخی قیود لازم به مدل اضافه شد تا بتوان عواید حاصل از آن نوع همکاری را محاسبه نمود. در نهایت نیز با به‌کارگیری همزمان مدل برنامه‌ریزی منابع آب با مفاهیم نظریه بازی‌های همکارانه، حالات مختلف همکاری بین ذینفعان مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار توانمند در اختیار مدیران بخش منابع آب قرار گیرد تا به‌کمک آن بتوانند تصمیمات مطمئن و پایدارتری را اتخاذ نمایند.

² Incremental Flows

¹ Orumieh River Basin Model (ORBM)



شکل ۱- حوضه آبریز دریاچه ارومیه



شکل ۲- یک شاخه از ساختار فیزیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

کردستان را به استان آذربایجان غربی و دیگری استان آذربایجان شرقی را به استان آذربایجان غربی متصل می‌کند. اهمیت و تأثیر وجود یک چنین لینک‌های درون حوضه‌ای در بخش بازی همکارانه تخصیص منابع آب و در چگونگی محاسبه مقدار توابع مشخصه برای ائتلاف‌های مختلف بین بازیکنان دیده خواهد شد.

۲-۲- ساختار ریاضی مدل حوضه آبریز دریاچه ارومیه

مدل حوضه آبریز دریاچه ارومیه، یک مدل بهینه‌سازی خطی است که با هدف بیشینه کردن سود اقتصادی خالص ناشی از مصرف آب در بخش کشاورزی سه استان مذکور در محیط نرم افزار لینگو^۱ توسعه داده شده است. در این مطالعه، با توجه به اینکه از میان سه بخش کشاورزی، صنعت و شهری، سهم بخش کشاورزی در مصرف منابع آب موجود در حوضه و همچنین بالا بردن سود کل سیستم نسبت به سایر بخش‌ها بسیار بیشتر است، تنها تأمین مصارف این بخش در نظر گرفته شد. بنابراین، منظور از سود خالص، کل سود حاصل از مصرف آب در بخش کشاورزی منهای هزینه‌های مربوط به تولید است. همچنین، بررسی مطالعات پیشین در این حوضه بیانگر این واقعیت است که تاکنون مدل جامعی برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود در آن ارائه نشده است. بنابراین مدل توسعه داده شده در این تحقیق، مدلی جامع از کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه و در برگیرنده کلیه نقاط تقاضای آب، مخازن تأمین آب و رودخانه‌های موجود در حوضه با در نظر گرفتن مقادیر آب برگشتی از هر یک از نقاط تقاضا و همچنین تلفات ناشی از تبخیر در مخازن موجود است. با توجه به مطالب مذکور، تابع هدف و قیود مدل پایه عبارت‌اند از

Maximize

$$TNB = \sum_{p=1}^{216} \sum_{i=1}^{117} Ag_{p,i} \times (Benefit_{p,i} - Cost_{p,i}) \quad (1)$$

Subject to

$$WA_i = \sum_j Inflow_{ji} + IncFlow_i + \sum_j RI_{ji} + \sum_j (Ag_{ji} \times ARC_{ji}) + Rres \quad (2)$$

$$0 \leq Ag_i \leq AgDem_i \quad (3)$$

$$Ag_i + EnvDem_i \leq WA_i \quad \forall i,j \quad (4)$$

که در آن

$Ag_{p,i}$ برابر با مقدار آب تخصیص یافته به هر گره تقاضا، $Benefit_{p,i}$ برابر با سود حاصل از مصرف آب در بخش کشاورزی، $cost_{p,i}$ برابر با کل هزینه تولید، WA_i برابر با مقدار آب در دسترس در هر گره تقاضای i ، $Inflow_{ji}$ برابر با مقدار آب ورودی به گره i از بالادست،

¹ Lingo

$IncFlow_i$ برابر با جریان میان حوضه‌ای، RI_{ji} برابر با آب خروجی از گره i که به گره j وارد می‌شود، ARC برابر با ضریب بازگشت جریان، $Rres$ برابر با مقدار آب خروجی از مخزن، $AgDem$ برابر با حداکثر نیاز آب کشاورزی، $EnvDem$ برابر با نیاز زیست محیطی پایین دست هر گره تقاضا و یا مخزن و p تعداد بازه‌های زمانی ماهانه است. در مدل توسعه داده شده، محاسبات به صورت ماهانه (۲۱۶ ماه) و در طول بازه زمانی سالهای ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵ انجام گرفته است. در این زمینه، کلیه ارقام مربوط به سود و هزینه حاصل از مصرف آب در بخش کشاورزی برای هر یک از بازه‌ها در سال ۱۳۸۰، از اطلاعات شرکت مهندسیں جاماب طبق گزارش سال ۱۳۸۴ استخراج شده است. همچنین، میزان مصرف آب هر محصول نیز مشخص و در نهایت به کمک این ارقام، میزان سود و یا هزینه مربوط به یک واحد آب مصرفی به دست آمده است. بنابراین، از حاصل ضرب تفاضل سود و هزینه در مقدار آب تخصیص یافته به هر بازه، سود اقتصادی خالص ناشی از مصرف آب در بخش کشاورزی آن بازه محاسبه شده است. با توجه به اینکه اطلاعات سود و هزینه در دسترس بر مبنای سال ۱۳۸۰ است، برای محاسبه این مقدار در هر سال از دوره برنامه‌ریزی (۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵) نرخ تورم نیز در نظر گرفته شده است. سایر پارامترهای ورودی مدل یعنی مقدار مربوط به جریان میان حوضه‌ای، نیاز کشاورزی و آب بازگشتی به آب سطحی از نتایج یک مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز دریاچه ارومیه که توسط محققان شرکت مهندسیں مشاور مهاب قدس توسعه داده شده، استخراج شده است. با در اختیار داشتن این مقدار، می‌توان ضریب بازگشت جریان را از حاصل تقسیم میزان آب بازگشتی بر میزان آب برداشتی برای مصرف به‌طور جداگانه در هر بازه به دست آورد. البته باید خاطر نشان کرد که پارامترهایی چون میزان سطح زیر کشت در طی زمان متغیر است اما در این تحقیق به دلیل محدودیت اطلاعات لازم، این مقدار در طول دوره برنامه‌ریزی ثابت در نظر گرفته شد.

در مورد نحوه محاسبه نیاز محیط‌زیستی پایین دست، در آن دسته از بازه‌هایی (زیر حوضه‌هایی) که نیاز آنها از مخازن بالادست تأمین نمی‌شود، تأمین نیاز محیط‌زیستی پایین دست آن بازه منوط به میزان تأمین نیاز آب کشاورزی آن است و در صورت وجود آب اضافی در آن بازه، نیاز محیط‌زیستی تا حد امکان برآورده خواهد شد. طبق مطالعات بخش محیط‌زیست شرکت مهندسیں مشاور مهاب قدس با مشاور مادر طرح جامع منابع آب کشور (مؤسسه تحقیقات)، برای دوره‌های زمانی تر، نسبت نیاز محیط‌زیستی رودخانه‌ها به متوسط آورد سالانه هر گره، برابر با ۰/۱ و این نسبت برای دوره‌های زمانی خشک برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

(۵)

$$Rl_t = \begin{cases} 0 & \text{if } Storage_t - EnvDem_t - AgDem_t - Loss_t \leq 0 \\ Storage_t - Loss_t - V_{min} & \text{if } 0 < Storage_t - EnvDem_t - AgDem_t - Loss_t \leq V_{min} \\ EnvDem_t + AgDem_t & \text{if } V_{min} < Storage_t - EnvDem_t - AgDem_t - Loss_t \leq V_{max} \\ Storage_t - Loss_t - V_{max} & \text{if } Storage_t - EnvDem_t - AgDem_t - Loss_t > V_{max} \end{cases}$$

عملکرد منحصر به فرد را برگزینند. وجود یک چنین شرایطی منشأ به وجود آمدن اختلاف و مناقشه بین ذینفعان بوده و به همین دلیل، ارائه یک روش کارا و پایدار تخصیص، ضروری به نظر می‌رسد. لذا هدف این بخش، تحلیل حالات مختلف همکاری بین طرف‌های درگیر با استفاده از مفاهیم نظریه بازی‌های همکارانه به‌عنوان یک ابزار توانمند در حل مناقشات است.

با توجه به وجود سه بازیکن در بازی تخصیص آب مورد بررسی در این تحقیق، تعداد کل ائتلاف‌های قابل تشکیل برابر با هفت بوده که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- انواع ائتلاف‌های قابل تشکیل بین بازیکنان

نام ائتلاف	نوع ائتلاف
منفرد	{کردستان}
منفرد	{آذربایجان غربی}
منفرد	{آذربایجان شرقی}
جزئی	{کردستان، آذربایجان غربی}
جزئی	{کردستان، آذربایجان شرقی}
جزئی	{آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی}
کامل	{آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان}

بعد از تعیین بازیکنان بازی و تشکیل کلیه ائتلاف‌های ممکن، نوبت به محاسبه مقدار تابع مشخصه برای هر یک از ائتلاف‌ها می‌رسد که برای این منظور از مدل برنامه‌ریزی منابع آب توسعه داده شده استفاده شد. البته باید توجه داشت که برای هر ائتلاف، شرایط و یا به عبارت بهتر قیود مدل متفاوت بوده و لازم است قیود لازم برای انطباق هر چه بیشتر مدل با شرایط خاص هر ائتلاف، به مدل اضافه و یا کم شود. بعد از محاسبه مقدار توابع مشخصه بازی می‌توان از روش‌های زیادی برای تخصیص سود یک ائتلاف به بازیکنان آن استفاده نمود. یکی از روش‌های متداول به‌منظور تعیین دامنه تخصیص‌های ممکن که تمامی بازیکنان حاضر به قبول آنها هستند، هسته^۲ است. در واقع هسته، مجموعه‌ای از تمامی تخصیص‌های قابل قبول برای بازیکنان به واسطه همکاری با یکدیگر است. بر اساس مفهوم هسته، هر یک از جواب‌های آن باید دو

در زمینه قیود مدل همچون معادلات پیوستگی، میزان آب در دسترس در هر گره برابر با جریان ورودی به آن گره است که برابر است با مجموع جریان رودخانه‌های منتهی به گره، جریان میان حوضه‌ای، مازاد جریانی که از بالادست به پایین دست انتقال می‌یابد، جریان برگشتی از مصرف آب در بالادست و در نهایت خروجی مخزن واقع در بالادست گره (در صورت وجود). حال بدیهی است که مجموع مقدار آب تخصیص یافته به بخش‌های کشاورزی و محیط‌زیستی نباید از میزان آب در دسترس در هر گره تجاوز کند. در مورد مخازن نیز، بهره‌برداری از آنها از قاعده بهره‌برداری استاندارد^۱ پیروی کرده که در رابطه ۵ و ۶ نشان داده شده است.

(۶)

$$Storage_{t+1} = Inflow_{t+1} + Storage_t - Rl_t - Loss_t$$

که در این روابط

Storage برابر با مقدار آب ذخیره موجود در مخزن، Loss برابر با مقدار تبخیر از مخزن، V_{min} برابر با حداقل مقدار آبی است که در مخزن باید نگهداری شود و V_{max} برابر با حداکثر ظرفیت مخزن است. منحنی‌های حجم-سطح-ارتفاع، مقدار میانگین درازمدت آبدهی، مقدار میانگین درازمدت ماهانه تبخیر ثبت شده (۱۳۸۵-۱۳۳۶). در محل سدهای در دست بهره‌برداری و همچنین مقدار میانگین درازمدت ماهانه و سالانه سری زمانی مصارف کشاورزی در هر یک از ۱۱۷ پیکره حوضه آبریز دریاچه ارومیه از اطلاعات شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس استخراج شد [۸].

۲-۳- بازی همکارانه تخصیص منابع آب

کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی منابع آب مانند مدل توسعه داده در این تحقیق که از روش‌های سنتی بهینه‌سازی برای تخصیص منابع محدود استفاده می‌کنند، بر این فرض استوار است که تمامی ذینفعان، حاضر به همکاری با یکدیگر هستند. اما در واقعیت، ممکن است این امکان برای هر یک از ذینفعان وجود داشته باشد که به‌منظور افزایش منفعت خود نوعی دیگر از همکاری مانند همکاری جزئی و یا

² Core

¹ Standard Operating Policy (SOP)

مقدار تخصیص داده شده به آن داشته باشد را، می‌توان به کمک شاخص‌های پایداری و به صورت کمی مورد ارزیابی قرار داد. یکی از روشهای سنجش این میزان نارضایتی، روش گاتلی^۴ است. در واقع به کمک این روش می‌توان شاخصی تحت عنوان شاخص «تمایل به عدم همکاری» را به صورت زیر تعریف نمود

$$d_i = \frac{\sum_{i \neq k} \varphi_k - v(N-i)}{\varphi_i - v(i)} \quad (15)$$

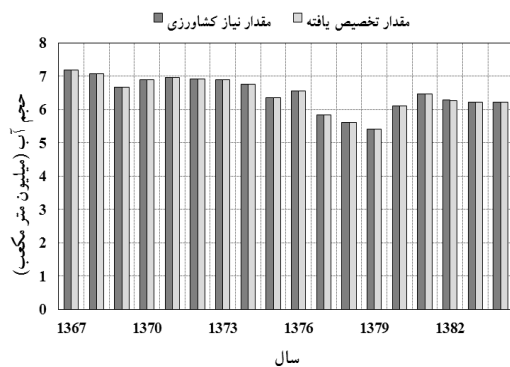
که در آن

d_i برابر با میزان تمایل به عدم همکاری بازیکن i و $v(N-i)$ برابر با مقدار تابع مشخصه ائتلاف کلی بدون بازیکن i است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل برنامه‌ریزی منابع آب

در ابتدا، مدل بهینه‌سازی تخصیص منابع آب توسعه داده شده برای هر استان به صورت جداگانه برای یک دوره ۱۸ ساله (سالهای ۱۳۶۷ تا ۱۳۸۵) با گام زمانی ماهانه اجرا شد و میزان آب تخصیص یافته به هر استان به دست آمد. این نتایج به همراه سری‌های زمانی نیاز آبی به صورت سالانه برای سه آب‌بر اصلی در شکل‌های ۳ تا ۸ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در این شکلها دیده می‌شود، تأمین نیازهای آبی استان کردستان به خصوص در بخش کشاورزی از وضع مطلوبی برخوردار است؛ در این میان، استان آذربایجان شرقی نسبت به سایر استان‌ها دارای کمترین میزان تأمین نیاز آبی به ویژه در بخش محیط‌زیستی است. همچنین، نسبت‌های میزان آب تخصیص یافته به میزان نیاز آبی آب‌بران، در نمودارها



شکل ۳- مقدار سالانه نیازهای آبی و آب تخصیصی کشاورزی استان کردستان

معیار اصلی را ارضا نمایند. معیار اول عقلانیت فردی^۱ است که بر اساس آن مقدار تخصیص یافته به هر بازیکن نباید از آن مقدار که بازیکن به تنهایی و بدون شرکت در هیچ ائتلافی کسب می‌کند، کمتر باشد. معیار دوم عقلانیت جمعی^۲ است که طبق آن مقدار تخصیص یافته به هر گروه از بازیکنان در نتیجه شرکت آنها در ائتلاف کلی نباید از آن مقدار که آنها بدون شرکت در ائتلاف کلی به دست می‌آورند، کمتر باشد. چنانچه x_i معرف مقدار تخصیص یافته به هر بازیکن i باشد، شروط بالا برای هسته بازی همکارانه تخصیص آب را می‌توان به صورت مجموعه روابط زیر نشان داد

$$X_K \geq v(K) \quad (7)$$

$$X_{WA} \geq v(WA) \quad (8)$$

$$X_{EA} \geq v(EA) \quad (9)$$

$$X_K + X_{EA} \geq v(K, EA) \quad (10)$$

$$X_K + X_{WA} \geq v(K, WA) \quad (11)$$

$$X_{EA} + X_{WA} \geq v(EA, WA) \quad (12)$$

$$X_{EA} + X_{WA} + X_K = v(K, EA, WA) \quad (13)$$

که v برابر با مقدار تابع مشخصه برای ائتلاف مورد نظر است.

در مرحله بعد، بازیکنان باید بر سر چگونگی تقسیم عواید حاصل از همکاری بین خود به توافق برسند. بدیهی است هر بازیکن حاضر به پذیرش مقداری کمتر از آنچه می‌توانست در صورت عدم همکاری و به صورت منحصر به فرد به دست آورد، نیست. در این زمینه روشهای متعددی برای تقسیم عواید بین بازیکنان یک ائتلاف وجود دارد که در این مطالعه از روش ارزش شاپلی^۳ استفاده شد. شاپلی در سال ۱۹۵۳، این روش را برای توزیع عواید یک ائتلاف بین بازیکنان آن بر مبنای سهم نسبی هر بازیکن در افزایش سود آن ائتلاف ارائه کرد. مقدار شاپلی برای هر بازیکن i را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد

$$\varphi_i = \frac{1}{n!} \sum_{i \in C} ((p-1)! \times (n-p)! \times [v(C) - v(C-i)]) \quad (14)$$

که در آن

φ_i برابر با ارزش شاپلی بازیکن i ، n برابر با تعداد کل بازیکنان، C معادل ائتلاف در بر دارنده بازیکن i ، p برابر با تعداد بازیکنان حاضر در ائتلاف C ، $v(C)$ مقدار تابع مشخصه ائتلاف C و $v(C-i)$ (برابر با مقدار تابع مشخصه ائتلاف C بدون بازیکن i است).

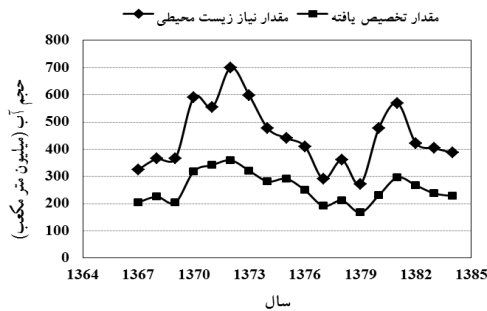
پس از تعیین مقدار تخصیص یافته به هر بازیکن، احتمال اینکه یک بازیکن متمایل به ترک ائتلاف کلی به دلیل عدم رضایت از

⁴ Gately

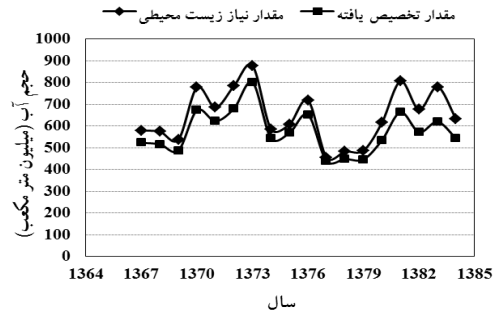
¹ Individual rationality

² Group rationality

³ Shapely Value



شکل ۸- مقدار سالانه نیازهای آبی و آب تخصیصی زیست محیطی استان آذربایجان شرقی



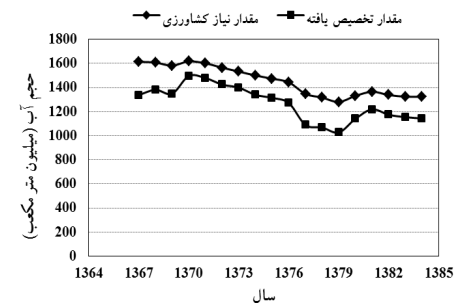
شکل ۴- مقدار سالانه نیازهای آبی و آب تخصیصی محیط زیستی استان کردستان

دارای روند نسبتاً یکسانی است. در ماههایی که آب کافی وجود دارد، غالباً نسبت آب تخصیصی به نیاز آبی برابر یا نزدیک به ۱۰۰ درصد است و درصدهای تأمین نیاز کمتر از ۱۰۰ در ماههای خشک یا ماههایی که آب کافی برای آبرسان اصلی حوضه وجود ندارد، رخ می‌دهد. مطابق نتایج تخصیص آب به سه استان آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان، میزان متوسط تأمین نیاز آبی هر یک از این استان‌ها در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول پیش بینی می‌شود که استان آذربایجان شرقی در جهت تأمین هر چه بیشتر نیازهای آبی خود، تمایل بیشتری برای همکاری با سایر استان‌ها و شرکت در ائتلاف کلی داشته باشد. صحت این مسئله در ادامه و به هنگام تحلیل نتایج حاصل از بازی همکارانه مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت.

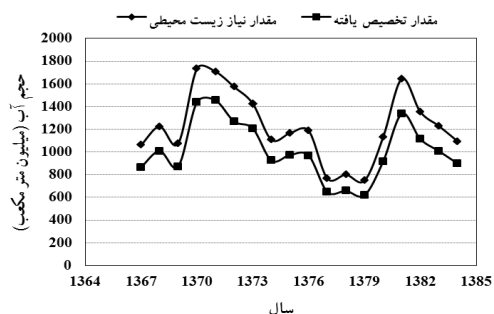
جدول ۲- متوسط تأمین نیاز آبی استان‌ها (درصد)

استان	متوسط تأمین نیاز کشاورزی	متوسط تأمین نیاز محیطی
کردستان	۹۹	۸۸
آذربایجان غربی	۸۷	۸۲
آذربایجان شرقی	۷۲	۵۸

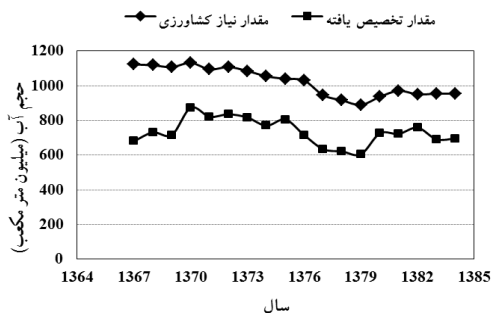
علاوه بر این، میزان آب ورودی به دریاچه ارومیه نیز از خروجی مدل استخراج شده که سری زمانی آن در شکل ۹ نشان داده شده است. طبق مطالعات انجام گرفته توسط سازمان محیط زیست کشور، متوسط نیاز سالانه دریاچه ارومیه برابر با ۳/۱ میلیارد متر مکعب است. حال همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، در صورت پیروی از الگوی تخصیص ارائه شده، نیاز آبی دریاچه ارومیه به خوبی تأمین شده و این موضوع می‌تواند تا حد زیادی نگرانی‌های موجود در زمینه خشک شدن دریاچه ارومیه را که طی سالیان اخیر به‌عنوان یک مناقشه جدی برای تصمیم‌گیرندگان بخش منابع آب مطرح بوده است، مرتفع سازد.



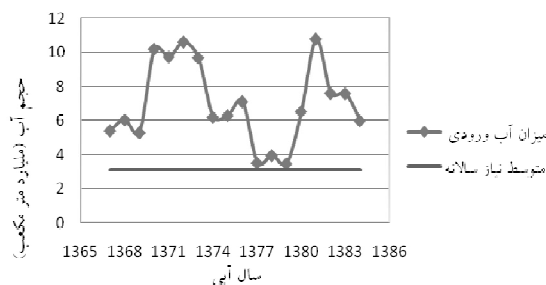
شکل ۵- مقدار سالانه نیازهای آبی و آب تخصیصی کشاورزی استان آذربایجان غربی



شکل ۶- مقدار سالانه نیازهای آبی و آب تخصیصی محیط زیستی استان آذربایجان غربی



شکل ۷- مقدار سالانه نیازهای آبی و آب تخصیصی کشاورزی استان آذربایجان شرقی



شکل ۹- سری زمانی حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه

۲-۳- نتایج بازی همکارانه تخصیص منابع آب

اولین قدم در تحلیل بازی همکارانه، محاسبه مقدار توابع مشخصه برای هر یک از هفت ائتلاف قابل تشکیل توسط بازیکنان است. از آنجا که در مدل مربوطه تمامی اجزای سیستم حوضه آبریز دریاچه ارومیه در نظر گرفته شده است، لذا مقدار تابع مشخصه برای ائتلاف کلی یا همان ائتلاف حاصل از همکاری هر سه بازیکن با یکدیگر، برابر با خروجی مدل خواهد بود. اما به منظور محاسبه مقدار توابع مشخصه برای شش ائتلاف باقیمانده، نیاز به اضافه کردن قیودی به مدل برای انطباق آن با شرایط هر ائتلاف است. بعد از اعمال اصلاحات فوق و اجرای مدل برنامه ریزی خطی برای هر یک از ائتلاف‌های هفت‌گانه به‌طور جداگانه، مقدار توابع مشخصه به‌دست آمده که در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- مقادیر توابع مشخصه برای ائتلاف‌های مختلف

نوع ائتلاف	مقدار تابع مشخصه (میلیون ریال)
{کردستان}	۱۱۹۸
{آذربایجان غربی}	۱۶۳۶۶۹
{آذربایجان شرقی}	۱۸۳۸۵۱
{کردستان، آذربایجان غربی}	۱۸۴۸۷۶
{کردستان، آذربایجان شرقی}	۱۸۹۶۲۸
{آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی}	۳۵۸۲۱۵
{آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان}	۳۷۹۴۳۸

همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، مقدار تابع مشخصه با تبدیل ائتلاف‌های منفرد به ائتلاف‌های جزئی و در نهایت ائتلاف کلی، افزایش یافته که این امر نشان دهنده اهمیت همکاری بازیکنان با یکدیگر در بالا بردن سود کل سیستم است.

برای مشاهده تمامی تخصیص‌های ممکن که هر بازیکن متمایل به پذیرش آنهاست، نمایش هسته به‌صورت شماتیک و با استفاده از مختصات گرانیگاهی^۱ می‌تواند مفید باشد. هسته توسط حداقل

مقداری که هر بازیکن متمایل به قبول و همچنین حداکثر مقداری که سایر بازیکنان، حاضر به دادن آن به بازیکن مربوطه می‌باشند، احاطه می‌شود. بنابراین هسته را می‌توان با توجه به حدود قابل محاسبه برای آن طبق روابط ۷ تا ۱۳ بر روی مثلث سیمپلکس^۲ مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داد.

در شکل ۱۰ ارتفاع کل سیمپلکس برابر با ۳۷۹۴۳۸ است که همان مقدار مربوط به تابع مشخصه ائتلاف کلی است. با دقت به هسته به‌دست آمده می‌توان به نتیجه جالبی دست یافت و آن اینکه دامنه آن دسته از تخصیص‌هایی که استان آذربایجان شرقی حاضر به پذیرش آنهاست، نسبت به دو استان دیگر کمتر است. علت این امر را می‌توان ارتباط کمتر این استان با دو استان دیگر دانست زیرا نه تنها این استان با استان کردستان مرز مشترکی ندارد، بلکه تشکیل ائتلاف با استان آذربایجان غربی نیز تأثیر چندانی در افزایش میزان تأمین نیازهای این استان ندارد.

بعد از تأیید وجود هسته برای بازی همکارانه تخصیص آب و شناسایی ائتلاف کلی به‌عنوان انتخاب مسلم همه بازیکنان، از روش ارزش شاپلی برای تقسیم سود این ائتلاف به بازیکنان آن استفاده می‌شود. مقدار ارزش شاپلی در کل دوره ۱۸ ساله برای هر یک از بازیکنان ائتلاف کلی محاسبه شد که مقدار آن در جدول ۴ آورده شده است.

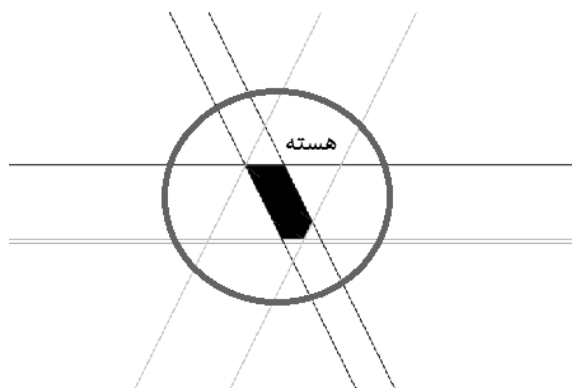
با توجه به جدول‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود که تحت شرایط عدم همکاری، منفعت استان کردستان از منابع آب موجود در حوضه برابر با ۱۱۹۸ است که در صورت پیوستن به ائتلاف کلی، این استان می‌تواند منفعت خود را تا مقدار ۱۱۹۷۱ افزایش دهد. این شرایط برای استان آذربایجان شرقی و غربی به مراتب بهتر است و هر یک می‌توانند به ترتیب منفعت خود را از مقدار ۱۸۳۸۵۱ به ۱۸۹۹۶۷ و از مقدار ۱۶۳۶۶۹ به میزان ۱۷۷۵۰۰ افزایش دهند. بنابراین با مقایسه مقدار به‌دست آمده از روش ارزش شاپلی با مقدار مربوط به حالت غیر همکارانه، می‌توان به اهمیت برقراری همکاری بین بازیکنان و تأثیر آن در بالا بردن سود تخصیصی به هر یک پی برد.

جدول ۴- مقدار ارزش شاپلی برای بازیکنان

بازیکنان	مقدار ارزش شاپلی (میلیون ریال)
{کردستان}	۱۱۹۷۱
{آذربایجان غربی}	۱۷۷۵۰۰
{آذربایجان شرقی}	۱۸۹۹۶۷

² Simplex

¹ Barycentric Coordinate

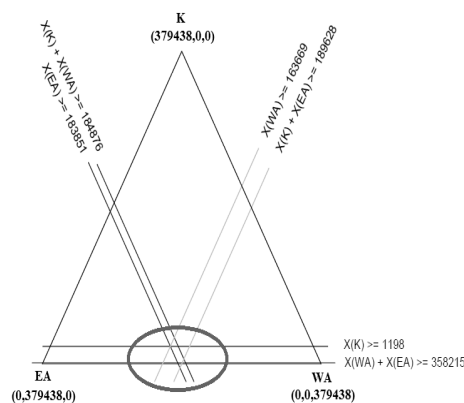


شکل ۱۱- شناسایی هسته بازی همکارانه تخصیص آب

ضرر تحمیلی به دیگران بیشتر خواهد بود. نکته قابل توجه دیگر در اینجا، بیشتر بودن مقدار شاخص برای استان آذربایجان غربی نسبت به سایر استان‌هاست که این موضوع از قبل نیز قابل پیش بینی بود؛ زیرا این استان سهم زیادی در بالا بردن سود کل سیستم دارد و در صورت ترک ائتلاف توسط آن، سایر بازیکنان شاهد کاهش چشمگیری در میزان منفعت حاصل از همکاری خواهند بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از یک مدل برنامه‌ریزی منابع آب به همراه مفاهیم نظریه بازی‌های همکارانه به منظور بررسی کلیه حالات ممکن همکاری بین ذینفعان مختلف استفاده شد. همچنین، حوضه آبریز دریاچه ارومیه به دلیل افزایش مناقشات موجود در زمینه تخصیص منابع آبی آن، بین آب‌بران مختلف در سالهای اخیر، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و ابزارهای نظریه بازی‌های همکارانه به منظور محاسبه سود اضافی ناشی از همکاری بازیکنان با یکدیگر به کار گرفته شد. در این زمینه، تحلیل هسته به منظور شناسایی دامنه آن دسته از تخصیص‌هایی که تمامی بازیکنان، متمایل به پذیرش آنها هستند، انجام پذیرفت. سپس، از روش ارزش شاپلی برای تخصیص عادلانه سود ائتلاف منتخب توسط بازیکنان بین یکدیگر استفاده شد. در نهایت، شاخص تمایل به عدم همکاری برای هر بازیکن محاسبه شد. نتایج حاصل نشان دهنده راضی بودن تمامی بازیکنان از روش تخصیص پیاده شده است و در نتیجه، این روش می‌تواند بستری موجه را برای همکاری بازیکنان با یکدیگر فراهم آورد. در نهایت می‌توان گفت که نتایج این تحقیق حاکی از این واقعیت بود که نظریه بازی‌های همکارانه می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد به همراه یک مدل جامع مدیریت منابع آب برای ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه به کار گرفته شود.



شکل ۱۰- رسم حدود هسته برای بازی همکارانه

به منظور ارزیابی میزان پایداری تخصیص‌های انجام شده از روش گاتلی استفاده شد. طبق این روش، شاخصی به نام «شاخص تمایل به ترک ائتلاف یا عدم همکاری» تعریف می‌شود که از آن برای سنجش توانایی یک بازیکن برای ضرر زدن به سایر بازیکنان در صورت ترک ائتلاف استفاده می‌شود. در واقع این شاخص به مقایسه میزان خسارت وارده به یک بازیکن در صورت ترک ائتلاف به خسارت وارده به سایر بازیکنان حاضر در آن ائتلاف می‌پردازد. چنانچه مقدار این شاخص برای یک بازیکن نسبت به سایر بازیکنان بالاتر باشد، میزان تمایل آن بازیکن برای ترک ائتلاف در مقایسه با سایر بازیکنان بیشتر خواهد بود و در نتیجه باید مقدار تخصیص یافته به آن بازیکن به گونه‌ای اصلاح شود که احتمال ترک ائتلاف توسط آن به حداقل برسد. مقدار این شاخص برای هر سه بازیکن و تحت شرایط تخصیص به روش ارزش شاپلی و به کمک رابطه ۱۵ و همچنین مقدار جدولهای ۳ و ۴ محاسبه شد که در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- مقدار شاخص گاتلی برای بازیکنان

بازیکنان	روش ارزش شاپلی
کردستان	۰/۸۶
آذربایجان غربی	۱/۲۳
آذربایجان شرقی	-۰/۰۳

با توجه به مقدار شاخص گاتلی و همچنین مقدار جدولهای ۳ و ۴، دیده می‌شود که با افزایش مقدار تخصیص به یک بازیکن، مقدار شاخص کاهش یافته و بازیکن انگیزه کافی برای شرکت در ائتلاف دارد. این مسئله به خصوص از این جهت دارای اهمیت است که اکثر مقدارهای به دست آمده برای شاخص، مقداری کوچک‌تر و یا نزدیک به یک است و این بدان معناست که در صورت ترک ائتلاف توسط بازیکن، ضرری که متوجه خود بازیکن می‌شود از

1. Just, R., and Netanyahu, S. (1998). "International water resource conflicts : Experience and potential." Just, R., and Netanyahu, S. (Eds.) *Conflict and cooperation on trans-boundary water resources*, Kluwer Academic Pub., pp. 1-26.
2. Rogers, P. (1969). "A game theory approach to the problems of international river basins." *Water Resources Research*, 5 (4), 749-760.
3. Heaney, J.P., and Dickinson, R.E. (1982). "Methods for apportioning the cost of a water resource project." *Water Resources Research*, 18(3), 476-482.
4. Lejano, R.P., and Davos, C.A. (1995). "Cost allocation of multiagency water resource projects: Game-theoretic approaches and case study." *Water Resources Research*, 31, 1387-1393.
5. Wu, X. (2000). "Game-theoretical approaches to water conflicts in international river basin: A case study of the Nile basin." M.Sc. Thesis, Dept of Public Policy, University of North Carolina, Chapel Hill.
6. Wu, X., and Whittington, D. (2006). "Incentive compatibility and conflict resolution in international river basins: A case study of the Nile Basin." *Water Resources Research*, 42 (2), doi: 10. 1029/2005, W02417.
7. Madani, K. (2010). "Game theory and water resources." *J. of Hydrology*, 381, 225-238.
8. Mahab Ghods Consulting Eng. Co. (2012). <www.mahabghods.com> (May 2012).