

امکان سنجی مدیریت همکارانه منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن خسارات محیط زیستی با استفاده از روش بهینه سازی جامعه مورچه ها

داود محمودزاده^۱، حامد کتابچی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس

h.ketabchi@modares.ac.ir*

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۷/۰۵]

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۳/۰۶]

چکیده

در دهه های اخیر تقاضا برای آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک افزایش یافته است و باعث افزایش بهره برداری از این منابع شده است. منابع آب زیرزمینی از منابع مهم تأمین آب برای مصارف در بخش های مختلف از جمله شرب، صنعت و کشاورزی است. امروزه استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، فشارهای وارد شده بر این منابع را افزایش داده و پیامدهای محیط زیستی جبران ناپذیری را سبب شده است. در این مطالعه از یک مدل نظریه بازی همکارانه برای بررسی چگونگی همکاری میان بهره برداران از منابع آب زیرزمینی با هدف مطالعه خسارت محیط زیستی و سود ذینفعان استفاده شده است. مدل استفاده شده در این مطالعه برای بررسی یک مسئله کنترل بهینه شامل مباحث اقتصادی، محیط زیستی، کشاورزی و متغیرهای هیدرولوژیکی توسعه داده شده است. برای تعریف و حل مسئله شبیه سازی- بهینه سازی به صورت منعطف تر در این مطالعه، از روش بهینه سازی جامعه مورچه ها استفاده شده که امکان تمرکز بر گستره متنوع تری از اهداف و قیود را فراهم می نماید. نتایج نشان می دهد که چگونه برداشت های بی رویه و کنترل نشده در هر آبخوان روی سایر ذینفعان از منابع آب زیرزمینی که در مجاورت آن آبخوان قرار گرفته اند، تأثیر می گذارد. همچنین، اثرگذاری روی اکوسیستم های آبی نیز بررسی شده و نتایج آن به صورت خسارت محیط زیستی ارائه شده است. نتایج مطالعه نشان می دهد که در حالت تشکیل ائتلاف و همکاری مؤثر میان ذینفعان در نواحی مختلف و در نظر گیری پیامدهای محیط زیستی، خسارات محیط زیستی نسبت به شرایط وضع موجود کاهش می یابد.

واژگان کلیدی: مدیریت آب زیرزمینی، رویکرد همکارانه، شبیه سازی- بهینه سازی، پیامدهای محیط زیستی، نظریه بازی.

۱- مقدمه

جمله شرب، کشاورزی و صنعت است. امروزه فشارهای وارد شده بر این منابع افزایش یافته و پیامدهای محیط زیستی جبران ناپذیری در پی داشته است. در سال های اخیر، رشد

منابع آب زیرزمینی یکی از منابع آبی مشترک و محدود، از منابع مهم تأمین آب برای استفاده در بخش های مختلف از

این حوزه استفاده نمود. در بیشتر کارهای پیشین از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک مانند برنامه‌ریزی خطی استفاده شده و معدود مطالعاتی مانند مراجع [5, 22] از روش‌های نوین فراکاوشی مانند الگوریتم ژنتیک برای اهداف بهینه‌سازی بهره‌جسته‌اند.

در این مطالعه رویکرد نظریه بازی‌های همکارانه برای مدیریت منابع آب زیرزمینی در یک نمونه واقعی بکارگرفته شده است. همچنین از ابزار بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها^۳ برای اولین بار در کنار مفاهیم نظریه بازی‌ها برای یافتن جواب‌های بهینه مسأله مدیریتی مورد نظر و بررسی تأثیر چگونگی همکاری‌ها و ارزش هر یک از همکاری‌های شکل گرفته در مدیریت مناسب منابع آب زیرزمینی استفاده شده است. این ابزار امکان استفاده منعطف‌تر از روش بهینه‌سازی و نیز پرداختن به گستره وسیع‌تری از اهداف و قیود را فراهم می‌نماید. نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان یک ابزار مفید در اختیار مدیران قرار گیرد تا به کمک آن بتواند تصمیمات مناسب و مطمئنی را اتخاذ نمایند.

۲- روش مطالعه

ساختار مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در شکل (۱) ارائه شده است [6]. ویژگی‌های اصلی این مطالعه استفاده از روش بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها برای منعطف‌تر شدن مدل و پوشش دادن به گستره وسیع‌تری از توابع هدف و قیود و همچنین استفاده از مفاهیم نظریه بازی‌ها برای بررسی تأثیر چگونگی همکاری‌ها و ارزش آنها در مدیریت منابع آب زیرزمینی است.

ابزار بهینه‌سازی استفاده شده در این مطالعه با فراخوانی برنامه شبیه‌سازی و با در نظر گرفتن قیود مسأله و ارزیابی جواب توابع هدف مسئله که رویکردهای همکارانه را در بر دارد، در نهایت جواب بهینه را در هر مرحله انتخاب می‌نماید و سپس تحلیل‌های مربوط به نظریه بازی‌ها از جمله میزان پایداری ائتلاف‌ها انجام می‌شود. در ادامه اجزای اصلی این روند معرفی می‌شود.

روزافزون جمعیت و توسعه اقتصادی، منجر به افزایش تقاضا برای این منابع محدود شده است و مدیریت آنها را با مناقشات جدی مواجه کرده است. علاوه بر این، منابع آب مشترک که توسط دو یا چند آب بر تقسیم شده و به مصرف می‌رسند، باعث تشدید پیچیدگی در مدیریت منابع آب شده است [2,1].

رویکردهای مختلفی برای تحلیل و ارائه راه‌حل‌های علمی برای کنترل و مدیریت استفاده بیش از حد از منابع مشترک^۱ (از جمله منابع آب زیرزمینی) وجود دارد. یک رویکرد، ایجاد نهادها و سازمان‌هایی است که با ایجاد انگیزه برای مصرف‌کنندگان تلاش می‌نمایند تا با همکاری^۲ یکدیگر، موجب حفظ منابع مشترک شوند. از اواخر سال ۱۹۹۰، مطالعاتی با بکارگیری نظریه بازی به جهت بررسی امکان‌سنجی همکاری در استفاده از منابع مشترک انجام شده است [3]. نظریه بازی‌های همکارانه یکی از روش‌های موفق برای حل مناقشات در زمینه استفاده از منابع مشترک است. این نظریه، ابزاری است که به کمک آن می‌توان تعیین نمود که آیا در عمل، امکان برقراری نوعی همکاری بین بهره‌برداران مختلف وجود دارد و در صورت امکان همکاری، ارزش همکاری و بررسی پایداری آن نسبت به حالت عدم همکاری به چه صورت خواهد بود. همچنین با استفاده از یک سری روش‌های مبتنی بر این نظریه، می‌توان به تخصیص عواید حاصل از همکاری بین بهره‌برداران مختلف پرداخت [4,1]. در جدول (۱) خلاصه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از نظریه بازی‌ها در بخش منابع آب ارائه شده و به اهداف مورد نظر و نیز منطقه مطالعه شده پرداخته شده است. نگاهی به مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد نظریه بازی‌ها در حوزه منابع آب زیرزمینی در مطالعات اندکی شده است. با توجه به اهمیت این منابع آبی محدود و مشترک، می‌توان از این رویکرد برای بررسی چگونگی ایجاد بازی‌های همکارانه برای مدیریت مناسب این منابع، تأثیرگذاری این همکاری‌ها و عدم در نظر گرفتن همکاری‌ها و همچنین برآورد ارزش و پایداری همکاری‌ها در

1 Common-pool resource

2 Cooperation

3 Continuous ant colony optimization

جدول ۱. خلاصه‌ای بر مطالعات انجام شده در زمینه استفاده از رویکرد نظریه بازی‌ها در بخش منابع آب

References	Objective	Application
Rogers [7]	Application of game theory approach to investigate a range of strategies for cooperation between the two riparian nations	Ganges River, Pakistan and India
Heaney and Dickinson [8]	Application of cooperative N-person game theory for cost allocation in the water resources field	-
Lejano and Davos [9]	Cooperative N -person game theory for cost allocations and the normalized nucleolus application to a water reuse project	Southern California, USA
Wu and Whittington [10]	Application of cooperative game theory concepts (core nucleolus, and Shapley value) to Nile water conflicts	Nile Basin, Egypt
Loaiciga [11]	Application of cooperative and non-cooperation game to achieve more profits from using groundwater resources in a coastal area	-
Yang et al. [12]	Development of two-person game-theory based model for water resources management in the trans-boundary regions	Guanting reservoir basin, China
Niksokhan et al. [13]	Application of cooperative game and Shapley value to reallocate the market benefits and establish a sustainable market	Zarjub River, Iran
Sadegh te al. [14]	Development of a new methodology based on crisp and fuzzy Shapley games for optimal allocation of inter-basin water resources	Karun River and southern Rafsanjan plains, Iran
Madani [15]	Application of game theory for water resources management and conflict resolution	-
Mahjouri and Ardestani [16]	Development of cooperative and noncooperative methodologies for a large-scale water allocation problem	Karun and Dez river, Iran
Madani and Dinar [17]	Application of various types of non-cooperative institutions for manage common pool resources	-
Madani and Dinar [18]	Application of several commonly cooperative game theoretic solution concepts for sustainable common pool resource management	-
Abed-Elmdoust and Kerachian [19]	Application of fuzzy cooperative game to model equitable and efficient water allocation among water users	Sooleghan River, sooleghan Reservoir, Iran
Esteban and Dinar [3]	Using cooperative game theory model for achieve a better management of groundwater in the presence of environmental externalities	Eastern la Mancha aquifers in Spain
Jafarzadegan et al. [20]	Using a new solution concept, fuzzy variable least core solution, for water and benefit allocation to water users considering the uncertainties	Karun River and Rafsanjan basin, Iran
Jafarzadegan et al. [21]	Cooperative game application to determine the final water allocation policies and reallocate the total benefit to stakeholders	Karun River and Rafsanjan plain, Iran
Parsapour-Moghaddam et al. [5]	Presentation of a methodology based on evolutionary game theory for simultaneously determining both continuous conjunctive surface and groundwater use policies	Rafsanjan plain, Iran
Malekpour et al. [22]	Evolutionary game theory and genetic algorithm to create a model of river quality management	-
Sobuhi and Mojarad [23]	Application of conflict resolution methods for groundwater resources management	Atrak basin, Iran
Salehi et al. [24]	Application of four conflicts resolution methods for determined optimum amount of groundwater extraction	Taybad plain, Iran
Poursiyahi and Kerachian [25]	Cooperative game theory application for water allocation in common rivers	Karun River, Iran
Danesh-Yazdi et al. [1]	Game theory approach application to allocate the water resources among riparian parties regarding principles of equity, efficiency and sustainability.	Urmia Lake, Iran
Zarezadeh et al. [26]	Assessment on a new approach in the water-related interactions between Iran and Afghanistan using the sequential and issue linkage methods of game theory	Hirmand basin, Iran and Afghanistan
Safari et al. [27]	The concept of cooperative game and Shapley value is utilized for reallocate the market benefits	Balkhaly-chay basin, Iran

Table 1. Summary of some studies of game theory approach in water resources field

شکل ۱. ساختار مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی $\tau(x)$ تابع توزیع نرمال، x_{best} بهترین جواب حاصل در تکرار قبلی، σ تابع انحراف معیار وزنی، Pop تعداد جمعیت مورچه‌ها، x_i متغیر تصمیم‌گیری منتخب توسط مورچه i ام (جواب)، f_i مقدار تابع هدف برای جواب، x_{opt} بهترین متغیر تصمیم‌گیری و f_{opt} بهترین مقدار تابع هدف {

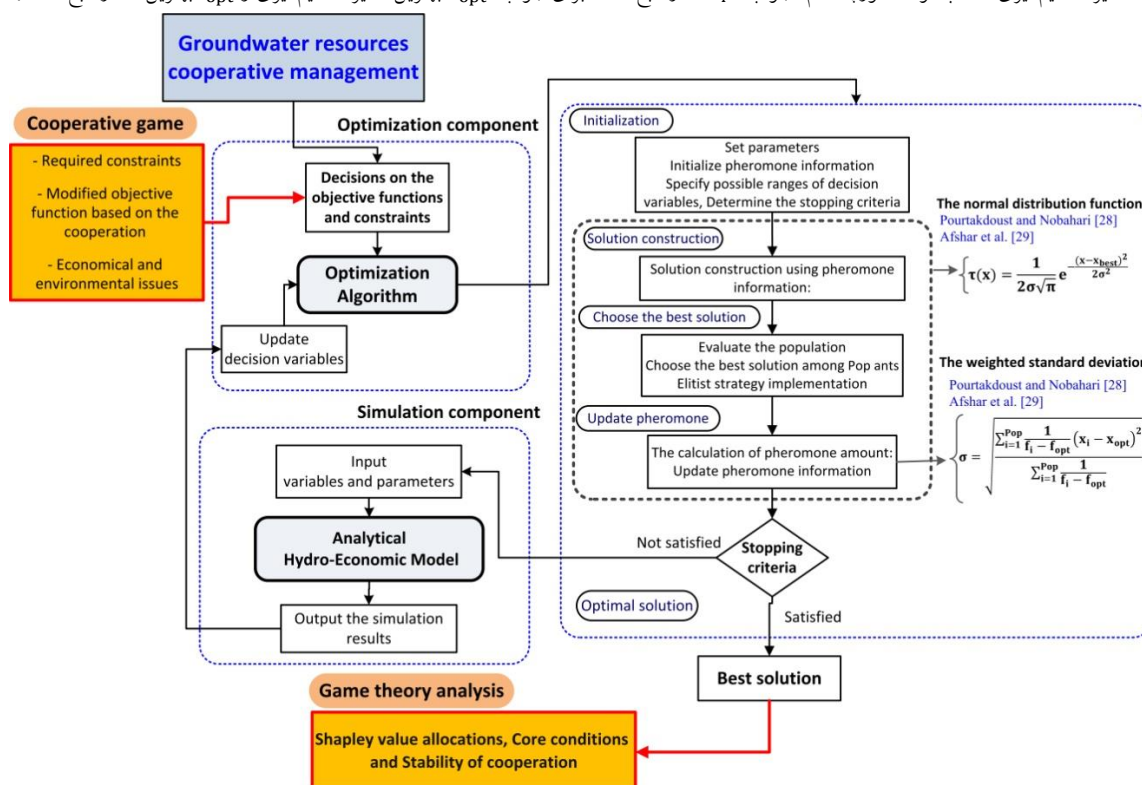


Fig. 1. Simulation - Optimization Model Framework { $\tau(x)$ is the normal distribution function, x_{best} is the best solution in the previous generation, σ is the weighted standard deviation, Pop is the number of ants, x_i is the decision variable selected by ant i solution, f_i is the objective function value for solution, x_{opt} is the best decision variable, and f_{opt} is the best objective function value}

$$1a_i^j(t).t] = \sum_i b_i \cdot ha_i^j(t) \quad (1)$$

در این رابطه $B^j[ha_i^j(t).t]$ تابع درآمد و b_i درآمد محصول در هر هکتار است.

تابع هزینه به صورت سالیانه در هر آبخوان، شامل هزینه برداشت آب و هزینه ثابت در هر هکتار است که به صورت رابطه (۲) نشان داده شده است.

$$C^j[ha_i^j(t).H^j(t).t] = C_0 \cdot \sum_i ha_i^j(t) + C_1 \cdot (SL - H^j(t)) \cdot \sum_i ha_i^j(t) \cdot w_i \quad (2)$$

در این رابطه C_0 هزینه ثابت پمپاژ در هر هکتار است که در مساحت آبیاری شده ضرب می‌شود، C_1 ضریب هزینه پمپاژ آب است. این مقدار به ارتفاع پمپاژ و کل آب پمپاژ شده برای آبیاری ضرب می‌شود. ارتفاع پمپاژ برابر اختلاف بین تراز سفره آب زیرزمینی و تراز سطح زمین است. سود ناخالص سالیانه، اختلاف بین درآمد سالیانه و هزینه برداشت آب

۲-۱- مدل شبیه‌سازی

مدل شبیه‌سازی مدنظر در این مطالعه، مدلی تحلیلی با ساختار ریاضی هیدرواقتصادی است. در این مدل، تابع تقاضای بهره‌بردار (کشاورز) به دسترسی به زمین برای کشت و درآمد به دست آمده از زمین به ازای هر محصول بستگی دارد [2]. هر محصول دارای مشخصات مربوط به آب مورد نیاز، w_i ، و درآمد حاصل به ازای سطح کشت، b_i ، است. اندیس i شمارنده محصول‌های مدنظر است. در این مدل، کشاورز تصمیم می‌گیرد که چه مقدار از زمین خود را برای محصول‌های مدنظر خود اختصاص دهد. در این حالت میزان مصرف آب زیرزمینی نیز تعیین می‌شود. $ha_i^j(t)$ به صورت سطح کشت شده بر حسب هکتار بر سال به ازای واحد کشت محصول مورد نظر i تعریف می‌شود که اندیس j بیانگر بازیگرهای مختلف یعنی $j = 1, \dots, n$ است.

درآمد ناخالص سالیانه کشاورز از حاصل ضرب درآمد حاصل از سطح زیر کشت هر هکتار در سطح هکتار بدست می‌آید که به صورت رابطه (۱) بیان شده است:

(تفاضل روابط ۱ و ۲) است.

خسارت وارد شده بر اکوسیستم به دلیل افت سطح آب زیرزمینی و تغییر رژیم جریان طبیعی آب است. این خسارت را می توان با توابع مختلفی بیان نمود. در این مطالعه بر اساس مطالعه مرجع [3]، خسارت وارد شده به صورت تابع خطی از کاهش ارتفاع سطح سفره آب زیرزمینی است که می تواند به صورت کاهش حجم آب آبخوان بیان شود. در رابطه (۳)، $D^j[H^j(t), t]$ تابع خسارت را نشان می دهد که β نیز ارزش آب برای اکوسیستم است. از جمله رویکردهای استفاده شده برای تعیین β ، برآورد ارزش اقتصادی پیکره های آبی متأثر از افت آب های زیرزمینی از جمله تالاب های واقع در محدوده مطالعاتی هستند. خسارت محیط زیستی به صورت زیر بیان شده است.

$$D^j[H^j(t), t] = \beta \cdot [SL^j - H^j(t)] \quad (3)$$

خسارت برداشت بی رویه آب از آبخوان به صورت خسارتی است که هر کشاورز در هر آبخوان می تواند به آبخوان های مجاور خود وارد نماید. به عبارت دیگر فعالیت کشاورزان در هر آبخوان z موجب کاهش سطح آب در این ناحیه می شود و این امر هزینه ای را به آبخوان های مجاور $z - 1$ و $z + 1$ وارد می کند. خسارت ناشی از این فعالیت به صورت رابطه (۴) است [3].

$$E^j[H^j(t), ha_i^j(t), t] = [C_1 \cdot (SL^j - H^j(t)) \cdot \sum_i ha_i^j(t) \cdot w_i] \cdot \sigma^j \quad (4)$$

در رابطه فوق σ^j برابر است با $(\sum_i ha_i^j \cdot w_i) / V^j$ که در واقع بیانگر کل آب مصرفی در آبخوان z بر کل حجم آبخوان z است.

تابع هدف مسئله کشاورزان به صورت رابطه (۵) بیان می شود که بر مبنای برآورد سود است.

$$\begin{aligned} \text{Max} \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r)^t} \cdot [& B^j[ha^j(t), t] \\ & - C^j[ha_i^j(t), H^j(t), t] \\ & - D^j[H^j(t), t] \\ & - E^j[H^j(t), ha_i^j(t), t]] \end{aligned} \quad (5)$$

در این رابطه، r نرخ بهره در دوره برنامه ریزی است. مؤلفه D^j

در این تابع برای در نظر گرفتن پیامدهای محیط زیستی در آبخوان z است. همچنین مؤلفه E^j به پیامدهای ناشی از برداشت آب از آبخوان z به آبخوان های مجاور اشاره دارد. این دو مؤلفه بر اساس نوع مسائلی که در ادامه بررسی می شود و در حالات مختلف همکاری، به تناسب در تابع هدف در نظر گرفته می شوند.

قیود مورد نظر در این مسأله هم در رابطه (۶) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \dot{H}^j = & \sum_k \left[\frac{W_{kj} \cdot T_{kj}}{L_{kj}} \times (H^k(t) - H^j(t)) \right] + R^j \\ & \frac{+(\alpha - 1) \cdot \sum_i ha_i^j \cdot w_i}{AS^j} \end{aligned} \quad (6)$$

$$H^j(0) = H_0^j$$

$$0 \leq ha_i^j \leq AR_i^j$$

در این رابطه، $\dot{H}^j$ تغییر در سطح سفره آب با گذشت زمان است که برابر است با $\dot{H}^j = H^j(t+1) - H^j(t)$. W_{kj} طول مرز مشترک زیرآبخوان z با زیرآبخوان مجاور k ، T_{kj} ضریب قابلیت انتقال بین زیرآبخوان z و زیرآبخوان مجاور k ، L_{kj} فاصله متوسط بین مرکز زیرآبخوان z و زیرآبخوان مجاور k است. k شمارنده زیرآبخوان های مجاور با زیرآبخوان z و $H^k(t)$ نیز سطح سفره آب زیرزمینی در زیرآبخوان k است. در این رابطه، مرزهای آبخوان، نفوذناپذیر فرض شده است. همچنین در رابطه (۶)، R^j تغذیه خالص آبخوان، α ضریب آب برگشتی به آبخوان، AS^j حاصل ضرب مساحت آبخوان در ضریب ذخیره آن، H_0^j سطح سفره آب زیرزمینی در ابتدای دوره برنامه ریزی و AR_i^j برابر کل سطح موجود برای کشت محصول i در آبخوان z است.

۲-۲- مدل بهینه سازی

روش های بهینه سازی امروزه در بسیاری از شاخه های علوم مهندسی برای اتخاذ تصمیم های علمی صحیح، به کار می روند. ابزارهای بهینه سازی یکی از اصلی ترین اجزای مدل های تصمیم گیری هستند و به فرآیند یافتن بهترین جواب

حالات مختلف دیگر تعریف شود. تابع سود هر بازیگر بصورت تلاش بازیگر برای بیشینه یا کمینه کردن درآمد یا هزینه خود تعریف می‌شود. این هدف می‌تواند با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی و سایر پارامترهای مهم برای حل مسئله، مدنظر قرار گیرد.

یکی از روش‌های معمول برای تعیین دامنه تخصیص عواید حاصل از همکاری که تمامی بازیگرها حاضر به قبول آنها هستند، هسته است. بر اساس مفهوم هسته، هر یک از جواب‌های آن باید دو معیار عقلانیت فردی² و عقلانیت جمعی³ را ارضاء نمایند. در معیار اول، مقدار تخصیص عواید حاصل از همکاری به هر بازیگر، نباید از آن مقدار که بازیگر به تنهایی و بدون شرکت در هیچ ائتلافی کسب می‌کند، کمتر باشد. در معیار دوم نیز مقدار تخصیص یافته به هر یک از بازیگرها در نتیجه شرکت آنها در ائتلاف کلی نباید از آن مقدار که آنها بدون شرکت در ائتلاف کلی به دست می‌آورند، کمتر باشد [1].

تعریف مجموعه هسته به این صورت است که، بردار X بردار سهم بازیگران از ارزش ائتلاف C ، متعلق به مجموعه هسته در یک بازی همکارانه است. به ازای هر ائتلاف C که زیرمجموعه بازیگران J است [35]:

$$\sum_{j \in C} X_j \geq v(C) \quad (7)$$

در این رابطه، $v(C)$ مقدار تابع مشخصه ائتلاف C است. برای بررسی قرارگیری در هسته، تقسیم سود حاصل از همکاری بین بازیگرها باید محاسبه شود که در این مطالعه از روش ارزش شاپلی استفاده شده است. این روش که در مرجع [36] ارائه شده است، برای توزیع سود یک ائتلاف بین بازیگرهای آن، بر مبنای سهم نسبی هر بازیگر در افزایش سود آن ائتلاف است. مقدار شاپلی برای هر بازیگر را می‌توان از رابطه (۸) بدست آورد.

$$\phi_j = \frac{\sum_{i \in C} ((P-1)! \cdot (n-p)!)}{n! \cdot [v(C) - v(C-j)]} \quad (8)$$

که در رابطه فوق ϕ_j برابر با ارزش شاپلی بازیگر j ، n

از میان مجموعه‌ای از جواب‌های ممکن به منظور حصول مطلوب‌ترین تصمیم‌گیری کمک می‌نمایند [30]. در مسائل مدیریت آب‌های زیرزمینی، بهینه‌سازی به معنای یافتن بهترین جواب نیست. برای اینکه در پاره‌ای از موارد به دلیل عدم قطعیت موجود در چنین مسائلی و ساده‌سازی و مفهوم‌سازی‌های اعمال شده در مسائل واقعی، دستیابی به بهترین جواب، مقدور نیست [31].

در دهه‌های اخیر، به الگوریتم‌های فراکاوشی¹ با درجات مختلفی از پیچیدگی برای حل مسائل بهینه‌سازی در حوزه منابع آب‌های زیرزمینی و به ویژه مدیریت این منابع در آبخوان‌های زیرزمینی توجه شده‌اند [6, 32, 33]. بر اساس مطالعات انجام شده توسط مرجع [6] روش بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها یکی از موفق‌ترین روش‌های بهینه‌سازی در حوزه مدیریت بهینه آبخوان‌های زیرزمینی است که در این مطالعه نیز به عنوان ابزار بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این روش در ابتدا برای مسائل گسسته ارائه شد سپس توسط پژوهشگرانی مانند مرجع [22] به کاربردهای در فضای پیوسته هم تعمیم پیدا کرد. چگونگی بکارگیری این مدل بهینه‌سازی و استفاده آن در حل بازی‌های همکارانه در شکل (۱) ارائه شده و روابط استفاده شده در الگوریتم این روش برای تولید جواب، بروزرسانی قوانین جستجوی جواب‌ها و همگرایی به سوی جواب بهینه معرفی شده است. جزئیات بیشتر در مورد این روش، در مراجع [6, 32, 33, 34] آمده است.

۳-۲- اجزا و قواعد بازی همکارانه

در بکارگیری از مفاهیم نظریه بازی‌ها، سه بخش اصلی از بازی (بازیگرها، استراتژی و تابع سود) باید تعیین شود. بازیگرها در استفاده از یک منبع مشترک، با فعالیت‌های خود موجب تغییر در میزان بهره‌برداری از منابع مشترک و تأثیر بر پیامدهای محیط‌زیستی وارد در محدوده می‌گردند. استراتژی یا عمل بازیگرها می‌تواند به صورت انفرادی یا به صورت همکارانه با تشکیل ائتلاف دو عضوی، سه عضوی و یا

2 Individual rationality

3 Group rationality

1 Evolutionary algorithms

شکل (۲) تا بتوان تأثیر چگونگی همکاری‌ها و عدم همکاری‌ها را در مدیریت منابع آب زیرزمینی بررسی کرد.

شکل ۲. آبخوان لمانچا و محدوده مطالعه، سه زیرآبخوان اصلی، ND، CD و SD (برگرفته و اصلاح شده از [3])



Fig. 2. La Mancha Aquifer and the study area, three sub-aquifers ND, CD, and SD (Adapted and modified from [3])

مبنای تعریف سه زیرآبخوان در شکل (۲)، در مرجع [3] به تفصیل آمده است که بر مبنای شاخص‌های مختلفی مانند شرایط اقلیمی، چگونگی مدیریت منابع مشترک، ارتباط هیدرولیکی سطحی و زیرزمینی است. همچنین ارزش همکاری‌ها در صورت تشکیل ائتلاف، پایداری آن و در هسته بودن آن بررسی خواهد شد. مشخصه‌های سه زیرآبخوان ND، CD و SD به همراه تعدادی از اطلاعات لازم مانند دوره برنامه زمانی مدیریتی و ارزش آب برای اکوسیستم (برآورده شده بر اساس ارزش اقتصادی تالاب تابلاس دایمیل^۳ واقع در منطقه مورد مطالعه) در جدول (۲) خلاصه شده است [3].

۲-۳- مدل تحلیلی هیدرواقتصادی - بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها

مدل استفاده شده یک مسئله کنترل بهینه است و بر اساس مفاهیم اقتصادی، محیط‌زیستی، کشاورزی و متغیرهای هیدرولوژیکی توسعه داده شده است. از مدل تحلیلی برای محاسبه کل سود حاصل از مصرف آب در هر ناحیه برای تولید محصول، برآورد هزینه و همچنین برآورد پیامدهای محیط‌زیستی اکوسیستم آبی و خسارت برداشت آب استفاده

برابر با تعداد کل بازیگرها، C معادل ائتلاف در بردارنده بازیگر j ، p برابر با تعداد بازیگرهای حاضر در ائتلاف C و $v(C-j)$ برابر با مقدار تابع مشخصه ائتلاف C بدون بازیگر j است. پس از تعیین مقدار سود تخصیص یافته به هر بازیگر، احتمال اینکه یک بازیگر متمایل به ترک ائتلاف کلی به دلیل عدم رضایت از مقدار سود تخصیص داده شده، باشد را می‌توان به کمک شاخص‌های پایداری و به صورت کمی مورد ارزیابی قرار داد. در این مطالعه از معیار پایداری لوهمن^۱ که از محاسبه ضریب تغییرات میان معیار حساب شده برای بازیگران در ائتلاف (ε_j) برآورد می‌گردد. ε_j به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon_j = \frac{\theta_j - v(j)}{\sum_{j \in C} (\theta_j - v(j))} \cdot \sum_{j \in C} \varepsilon_j = 1 \quad (9)$$

در این رابطه، $v(j)$ عبارت است از مقدار تابع مشخصه برای حالتی که بازیگر j در ائتلاف شرکت نکرده است. θ_j مقدار تخصیص یافته برای بازیگر j است.

۳- مطالعه موردی

عملکرد مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی مدنظر در این مطالعه که روش‌شناسی آن در بخش قبلی تشریح شد با بکارگیری در یک منطقه واقعی، بررسی شده است. در ادامه، منطقه مورد مطالعه، مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی و سناریوهای تدوین شده آمده است.

۳-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه آبخوان لمانچا^۲ در کشور اسپانیا قرار دارد و برگرفته از مطالعه انجام شده در مرجع [3] است. تجربه مدیریت آبخوان لمانچا نشان می‌دهد که چگونه همکاری میان همه ذینفعان در مدیریت منابع آب زیرزمینی، مؤثر و قابل دستیابی است. از اینرو در این مطالعه روی این آبخوان متشکل از سه زیرآبخوان ناحیه شمالی ND، زیرآبخوان ناحیه مرکزی CD و زیرآبخوان ناحیه جنوبی SD تمرکز شده است.

1 Loehman stability index

2 La Mancha

3 Tablas de Daimiel

SD) فعالیت نمایند.

تابع هدف هر کشاورز به صورت تلاش کشاورزان برای بیشینه کردن سود خود، مدنظر قرار گرفته است که در آن پیامدهای محیط‌زیستی و یا پیامدهای برداشت آب به همسایگان نیز در نظر گرفته شده است (رابطه ۵). برای بررسی هسته بازی همکارانه، روابط مدنظر در این مطالعه به صورت روابط (۷ تا ۹) نشان داده شده است. برای تقسیم سود حاصل از همکاری بین بازیگرها و بررسی پایداری هر ائتلاف از روابط (۱۰) استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} X_{ND} &\geq v(ND) \\ X_{CD} &\geq v(CD) \\ X_{SD} &\geq v(SD) \\ X_{ND} + X_{CD} &\geq v(ND, CD) \\ X_{CD} + X_{SD} &\geq v(CD, SD) \\ X_{ND} + X_{CD} + X_{SD} &\geq v(ND, CD, SD) \end{aligned} \quad (10)$$

شده است. بر اساس نوع همکاری میان بهره‌برداران، از تابع هدف (رابطه ۵) استفاده می‌شود تا بتوان عواید حاصل از همکاری‌های شکل گرفته را محاسبه نمود. در نهایت بر اساس مفاهیم نظریه بازی‌های همکارانه، نتایج حالات مختلف همکاری بین بهره‌برداران، ارزش همکاری‌ها و پایداری آنها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه اجزای بازی به این صورت است که بازیگرها، کشاورزانی هستند که در سه زیرآبخوان اصلی ND، CD و SD با فعالیت‌های خود موجب کاهش سطح آب در این آبخوان‌ها و همچنین موجب خسارت به اکوسیستم منطقه می‌شوند. هر بازیگر می‌تواند با همسایه‌های مجاور خود ائتلاف تشکیل دهد. در واقع ائتلاف و یا همکاری میان کشاورزانی که در محدوده سه زیرآبخوان هستند، شکل خواهد گرفت. کشاورزان در هر ناحیه می‌توانند به صورت مستقل (ND، CD و SD)، ائتلاف جزئی (ND + CD و (CD + SD) و یا ائتلاف و همکاری کلی (ND + CD + SD) را تشکیل دهند.

جدول ۲. داده‌های ورودی مدل

Parameters	Description	Value	Unit
C_0	Fixed pumping cost	340	€/ha
C_1	Cost of pumping coefficient	0.0025	€/m ³ m
α	Return flow coefficient	0.2	-
r	Social discount rate	0.05	-
β	Value of water for ecosystems	50000	€/m
w_1, w_2, w_3	Water requirements of crop types	7415, 6259, 2705	m ³ /ha
b_1, b_2, b_3	Crop revenue of crop types	1300, 2500, 544	€/ha
$SL^{ND}, SL^{CD}, SL^{SD}$	Water table natural level above sea level in ND, CD, and SD	670, 660, 680	m
$H0^{ND}, H0^{CD}, H0^{SD}$	Current water table elevation above sea level in ND, CD, and SD	640, 635, 650	m
R^{ND}, R^{CD}, R^{SD}	Recharge without irrigation return flows in ND, CD, and SD	95, 150, 75	Mm ³
$AS^{ND}, AS^{CD}, AS^{SD}$	Area of the aquifer times storativity in ND, CD, and SD	38.08, 115.60, 59.84	km ²
V^{ND}, V^{CD}, V^{SD}	Volume of the sub-aquifer in ND, CD, and SD	1700, 5000, 2600	hm ³
$\sigma^{ND}, \sigma^{CD}, \sigma^{SD}$	Extraction externality weights for ND, CD, and SD	0.177, 0.072, 0.031	-
$AR_i^{ND}, AR_i^{CD}, AR_i^{SD}$ ($i = 1, 2, 3$)	Total surface area available for each crop in sub-aquifers ND, CD, and SD	57000, 67000, 15000	ha
$W_{ND,CD}, W_{CD,SD}$	The length of boundary between two adjacent sub-aquifers	90, 60	km
$T_{ND,CD}, T_{CD,SD}$	Transmissivity between two adjacent sub-aquifers	5475, 5475	m ² /year
$L_{ND,CD}, L_{CD,SD}$	The average distance between the centers of two adjacent sub-aquifers	10, 35	km
T	Planning horizon	10	year

Table 2. Input parameters for the model

شکل (۳) ارائه شده است. در این شکل، هر دو سناریو مشتمل بر سود خالص کشاورزان بدون در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (خط ممتد) و با در نظر گرفتن آن (خط چین) آمده است. با توجه به حجم زیرآبخوان CD، در هر دو سناریو، سود خالص کشاورزان، بیشتر از سایر نواحی است و کمترین سود خالص در زیرآبخوان ND حاصل می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر سه زیرآبخوان، با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (سناریو ۲)، سود خالص کشاورزان اندکی کاهش می‌یابد که این کاهش برای سه ناحیه زیرآبخوان ND، CD و SD به ترتیب ۱/۳۰، ۰ و ۱/۲۷ میلیون یورو است.

جدول ۳. سناریوهای تدوین شده بر اساس نوع همکاری

Aquifer	Cooperation	Scenario 1		Scenario 2	
		E	D	E	D
ND	Status quo	×	×	×	✓
CD		×	×	×	✓
SD		×	×	×	✓
ND+CD	Partial cooperation	✓	×	✓	✓
SD+CD		✓	×	✓	✓
ND+CD+SD	Full cooperation	✓	×	✓	✓

E: Extraction damage

D: Environmental damage

×: Not considered

✓: Considered

Table 3. Scenarios based on the type of cooperation

۴-۲- پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از فعالیت کشاورزان در وضع موجود

مقایسه خسارت محیط‌زیستی ناشی از برداشت آب از هر زیرآبخوان به دلیل فعالیت‌های کشاورزان در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. شکل (۴) مقادیر خسارت محیط‌زیستی برای سناریو ۱ و شکل (۵)، مقادیر خسارت محیط‌زیستی برای سناریو ۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از

در این مطالعه، تعداد جمعیت و تعداد تکرارهای محاسباتی روش پیوسته جامعه مورچه‌ها به‌عنوان ابزار بهینه‌سازی مدنظر، بر اساس انجام تعدادی محاسبات اولیه، به ترتیب برابر ۴۰ و ۲۰۰۰ (معادل ۸۰۰۰۰ شبیه‌سازی در هر حل) تنظیم شده است که زمان محاسباتی برای هر اجرای مستقل حدود ۳۰ دقیقه است. محاسبات در یک رایانه با مشخصات پردازنده هفت هسته‌ای ۲/۲ گیگاهرتز و حافظه ۴ گیگابایت انجام گرفته است. نتایج ارائه پس از سه دوره اجرای برنامه است و نتیجه متوسط اجراها در نظر گرفته شده است.

۳-۳- سناریوهای تدوین شده

دو سناریوی اصلی در این مطالعه در نظر گرفته شده است. در سناریو ۱، بازیگرها پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از فعالیت‌های خود را که روی اکوسیستم آبی تأثیرگذار است، در نظر نمی‌گیرند. در سناریو ۲، بازیگرها، پیامدهای محیط‌زیستی را در نظر می‌گیرند. چهار سناریو برای چگونگی همکاری نیز در این مطالعه تعریف شده است. در حالت وضع موجود (بدون همکاری) بازیگرها در هر آبخوان به دنبال بیشینه کردن سود خود بدون در نظر گرفتن خسارت برداشت آب از آبخوان به همسایگان مجاور خود هستند. در حالت همکاری جزئی میان بازیگران (ائتلاف دو بازیگر) هر بازیگر با بازیگر مجاور خود همکاری می‌کند و خسارت برداشت آب را در نظر می‌گیرند. بازیگر سوم در ائتلاف حضور ندارد، از اینرو خسارت برداشت آب در نظر گرفته نمی‌شود. در حالت همکاری کامل میان بازیگران (ائتلاف کلی) همه بازیگرها با یکدیگر همکاری می‌نمایند و خسارت برداشت آب را در نظر می‌گیرند. در جدول (۳)، سناریوها و چگونگی همکاری‌ها نشان داده شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- سود کشاورزان در وضع موجود

در حالت وضع موجود، چنانچه کشاورزان در هر ناحیه به صورت مستقل فعالیت نمایند، نتایج سود خالص آنها در

شکل ۵. مقادیر خسارت محیط‌زیستی با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (سناریو ۲)

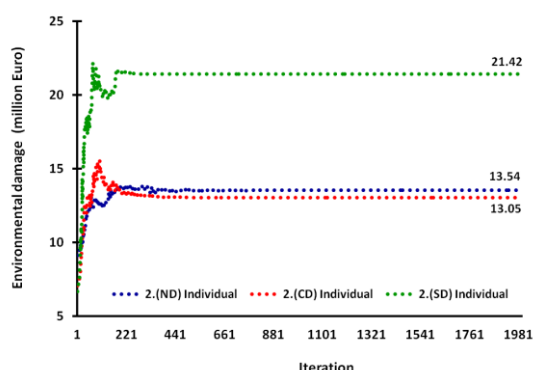


Fig. 5. Environmental damage values when environmental externalities are internalized (Scenario 2)

شکل ۶. مجموع سود خالص کشاورزان با تشکیل ائتلاف جزئی و ائتلاف کامل، بدون در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (سناریو ۱)

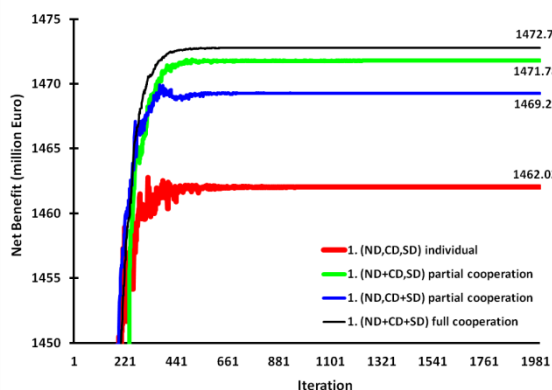


Fig. 6. Total net benefit of farmers for partial and full coalitions when environmental externalities are not internalized (Scenario 1)

۴-۳- سود همکارانه کشاورزان

مجموع سود خالص کشاورزان در کل آبخوان برای سناریو ۱، با در نظر گرفتن وضع موجود، همکاری جزئی و همکاری کامل در شکل (۶) ارائه شده است. همکاری جزئی در دو حالت همکاری در دو زیرآبخوان ND و CD و همچنین در دو زیرآبخوان CD و SD بررسی شده است. در شکل (۷) نیز مجموع سود خالص کشاورزان برای سناریو ۲ یعنی با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی در هر ناحیه، ارائه شده است. در هر دو شکل همان‌گونه که مشاهده می‌شود، برای حالتی که همکاری به صورت جزئی و کامل در

مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود، برای حالتی کشاورزان در هر ناحیه، اثر پیامدهای محیط‌زیستی را در تصمیمات خود (تابع هدف) در نظر می‌گیرند، خسارت وارد شده به محیط‌زیست ناشی از برداشت آب از آبخوان، کاهش می‌یابد. با توجه به ویژگی‌های زیرآبخوان SD، در هر دو سناریو، خسارت محیط‌زیستی برای این زیرآبخوان بیشتر از دو آبخوان دیگر است. مقایسه شکل‌های (۴ و ۵) نشان می‌دهد که در سناریو ۲ مقادیر خسارت محیط‌زیستی به دلیل در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی، برای سه زیرآبخوان ND، CD و SD به ترتیب ۰/۵۳، ۰/۰۴ و ۰ میلیون یورو کاهش می‌یابد.

شکل ۳. مقایسه مقادیر سود خالص کشاورزان در سه زیرآبخوان برای دو سناریو بدون در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (خط ممتد) و با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (خط چین)

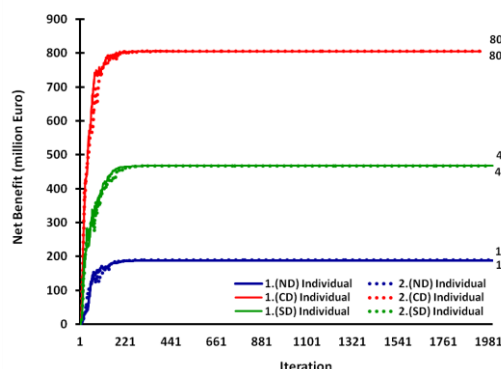


Fig. 3. Comparison of the net benefit of farmers in three sub-aquifers for two scenarios, without internalization of environmental externalities (solid lines) and with internalization of environmental externalities (dashed lines)

شکل ۴. مقادیر خسارت محیط‌زیستی بدون در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (سناریو ۱)

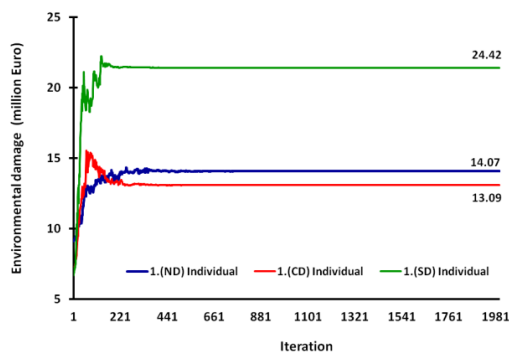


Fig. 4. Environmental damage values when environmental externalities are not internalized (Scenario 1)

محیط‌زیستی در کل آبخوان برای سناریوهای ۱ و ۲، در شرایط وضع موجود، همکاری جزئی و همکاری کامل ارائه شده است. مشاهده می‌شود که خسارات محیط‌زیستی در هر دو سناریو در وضع موجود بیشترین مقدار را داشته و به ترتیب در شرایط همکاری جزئی و همکاری، مقدار آن کاهش می‌یابد. چنان‌چه شرایط وضع موجود و همکاری کامل برای نمونه مقایسه شود، این کاهش، معادل ۱/۰۴ و ۰/۹۴ میلیون یورو برای سناریوهای ۱ و ۲ است. قابل برداشت است که در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی باعث اندکی کاسته شدن از آثار همکاری می‌شود.

مقایسه نتایج دو سناریوهای ۱ و ۲ گویای این است زمانی که کشاورزان پیامدهای محیط‌زیستی را در نظر می‌گیرند خسارت محیط‌زیستی کاهش می‌یابد. در حالت همکاری کامل، در صورتی که پیامدهای محیط‌زیستی در فعالیت کشاورزان در نظر گرفته می‌شود، خسارت ۰/۴۷ میلیون یورو کاهش می‌یابد. در حالت همکاری کشاورزان در دو زیرآبخوان CD و SD، ۰/۵۴ میلیون یورو خسارت نسبت به سناریو ۱، کاهش را نشان می‌دهد. همکاری در دو زیرآبخوان ND و CD نیز در مقایسه با سناریو ۱، نشان می‌دهد که خسارت محیط‌زیستی به دلیل در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی توسط کشاورزان ۰/۴۸ میلیون یورو کاهش یافته است.

شکل ۸. مجموع خسارت محیط‌زیستی با تشکیل ائتلاف جزئی و کامل برای سناریو ۱، بدون گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی

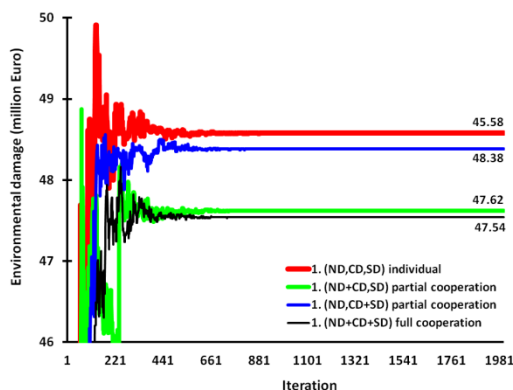


Fig. 8. Total environmental damage values for partial and full coalitions when environmental externalities are not internalized (Scenario 1)

نظر گرفته می‌شود، و انتظار می‌رود، سود خالص کشاورزان افزایش یابد که به دلیل لحاظ خسارات جانبی در تصمیمات است. برای نمونه، مقایسه شرایط وضع موجود و همکاری کامل در سناریوهای ۱ و ۲، نشان دهنده افزایش سود ۱۰/۷۵ و ۹/۲۳ میلیون یورو است.

همچنین مقایسه دو سناریو ۱ و ۲ نشان می‌دهد که در همه حالات همکاری و وضع موجود، در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی در تصمیمات؛ افزاینده سود خالص کشاورزان در کل آبخوان است که دلیل آن، داشتن هدف کاستن از خسارات محیط‌زیستی توسط کشاورزان است. برای نمونه در حالت همکاری کامل، مقایسه سود خالص کشاورزان نشان می‌دهد در صورتی که پیامدهای محیط‌زیستی در نظر گرفته شود، مقدار سود از ۱۴۷۲/۷۷ به ۱۴۷۳/۰۱ میلیون یورو افزایش می‌یابد. همچنین در حالت همکاری کشاورزان در دو زیرآبخوان ND و CD، ۰/۳۶ میلیون یورو افزایش سود نسبت به سناریو ۱ مشاهده می‌شود. همکاری در دو زیرآبخوان CD و SD، در مقایسه با سناریو ۱ نیز مقدار سود را ۱/۴۵ میلیون یورو افزایش (به دلیل در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی) می‌دهد.

شکل ۷. مجموع سود خالص کشاورزان با تشکیل ائتلاف جزئی و ائتلاف کامل، با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی (سناریو ۲)

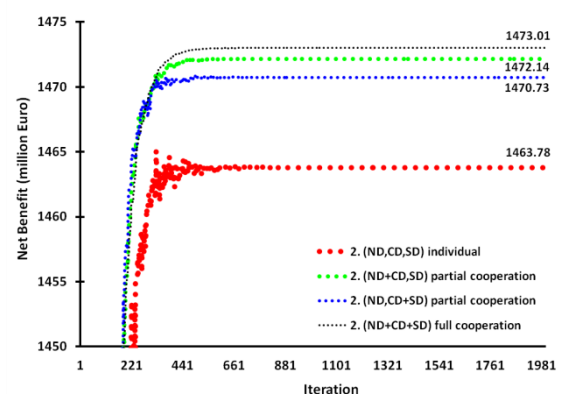


Fig. 7. Total net benefit of farmers for partial and full coalitions when environmental externalities are internalized (Scenario 2)

۴-۴- پیامدهای محیط‌زیستی ناشی از فعالیت کشاورزان با در

نظر گرفتن همکاری

در شکل‌های (۸ و ۹) مقادیر مجموع خسارت

با این حال بر اساس نتایج و تحلیل‌های ارائه شده در این بخش، بوضوح می‌توان تأثیر چگونگی تصمیم‌گیری‌ها در مقدار سود کشاورزان و خسارات محیط‌زیستی را ملاحظه نمود. همچنین قابل ذکر است که این روش‌شناسی قابل استفاده در آبخوان‌های دیگر است.

۴-۵- تخصیص عواید بازی همکارانه و بررسی پایداری

در جدول (۴) مقادیر ارزش شاپلی برای تخصیص عواید همکاری کشاورزان (ناشی از سود خالص و میزان خسارت محیط‌زیستی) در سه زیرآبخوان مطالعه شده، ارائه شده است و درصد سهم هر زیرآبخوان برآورد شده است. بررسی قرارگیری در هسته نیز در این جدول آمده است. در جدول (۵) میزان پایداری هر یک از بازیگرها برای شکل‌گیری همکاری آمده است. بررسی‌ها در قالب یک حالت بدون نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی توسط کشاورزان در قالب سناریو ۱ و سه حالت با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی برای ارزش آب اکوسیستم معادل ۵۰ هزاریورو، ۲۵ هزاریورو و ۱۰۰ هزاریورو در قالب سناریو ۲ ارائه شده است.

نگاهی به نتایج این مطالعه نشان می‌دهد با توجه به نمونه موردی استفاده شده در این مطالعه که داده‌های آن از مرجع [3] برداشت شده است، خسارات محیط‌زیستی؛ مقادیر قابل توجهی نیستند که به دلایلی مانند عدد کوچک برآورد شده برای β به عنوان ارزش آب برای اکوسیستم، خطی دیده شدن خسارات محیط‌زیستی در رابطه (۳)، محدودیت‌های سطح زیر کشت در زیرآبخوان‌ها، می‌تواند مرتبط باشد. بدین منظور در بخش بعدی برای بررسی بیشتر سناریو ۲، مقادیر نصف و دو برابر ارزش آب برای اکوسیستم نیز ارزیابی می‌شود.

شکل ۹. مجموع خسارت محیط‌زیستی با تشکیل ائتلاف جزئی و کامل برای سناریو ۲، با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی

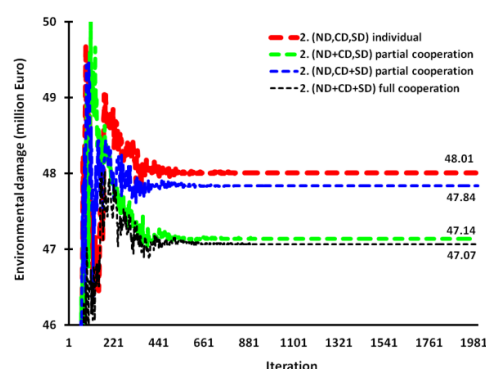


Fig. 9. Total environmental damage values for partial and full coalitions when environmental externalities are internalized (Scenario 2)

جدول ۴. برآورد ارزش شاپلی برای تخصیص عواید همکاری و بررسی قرارگیری در هسته

Subject	Sub aquifer	Shapely value, million Euro (Percent of portion)			
		Scenario 1		Scenario 2	
		Value of water for ecosystem		Value of water for ecosystem	
		50000 (€/m)	50000 (€/m)	25000 (€/m)	100000 (€/m)
Net benefit	ND	206.80 (13.99)	206.70 (14.04)	212.75 (14.22)	194.66 (13.65)
	CD	921.83 (62.58)	921.06 (62.56)	930.60 (62.18)	902.83 (63.31)
	SD	345.10 (23.43)	344.52 (23.40)	353.23 (23.60)	328.64 (23.04)
		1	1	1	1
	(1): In the core	1	1	1	1
Environmental Damage		0	0	0	0
	ND	15.54 (26.31)	12.20 (25.91)	6.18 (26.12)	23.91 (25.59)
	CD	16.97 (35.69)	18.39 (39.07)	9.22 (38.95)	36.67 (39.25)
	SD	18.07 (38.00)	16.49 (35.02)	8.27 (34.93)	32.85 (35.16)
		1	1	1	1
	(1): In the core	0	0	0	0
		1	1	1	1

Table 4. Shapley value allocations and core conditions

مقایسه سناریوهای ۱ و ۲ بیانگر کاهش اندک هم سود خالص و هم خسارت محیط‌زیستی تخصیص یافته به بازیگران با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی است. مقایسه نتایج برای مقادیر مختلف ارزش اکوسیستم در سناریو ۲، نشان می‌دهد که سود ناشی از عواید همکاری در حالتی که ارزش اکوسیستم ۱۰۰ هزار یورو باشد، کمتر از حالت وضع موجود (ارزش اکوسیستم ۵۰ هزار یورو) است. مقادیر سود در این حالت به ترتیب ۵/۸، ۱/۹ و ۴/۶ درصد کاهش برای زیرآبخوان‌های ND، CD و SD را نشان می‌دهد. همچنین چنانچه ارزش اکوسیستم ۲۵ هزار یورو در نظر گرفته شود، افزایش سود به ترتیب ۲/۹، ۱/۰ و ۲/۵ درصد برای کشاورزان در آبخوان ND، CD و SD برآورد شده است که به دلیل تغییر ضریب ارزش اکوسیستم است. در جدول (۴)، سهم کاهش خسارت محیط‌زیستی ناشی از همکاری برای کشاورزان در آبخوان ND، CD و SD محاسبه شده است.

چنانچه مقدار کاهش خسارت محیط‌زیستی به دلیل افت سفره آب زیرزمینی ارزیابی شود، می‌توان تفسیر نمود که در حالتی که ارزش آب اکوسیستم ۱۰۰ هزار یورو در نظر گرفته شده، کمترین کاهش سطح سفره و با فرض ۲۵ هزار یورو بیشترین افت سطح سفره حاصل شده است. بنابراین با وجود اینکه سود خالص کشاورزان با افزایش ارزش آب اکوسیستم

کاهش می‌یابد و همچنین رقم خسارت محیط‌زیستی هم افزایش نشان می‌دهد ولی نتیجه آن برای اکوسیستم منطقه مطلوب بوده و افت کمتر سفره آب زیرزمینی با این رویکرد حاصل می‌شود. همچنین درصد سهم‌های حساب شده در جدول (۴) گویای این نکته است که با افزایش ارزش آب اکوسیستم، تمایل همکاری در زیرآبخوان‌های ND و SD کاهش می‌یابد و برعکس این رفتار، برای زیرآبخوان CD ملاحظه می‌شود. سهم خسارت محیط‌زیستی نیز با افزایش ارزش آب اکوسیستم، در زیرآبخوان‌های ND و CD کم می‌شود و عکس آن در SD رخ می‌دهد. معیار پایداری همکاری بر اساس سناریوهای مورد نظر در جدول (۵) محاسبه شده است. مقادیر بزرگ‌تر بیانگر این است که همکاری شکل گرفته ناپایدار از بقیه ائتلاف‌ها است. نتایج نشان می‌دهد که ائتلاف کاملاً پایدار که همه بازیگران در هسته قرار داشته باشند در بررسی‌های انجام شده وجود ندارد. البته از جدول (۵) قابل مشاهده است برای سود خالص کشاورزان، در حالتی که ارزش آب اکوسیستم ۲۵ هزار یورو است، همکاری شکل گرفته شده ناپایدارتر از بقیه حالات است. همچنین پایدارترین حالت با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی با بزرگ‌ترین ارزش آب اکوسیستم حاصل شده است.

جدول ۵. برآورد میزان پایداری همکاری‌ها

Loehman stability index					
Subject	Sub aquifer	Scenario 1		Scenario 2	
		Value of water for ecosystem		Value of water for ecosystem	
		50000 (€/m)	50000(€/m)	25000(€/m)	100000 (€/m)
Net benefit	ND	0.13	0.13	0.12	0.14
	CD	0.87	0.87	0.88	0.86
	SD	-	-	-	-
	Stability Index	1.04	1.05	1.07	1.03
Environmental Damage	ND	0.20	0.21	0.23	0.19
	CD	-	-	-	-
	SD	0.80	0.79	0.77	0.81
	Stability Index	0.86	0.81	0.77	0.87

Table 5. Estimation of cooperation stability

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به همراه مفاهیم نظریه بازی‌های همکارانه به منظور بررسی حالات مختلف همکاری بین بهره‌برداران مختلف از منابع آب زیرزمینی و تأثیر این همکاری‌ها در کاهش خسارت محیط‌زیستی و افزایش سود بهره‌برداران استفاده شده است. تجربه مدیریت آبخوان لمانچا در کشور اسپانیا نشان می‌دهد که چگونه همکاری میان همه ذینفعان در مدیریت منابع آب زیرزمینی مؤثر و قابل‌دستیابی است. از اینرو این آبخوان در این مطالعه، به عنوان مطالعه موردی مدنظر قرار گرفت. با استفاده از مفاهیم نظریه بازی‌های همکارانه عواید ناشی از همکاری بازیگرها برآورد شد و از تحلیل قرارگیری در هسته برای بررسی دامنه آن دسته از تخصیص‌هایی که همه بازیگرها، تمایل به همکاری دارند، استفاده شده است. همچنین روش ارزش شاپلی برای تخصیص عادلانه عواید ناشی از همکاری بازیگرها استفاده شد. در ادامه، شاخص تمایل به همکاری برای هر بازیگر بر اساس میزان پایداری هر بازیگر برای همکاری محاسبه شد.

بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت، با در نظر گرفتن پیامدهای محیط‌زیستی توسط کشاورزان، سود خالص کشاورزان افزایش می‌یابد و خسارت محیط‌زیستی در این حالت نیز کاهش را نشان می‌دهد. چنانچه کشاورزان با یکدیگر همکاری داشته باشند، مقادیر سود خالص رفتار افزایشی و مقادیر خسارت محیط‌زیستی رفتار کاهشی را در مقایسه با شرایط عدم همکاری، نشان می‌دهند. همچنین افزایش مقدار ارزش آب اکوسیستم، ضمن کمک به پایداری همکاری‌ها، سبب بهبود وضعیت افت سفره در طول دوره برنامه‌ریزی هم می‌شود.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نظریه بازی‌های همکارانه به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت منابع آب زیرزمینی و خسارت محیط‌زیستی می‌تواند استفاده شود. همچنین بکارگیری ابزار بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها نیز به دلیل اینکه روش بهینه‌سازی فراکاوشی محسوب می‌شود و از روش‌های موفق در حوزه مسائل آب‌های زیرزمینی بوده است، امکان پرداختن به توابع هدف و قیود در

گستره‌ای وسیع‌تر و به دور از محدودیت‌های روش‌های کلاسیک را فراهم می‌نماید و روند تعریف و حل مسأله را منعطف‌تر می‌کند.

References

۶- منابع

- [1]. Danesh-Yazdi M., Abrishamchi A., Tajrishy M. 2014 Conflict Resolution of Water Resources Allocations Using the Game Theoretic Approach: The Case of Orumieh River Basin. *Journal of water & wastewater (Ab va Fazelab)*, 25 (2), 48-57 (In Persian).
- [2]. Mahmoodzadeh D., Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. 2016 Optimized Management of Groundwater Resources in Kish Island: A Sensitivity Analysis of Optimal Strategies in Response to Environmental Changes. *Journal of water & wastewater (Ab va Fazelab)*, 27 (2), 70-61 (In Persian).
- [3]. Esteban E., Dinar A. 2013 Cooperative management of groundwater resources in the presence of environmental externalities. *Environmental and Resource Economics*. 54 (3), 443-469.
- [4]. Ostrom E. 2010 Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems. *American Economic Review*, 100 (3), 641-672.
- [5]. Parsapour-Moghaddam P., Abed-Elmdoust A., Kerachian R. 2015 A heuristic evolutionary game theoretic methodology for conjunctive use of surface and groundwater resources. *Water Resources Management*, 29 (11), 3905-3918
- [6]. Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. 2015 Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. *Environmental Modelling & Software*. 74, 21-38.
- [7]. Rogers P. 1969 A game theory approach to the problems of international river basins. *Water Resources Research*, 5 (4), 749-760.
- [8]. Heaney J.P., Dickinson R.E. 1982 Methods for apportioning the cost of a water resource project. *Water Resources Research*, 18 (3), 476-482.
- [9]. Lejano R.P., Davos C.A. 1995 Cost allocation of multiagency water resource projects: Game theoretic approaches and case study. *Water Resources Research*, 31, 1387-1393.
- [10]. Wu X., Whittington D. 2006 Incentive compatibility and conflict resolution in international river basins: A case study of the Nile Basin. *Water Resources Research*, 42 (2), W02417.
- [11]. Loaiciga H. 2004 Analytical game theoretic approach to groundwater extraction. *Journal of Hydrology*, 297, 22-33.
- [12]. Yang Z., Zeng Y., Cai Y., Tan Q. 2008 An integrated game-theory based model for trans-boundary water resources management in north china: A case study in the Guanting reservoir basin (GRB),

game theory. *6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran* (In Persian).

[26]. Zarezadeh M., Morid S., Fatemi F., Madani K. 2016 The Strategic Cooperation between Iran and Afghanistan in Helmand Basin to Allocate more Water to Environment and Control Opium Cultivation Using Game Theory Approach. *Iran-Water Resources Research*, **12** (3), 12-21 (In Persian).

[27]. Safari N., Zarghami M., Behboudi D., Alami M. T. 2016 Modeling Welfare Effects of Market-Based Regional Allocation in Compared with Administrative Allocation by Developing Cooperative Game; Case Study. *Iran-Water Resources Research*, **12** (3), 22-34 (In Persian).

[28]. Pourtakdoust S. H., Nobahari H. 2004 An extension of ant colony system to continuous optimization problems. In: *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg, 294-301.

[29]. Afshar M.H., Ketabchi H., Rasa E. 2006 Elitist continuous ant colony optimization algorithm: application to reservoir operation problems. *International Journal of Civil Engineering*, **4** (4), 274-285.

[30]. Ataie-Ashtiani B., Ketabchi H. 2011 Elitist continuous ant colony optimization Algorithm for optimal management of coastal aquifers. *Water Resource Management*, **25** (1), 165-190.

[31]. Nguyen A.T., Reiter S., Rigo P. 2014 A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, **113**, 1043-1058.

[32]. Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. 2015 Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges, and practical solutions. Special Issue Optimization for Groundwater Characterization and Management. *Hydrogeology Journal*, **23** (6), 1129-1154.

[33]. Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. 2015 Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology*, **520**, 193-213.

[34]. Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. 2011 Development of Combined Ant Colony Optimization Algorithm and Numerical Simulation for Optimal Management of Coastal Aquifers. *Iran-Water Resources Research*, **7** (1), 1-12 (In Persian).

[35]. Shoham Y., Leyton-Brown K. 2008 Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. *Cambridge University Press*.

[36]. Shapley L.S. 1953 A value for n-person games. Contributions to the theory of games, no. II. *Annals of Math. Studies*, vol 28. *Princeton University Press*, Princeton, 307-317.

Beijing. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, **18** (4), 461-483.

[13]. Niksokhan M.H., Kerachian R., Karamouz M. 2009 A Game theoretic approach for trading discharge permits in rivers. *Water Science and Technology*, IWA, **60** (3), 793-804.

[14]. Sadegh M., Mahjouri N., Kerachian R. 2010 Optimal interbasin water allocation using crisp and fuzzy shapley games. *Water Resources management*, **24** (10), 2291-2310.

[15]. Madani K. 2010 Game theory and water resources. *Journal of Hydrology*, **381**, 225-238.

[16]. Mahjouri N., Ardestani M. 2011 Application of cooperative and non-cooperative games in large-scale water quantity and quality management: a case study. *Environmental monitoring and assessment*, **172** (1-4), 157-169.

[17]. Madani K., Dinar A. 2012 Non-cooperative institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. *Ecological Economics*, **74**, 34-45.

[18]. Madani K., Dinar A. 2012 Cooperative institutions for sustainable common pool resource management: application to groundwater. *Water Resources Research*, **48** (9), W09553.

[19]. Abed-Elmdoust A., Kerachian R. 2012 Water resources allocation using a cooperative game with fuzzy payoffs and fuzzy coalitions. *Water resources management*, **26** (13), 3961-3976.

[20]. Jafarzadegan K., Abed-Elmdoust A., Kerachian R. 2013 A fuzzy variable least core game for inter-basin water resources allocation under uncertainty. *Water resources management*, **27** (9), 3247-3260.

[21]. Jafarzadegan K., Abed-Elmdoust A., Kerachian R. 2014 A stochastic model for optimal operation of inter-basin water allocation systems: a case study. *Stochastic environmental research and risk assessment*, **28** (6), 1343-1358.

[22]. Malekpour A.S., Kerachian R., Abed-Elmdoust A. 2010 Application of evolutionary game theory in water quality management. *4th Conference of Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran* (In Persian).

[23]. Sobuhi M., Mojarad E. 2010 Application of Game Theory for Groundwater Resources Management of Atrak. *Agricultural Economics & Development*, **24** (1), 1-12 (In Persian).

[24]. Salehi F., Daneshvar M., Shahnoushi N., Jaleh R. M. 2010 Application of Game Theory in Determination of Optimal Groundwater Extraction in Taybad Plain. *Agricultural economics*, **4** (3), 65-89 (In Persian).

[25]. Poursiyahi S. H., Kerachian R. 2011 The allocation of water in common rivers: applications of

Feasibility of groundwater resources cooperative management considering the environmental damage using ant colony optimization

D. Mahmoodzadeh¹, H. Ketabchi^{2*}

1 Ph.D. candidate. Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran,

2 Assistant Professor. Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran,

*h.ketabchi@modares.ac.ir

Abstract:

In the recent decades, water demand has been increased specially in arid and semi-arid areas, led to the over-exploitation of water resources. Groundwater resources are important sources of water supply for domestic, industrial and agricultural consumption. Nowadays, over-exploitation from groundwater resources has increased the pressure on these sources which causes the major environmental damages. Groundwater over-exploitation and the resulting decline in water level and quality have limited agricultural activities in many parts of the world. The literature suggests enforcement of cooperative management for sustainable groundwater management. The cooperative management can be achieved a better management of groundwater in the presence of environmental externalities. Actually, cooperation allows users to internalize the damages due to their activities. A game theoretical framework can be applied to assess the value of cooperation in an over-exploited aquifer. In this study, a cooperative game theory model is used to investigate how the cooperation of groundwater resources consumers influences the environmental damage and the benefit of stakeholders. The used model in the present study is developed for investigation of an optimal control problem including the variables of economic, environmental, agronomic, and hydrologic issues. Ant colony optimization method is used to flexible define and solve the simulation-optimization problem which provides an ability to consider an extensive range of objectives and constraints. The results show that how uncontrolled pumping and over-exploitation in each aquifer affect on the stakeholders of the adjacent aquifers. Furthermore, the impacts on aquatic ecosystems are analyzed and presented as environmental damages. The allocations of the full cooperation payoff among the farmers are calculated with and without the environmental externalities. In status quo scenario, farmers do not internalize the effect of their activity on the ecosystem that is linked to the aquifer. Also, neither of the environmental and extraction externalities are internalized and each sub-aquifer acts separately. In partial cooperation and full cooperation, the extraction externality is taken into account but the environmental externality is ignored by all coalitions. The results suggest that full cooperation achieves the highest aggregate level of net benefit with the lowest environmental damages (1472.77 and 47.54 million Euro respectively). Partial cooperation between regions ND and CD also achieves levels of net benefit that is higher than in non-cooperation but lower than in full-cooperation situations. The results presents for the case in which farmers internalize the environmental externality in addition to internalize the extraction externality. The results with such internalization confirm farmers' net benefit increases in all simulations, compared with the case that environmental externalities are not internalized (increases 1472.77 to 1473.01 million Euro). The results highlight the fact that when the environmental damages are taken into account, cooperation produces better economic returns compared with non-cooperation by two parameters, namely net benefit and ecosystem damages. Full cooperation achieves the highest aggregate level of net benefit with the lowest aggregate environmental damages. Consequently, the obtained results demonstrate that in different areas, environmental damages are reduced under the coalition and effective cooperation condition among stakeholders and considering the environmental externalities in comparison with status quo.

Keywords: Groundwater management, cooperative approach, simulation-optimization, environmental externalities, game theory.