

## مدیریت مناقشات آب‌های زیرزمینی با استفاده از نظریه بازی‌ها

سارا نظری<sup>۱\*</sup>، آزاده احمدی<sup>۲</sup>، بابک ابراهیمی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

sara.nazari@cv.iut.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

aahmadi@cc.iut.ac.ir

۳- دکتری، شرکت آب منطقه‌ای استان اصفهان

mbeb50@yahoo.com

### چکیده

امروزه در پی برداشت بیش از اندازه از منابع آب زیرزمینی به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین‌کننده نیاز آبی، افت شدید سطح آب و شوری آب زیرزمینی در اغلب مناطق خشک و نیمه‌خشک ایجاد شده است. مدیریت منبع آب زیرزمینی همواره با توجه به کاهش شدید ذخایر آب در دسترس در مقابل افزایش نیاز با مناقشات و بحران شدید همراه بوده است. یکی از ابزارهای پرکاربرد در حل اختلاف‌گروداران، نظریه بازی‌ها است که در این مطالعه استفاده شده است. روش تحقیق براساس این اصل که هدف دولت کاهش برداشت از آبخوان و افت سطح آب است و هدف کشاورزان، افزایش سود به‌دست آمده و در پی آن افزایش برداشت از آبخوان است. در این مطالعه، جریان آب زیرزمینی و تغییرات شوری برای ۵ سال مدل‌سازی شده و سپس مدل بهینه‌ساز ایجاد شده و به‌طور مستقیم به‌مدل شبیه‌ساز کمی و کیفی متصل شده است. در ادامه با ایجاد انواع استراتژی‌ها برای هر دو ذینفع از تئوری بازی‌های غیرهمکارانه به‌منظور بررسی نحوه تصمیم‌گیری استفاده شده است. نتایج حاصل از تعادل در نظریه بازی‌ها بیانگر افزایش بیش از ۲ متر سطح آب و افزایش سود ۴۳ میلیارد ریالی کشاورزان در انتهای ۵ سال مدل‌سازی است.

واژه‌های کلیدی: منبع مشترک، بازی‌های غیرهمکارانه، MODFLOW، MT3DMS

### ۱- مقدمه

به تبع افزایش جمعیت جهان به بیش از دو برابر در پنجاه سال گذشته، نیاز به آب اولین ماده حیات بشر افزایش چشم‌گیری یافته است. کشور ایران هرچند با میانگین بارش کم‌تر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد ولی در حدود ۶۰ سال پیش با توجه به جمعیت و نیز عدم توسعه کشور، همین مقدار کم بارش پاسخ‌گوی نیازها بوده است. اما با تبدیل ایران سنتی به ایران نوین و حرکت به سوی صنعتی شدن از یک سو و نیز افزایش بی‌رویه جمعیت از سوی دیگر نیاز به این ماده حیاتی به سرعت افزایش یافته است.

از اصلی‌ترین منابع تأمین‌کننده آب آشامیدنی در مناطق روستایی و شهری و پرمصرف‌ترین منابع آبیاری به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک منابع آب زیرزمینی هستند، در حالی است که امروزه عملکرد بشر تأثیر منفی قابل ملاحظه‌ای بر کمیت و کیفیت آب زیرزمینی گذاشته و با عدم توجه به مقوله آبخوان‌داری و انجام تغذیه مصنوعی کم‌آبی به یک بحران جدی تبدیل شده است. به نحوی که در بسیاری از مناطق جهان برداشت‌های فاقد محدودیت و بی‌رویه منجر به کاهش سطح آب، کاهش برداشت ممکن از چاه‌ها، افزایش هزینه پمپاژ و کاهش کیفیت آب شده است (Konikow and Kendy, 2005). به همین دلیل توجه به آب‌های زیرزمینی امری اجتناب‌ناپذیر بوده و بررسی وضعیت کمی و کیفی سفره‌های آب زیرزمینی نیز در همین راستا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

منبع آب زیرزمینی نیز به عنوان یک منبع مشترک در نظر گرفته می‌شود، در واقع هر منبعی که ویژگی یا میزان آن در عین ممکن بودن برداشت برای تمامی ذینفعان هزینه بر نیز باشد، منبع مشترک نامیده می‌شود. بنابراین در منبع آب زیرزمینی برداشت چندین بهره‌بردار دشوار، هزینه بر و مصرف به صورت رقابتی است.

در منابع آب زیرزمینی میزان برداشت ممکن برای هر بهره‌بردار متناسب با میزان برداشت سایرین محدود می‌شود به نحوی که با افزایش برداشت و کاهش سطح آب زیرزمینی، زمان مورد نیاز پمپاژ و هزینه پمپاژ افزایش یافته و امکان خشک شدن چاه‌های بهره‌بردار نیز وجود خواهد داشت. مدیریت منابع آب زیرزمینی به دلیل وجود پیچیدگی در تخمین عوامل خارجی تاثیرگذار، مدیریت و نظارت بر میزان برداشت مصرف کنندگان بسیار چالش برانگیز است.

طبق دیدگاه سنتی در مدیریت منابع مشترک نیاز به وجود قوانین محدود کننده و یا ایجاد حقوق مالکیت است، در حالی که در مطالعات جدید مشخص شده است که با عملکرد ذینفعان براساس منطق گروهی و یا داشتن رفتار همکارانه می‌توان از بروز فاجعه در منابع مشترک جلوگیری کرد (Ostrom, 2010). امروزه یکی از ابزار کارآمد در مدیریت منابع آب زیرزمینی به عنوان یک منبع مشترک، نظریه بازی‌ها است. نقش تعیین کننده همکاری یا عدم همکاری ذینفعان در برداشت پایدار از منبع آب زیرزمینی توسط ریاضیات در تئوری بازی‌ها مدل می‌شود. بر خلاف اینکه آب زیرزمینی به دلیل محدودیت موجود در ذخایرش کمیاب است، ظرفیت برداشت از آبخوان‌ها با توجه به توان تکنولوژی نوین در چاه‌های بهره‌بردار منجر به برداشت بیش از اندازه از تغذیه آبخوان‌ها شده است.

در مدیریت منابع آب زیرزمینی به منظور دستیابی به تعادل بهینه بین منفع کسب شده برای کشاورزان با لحاظ موارد زیست محیطی از نظریه بازی‌ها دز مطالعات (Alizadeh et al., 2017; López-Corona et al., 2013; Parsapour- Moghaddam et al., 2015; Raquel et al., 2007) استفاده شده است.

با بررسی مطالعات گذشته مشخص است که با توجه به منبع مشترک بودن آب زیرزمینی لازم است رقابت و اولویت‌های مختلف ذینفعان در نظر گرفته شوند و در اغلب موارد مطالعات بدون لحاظ کردن اختلافات موجود بین بهره‌وران، تعاملات محتمل بین آنان یا تأثیر تغییر رفتار هر ذینفع در کل سیستم با استفاده صرف از مدل‌های شبیه‌ساز و بهینه‌ساز صورت گرفته است. یکی از ابزار مناسب در درک مناقشات موجود در منابع مشترک نظریه بازی‌ها است که امروزه در حل معضلات اجتماعی، اقتصادی و سیاسی بسیاری استفاده شده است. بنابراین در این مطالعه با بهره‌گیری از نظریه بازی‌های غیرهمکارانه تمایلات متضاد و مناقشات موجود بین ذینفعان آب زیرزمینی مدل شده و نحوه تصمیم‌گیری ذینفعان در صورت وجود رفتار غیرهمکارانه در نظر گرفته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

پژوهش صورت گرفته قابل تقسیم‌بندی به چهار مرحله اصلی است. اولین گام از شبیه‌سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی، دومین گام از اتصال بین شبیه‌ساز و بهینه‌ساز، سومین گام از ایجاد مدل بهینه‌ساز و اجرای آن برای گزینه‌های مدیریتی مختلف و در نهایت گام چهارم از بهره‌گیری نظریه بازی‌ها در انتخاب استراتژی‌های مدیریتی تشکیل شده است.

## ۲-۱ شبیه سازی کمی و کیفی جریان آب زیرزمینی

در گام ابتدایی پژوهش به منظور شبیه سازی کمی آبخوان محدوده‌ی مطالعاتی از مدل شبیه ساز MODFLOW استفاده شده است. از مدل شبیه ساز آب زیرزمینی MODFLOW امروزه به عنوان کد استاندارد برای پیش بینی جریان آب زیرزمینی و شبیه سازی اندرکنش آب سطحی و زیرزمینی بهره گرفته می شود. در طول بیش از ۳۰ سال گذشته مدل MODFLOW به طور گسترده توسط پژوهشگران، سازمان های خصوصی و دولتی استفاده شده است تا جریان آب زیرزمینی را با دقت مناسب تر و کارآمدی بیش تر شبیه سازی کنند. ویژگی های مدل شبیه ساز MODFLOW عبارت است از:

۱- مدل توزیعی است، به این مفهوم که سیستم آبخوان را یکپارچه در نظر نمی گیرد و در هر نقطه از آبخوان امکان شبیه سازی سطح آب وجود دارد.

۲- از روش تفاضل محدود سه بعدی در مدل سازی جریان استفاده می شود.

۳- در مدل قابلیت شبیه سازی لایه های آبدار مختلف به صورت های آزاد، تحت فشار و یا ترکیبی از هر دو وجود دارد.

۴- امکان شبیه سازی تغذیه، تبخیر و تعرق، تغذیه ی ناحیه ای، جریان به طرف چاه ها، جریان به طرف زهکش ها و جریان در بستر رودها موجود است.

مدل شبیه ساز MODFLOW شامل بسته های متعددی برای اعمال موارد تاثیرگذار در جریان آب زیرزمینی است. به طور مثال دارای بسته های تغذیه و تخلیه، چاه بهره برداری و مشاهداتی، رودخانه، زهکش، تبخیر و تعرق، دریاچه و غیره است.

به منظور شبیه سازی شوری آب زیرزمینی از مدل MT3DMS استفاده شده است که مدل شبیه ساز توسعه یافته ی MT3D است. MT3D ساختار مدولاری سه بعدی است که انتقال املاح در آب زیرزمینی را به صورت مستقل و یا مشترک شبیه سازی می کند و به طور مستقیم با مدل MODFLOW در ارتباط است. یکی از روش های حل معادلات کیفی در کد MT3D روش تفاضل محدود استاندارد است و همانند شبیه ساز کمی سیستم را به صورت توزیعی شبیه سازی می کند.

پسوندها MS بیانگر ساختار چندگانه است که بسته ی واکنش پارامترهای کیفی به مجموع بسته های موجود در MT3D اضافه شده است. ویژگی های مدل MT3DMS عبارت است از:

۱- مدل قادر به شبیه سازی انتقال، انتشار و واکنش های شیمیایی است.

۲- امکان اعمال دو بعد متحرک و ثابت برای محیط متخلخل وجود دارد و برای مدل سازی محیط های متخلخل ناهمگن استفاده می شود. به نحوی که در بعد متحرک آن انتقال املاح توسط انتشار و در بعد ثابت انتقال املاح از طریق پخشیدگی مولکولی صورت می گیرد و به این منظور در مدل سازی بجای تعریف یک تخلخل موثر برای هر سلول می توان دو تخلخل جداگانه برای محیط ثابت و متحرک تعریف کرد.

۳- قادر به اعمال انواع شرایط مرزی و همچنین تزریق و تخلیه آلودگی است.

۴- امکان شبیه سازی جریان املاح در آبخوان آزاد، محصور و نیمه محصور وجود دارد.

## ۲-۲ مدل بهینه‌ساز دو هدفه

در این مطالعه دو هدف در نظر گرفته شده است. رابطه ۱ بیانگر تابع هدف اول، بیشینه نمودن سود حاصل از کشاورزی است. مقادیر سود براساس تفاضل درآمد و هزینه کشاورزی در هر زون محاسبه می‌شود. سود حاصل از کشاورزی با استفاده از عملکرد، سطح کشت و قیمت فروش محصولات محاسبه می‌شود. هدف دوم مطابق با رابطه ۲ کمینه نمودن میانگین افت سالانه سطح آب زیرزمینی در هر زون در نظر گرفته شده است. افت سطح آب براساس میانگین افت محاسبه شده در هر زون در طول دوره مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

$$MAX \quad Z_1 = \sum_{d=1}^D (B_d - C_d) \quad (1)$$

$$Min \quad Z_2 = \frac{\sum_{d=1}^D \Delta h_{dt}}{D} \quad (2)$$

قیود اعمال شده در مدل بهینه عبارت هستند از:

$$\sum_{p=1}^P A_{pd} \leq MaxA_d \quad (3)$$

$$EC_{dm} \leq EC_{MAX} \quad (4)$$

$$A_{dp, \min} \leq A_{dp} \leq A_{dp, \max} \quad (5)$$

پارامترهای استفاده شده در روابط عبارت هستند از  $d$  شمارنده زون،  $t$  شمارنده سال  $T$  تعداد کل سال‌های مدل سازی  $m$  شمارنده ماه،  $p$  شمارنده محصولات،  $B_d$  مجموع سود محصولات کشاورزی در زون  $d$  طی دوره مدل سازی (ریال)،  $C_d$  مجموع هزینه محصولات کشاورزی در زون  $d$  طی دوره مدل سازی (ریال)،  $A_{dp}$  سطح کشت محصول  $p$  در زون  $d$  (هکتار)،  $\Delta h_{dt}$  میانگین تغییرات سطح آب در طول دوره مدل‌سازی در زون  $d$  (متر)،  $MaxA_d$  مجموع سطح کاشت موجود در زون  $d$  (هکتار)،  $EC_{dm}$  میانگین شوری شبیه سازی شده در چاه‌های مشاهداتی در ماه  $m$  سال  $t$  و زون  $d$  (میلی گرم بر لیتر)،  $EC_{MAX}$  مقدار حداکثر شوری مجاز در محدوده مطالعاتی (میلی گرم بر لیتر)،  $A_{dp, \min}$  کمینه سطح کشت محصول  $p$  در زون  $d$  (متر مکعب)،  $A_{dp, \max}$  بیشینه سطح کشت محصول  $p$  در زون  $d$  (متر مکعب).

تعداد زون‌های ایجاد شده در این پژوهش ۳ عدد است که در هر زون ۶ متغیر سطح کاشت زراعی براساس کشت غالب موجود شامل جو، یونجه، گندم، طالبی و پیاز در نظر گرفته شده است. طول دوره شبیه‌سازی در مدل نیز ۵ سال است. به منظور بهینه‌سازی چند هدفه از الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب در این مطالعه استفاده شده است.

## ۲-۳ نظریه بازی‌ها

تئوری بازی‌ها مطالعه‌ی رقابت و همکاری از طریق ریاضیات و بیانگر تأثیر عملکرد گروداران در ایجاد نتیجه است. این نظریه در ابتدا در کتاب تئوری بازی‌ها و رفتار اقتصادی توسط نیومن و مورگنسترن (۱۹۴۵) مطرح شد (Von Neumann and Morgenstern, 1945) و تا کنون در زمینه‌های متفاوتی همچون اقتصاد، سیاست، ارتباطات بین المللی، کسب و کار و زیست‌شناسی مورد مطالعه قرار گرفته است.

یکی از مهم‌ترین تقسیم‌بندی تئوری بازی‌ها همکاریانه و غیرهمکاریانه بودن بازی است. در واقع نظریه بازی‌های غیرهمکاریانه به منظور پیش‌بینی رفتار بازیکنانی استفاده می‌شود که اولویت دستیابی به اهداف شخصی برای آن‌ها در مقابل دستیابی به اهداف سیستم وجود دارد، در صورتی که در بازی همکاریانه تبادلات بازیکنان برای دستیابی عادلانه از یک منبع مدل می‌شود و توافق مابین بازیکنان پیرامون انتخاب یک استراتژی قابل اجرا است. در حقیقت اگر بازیکنان براساس توافق صورت گرفته عمل کنند بازی همکاریانه خواهد بود که در اغلب موارد به منظور بررسی تشکیل ائتلاف‌ها، موارد رأی‌گیری و تخصیص بهینه منابع استفاده می‌شود.

وجود تمایلات متناقض ذینفعان، گرایش به بیش‌نمودن سود شخصی، عدم اعتماد به سایر بازیکنان و کمبود اطلاعات درباره نحوه رفتار حریفان منجر به بروز بازی‌های غیرهمکاریانه در اغلب موارد می‌شود. انواع تعادل‌های ایجاد شده در نظریه بازی‌های غیرهمکاریانه شامل تعادل نش، GMR، SMR و SEQ هستند که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

نظریه نش: پرکاربردترین نظریه تعیین پاسخ پایدار در بازی‌های غیرهمکاریانه است. در واقع این نظریه رفتار تصمیم‌گیرنده ریسک‌گریز را مدل می‌کند که تنها امکان انتخاب یک استراتژی در طول بازی برای آن وجود دارد. در این نظریه با فرض عقلانیت کامل و عدم آینده‌نگری بازیکنان، استراتژی توسط هر یک از تصمیم‌گیرندگان مشخص می‌شود که مطلوبیت او را حداکثر کند،

تعادل GMR: پاسخی از نظر تصمیم‌گیرنده تعادل GMR است که هرگونه حرکت یک جانبه‌ای که منجر به بهبود پیامد او شود توسط سایر حریفان با حرکت به سمت پیامد کم‌تر محدود شده باشد.

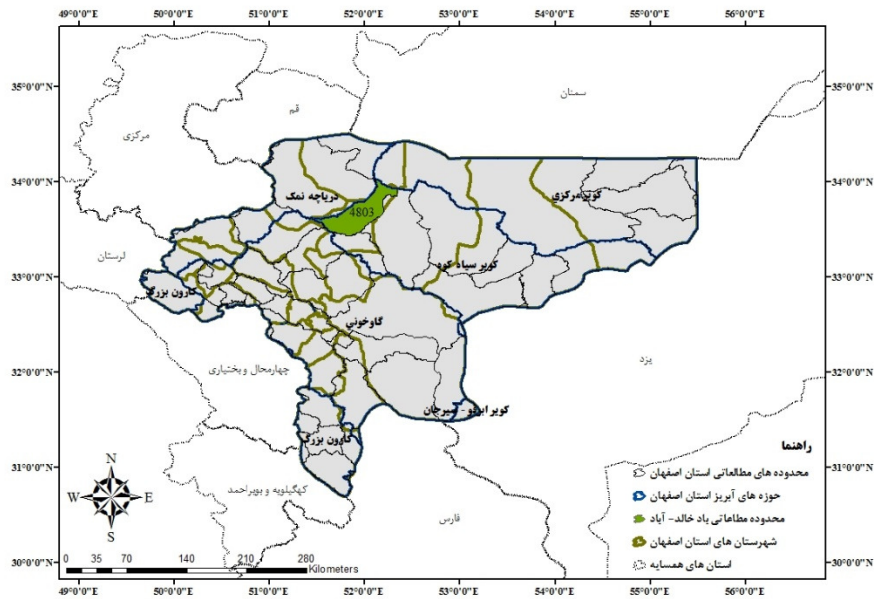
تعادل SMR: تعادل SMR تعریف محدودتری از تعادل نسبت به GMR ارائه می‌کند. پاسخی برای هر تصمیم‌گیرنده پاسخ SMR است که نه تنها تغییر استراتژی از  $x$  به  $z$  توسط بازیکن مقابل محدود شده باشد بلکه هیچ انتخاب  $y$  دیگری هم وجود نداشته باشد که مقدار پیامد آن برای بازیکن اول از  $x$  بیش‌تر بشود و یا در صورتی که هیچ حرکتی برای افزایش پیامد بازیکن نیز موجود نباشد.

تعادل SEQ: این تعادل همانند تعادل GMR تعریف می‌شود با این تفاوت که بازیکنان تنها حرکتی را انجام می‌دهند که منجر به بهبود پیامد خود شوند و هدف از حرکت کاهش پیامد حریف نیست. در حقیقت بازیکنان در این تعادل محافظه‌کار ولی ریسک‌پذیر نیز هستند. تعادل SEQ دارای آینده‌نگری متوسط (دو حرکت)، اطلاع تنها از اولویت خود و فاقد تمایل به عدم پیشرفت است.

## ۲-۴ مطالعه موردی

در مطالعه پیش‌رو به منظور بررسی نحوه عملکرد و کارایی روش تحقیق از محدوده مطالعاتی باد-خالدآباد استفاده شده است. محدوده مطالعاتی باد-خالدآباد با کد ۴۸۰۳ در حوضه آبریز کویرهای سیاهکوه، ریگ زرین و دق سرخ با کد ۴۸ واقع شده است. حوضه آبریز کویرهای سیاهکوه، ریگ زرین و دق سرخ با وسعت ۴۸۵۹۹ کیلومترمربع در بخش میانی کشور و مابین طول‌های جغرافیایی  $۵۱^{\circ} ۳۰'$  و  $۵۵^{\circ} ۳۰'$  و عرض‌های جغرافیایی  $۱۵^{\circ} ۳۱'$  و  $۳۴^{\circ} ۰۰'$  واقع شده است. دشت‌های حوضه آبریز دارای مساحتی برابر با ۲۳۰۹۴ کیلومترمربع بوده که حدود ۴۸٪ از کل وسعت حوضه آبریز را شامل می‌شود و ارتفاعات آن با مساحتی برابر با ۲۵۵۰۵ کیلومترمربع حدود ۵۲٪ از کل وسعت حوضه آبریز را پوشش می‌دهند. حوضه آبریز کویرهای سیاهکوه، ریگ زرین و دق سرخ به ۱۱ محدوده مطالعاتی تقسیم شده است.

محدوده مطالعاتی باد خالد-آباد با وسعت ۱۸۵۱/۴ کیلومتر مربع در شمال غرب حوضه آبریز واقع شده و حدود ۴٪ آبریز حوضه کویرهای سیاهکوه، ریگ زرین و دق سرخ را در بر می‌گیرد. وسعت ناحیه دشتی این محدوده مطالعاتی ۸۳۸/۷ کیلومتر مربع و وسعت ارتفاعات آن ۱۰۱۲/۷ کیلومتر مربع است. شکل ۱ نشان‌دهنده موقعیت محدوده مطالعاتی باد-خالدآباد در استان اصفهان است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی باد-خالدآباد در استان اصفهان

### ۳- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش از مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز و نظریه بازی‌ها با هدف رفع مناقشات موجود در محدوده مطالعاتی استفاده شده است. در ابتدا مدل سازی جریان آب زیرزمینی در شرایط ماندگار به وسیله کد MODFLOW انجام شد و پس از واسنجی ضریب هدایت هیدرولیکی و مقایسه سطح آب مدل شده با مشاهداتی، جریان آب زیرزمینی به صورت ناماندگار در طول ۱۲ ماه سال زراعی ۸۹-۹۰ مدل شد. در این مرحله نیز آبدهی ویژه ویژه و میزان تغذیه کالیبره شدند. مقادیر خطای RMSE معادل با ۰/۳۷ در مرحله واسنجی در جریان ناماندگار به دست آمد. سپس با استفاده از نتایج واسنجی جریان آب زیرزمینی در طول ۱۲ ماه سال زراعی ۹۰-۹۱ صحت سنجی شده و مقدار خطای RMSE به ترتیب برابر با ۰/۴۸ به دست آمد. با توجه به دقت مناسب در مراحل واسنجی و صحت سنجی جریان آب زیرزمینی در طول ۵ سال نیز مدل سازی شد.

با توجه به هدف کنترل کیفیت آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی، تغییرات شوری نیز به کمک کد MT3DMS مدل سازی شد. تغییرات شوری در آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی همانند مراحل شبیه‌سازی کمی جریان آب واسنجی و صحت‌سنجی شد و در نهایت مدل با ۲/۷٪ خطا در واسنجی ایجاد شد.

براساس شرایط موجود در محدوده مطالعاتی و وجود دو ذینفع کشاورزان و دولت، مدل بهینه بر اساس دو هدف کمینه نمودن افت سطح آب زیرزمینی و بیشینه نمودن سود کشاورزان به ازای کاشت محصولات زراعی در نظر گرفته

شد. به منظور بررسی روند تصمیم‌گیری کشاورزان و دولت به عنوان دو بازیکن نظریه بازی‌ها از ۳ استراتژی استفاده شده است. استراتژی اولیه در نظر گرفته شده استمرار وضعیت موجود در محدوده مطالعاتی باد-خالدآباد است. در این استراتژی با استفاده از اطلاعات تاریخی در طول ۵ سال مدل سازی، سطح کشت هر محصول به عنوان میانگین سطح کشت در ۵ سال و تغییرات سطح آب معادل وضعیت شبیه‌سازی شده در MODFLOW در نظر گرفته شده است. در واقع این استراتژی نشان دهنده نحوه استمرار وضعیت موجود در طول ۵ سال است و نتایج استفاده شده در این استراتژی تنها از مدل شبیه‌ساز استخراج شده است.

در دومین استراتژی مدل بهینه با دو هدف پیشینه نمودن سود کشاورزان و کمینه نمودن افت سطح آب اجرا می‌شود. محدودیت‌های اعمال شده در این استراتژی برای تغییرات ممکن سطح کشت هر محصول معادل با ۰/۸ الی ۱/۲ میانگین تاریخی سطح کشت محصولات در محدوده مطالعاتی است. در سومین استراتژی سطح کشت اختصاص داده شده به محصولات با نیاز آبی زیاد و همچنین محصولات کم‌درآمد کاهش یافته و به محصولات پردرآمدتر که نیاز آبی به نسبت کمتری دارند سطح کشت بیشتری اختصاص داده شده است. مابین محصولات موجود یونجه و طالبی دارای بیشترین نیاز آبی هستند و جو هرچند دارای کمترین نیاز آبی است ولی دارای کمترین عملکرد نیز است. با توجه به اینکه حذف کامل یک محصول در محدوده مطالعاتی به دلیل عوامل اجتماعی و نیاز خانوارها ممکن نیست مقدار حداقل تأمین ۴۰٪ میانگین موجود و حداکثر تأمین ۸۰٪ میانگین برای سه محصول جو، یونجه و طالبی در نظر گرفته شده است. برای سه محصول دیگر گندم، ذرت و پیاز با توجه به نیاز آبی متوسط و همچنین عملکرد بالا در این استراتژی امکان افزایش سطح کشت تا ۱/۵٪ سطح کشت میانگین در نظر گرفته شده است.

به منظور بررسی روند تصمیم‌گیری کشاورزان و دولت در مقابل این ۳ استراتژی از ایجاد بازی الگوی کشت و بررسی انواع تعادل در بازی‌های غیرهمکارانه استفاده شده است. در واقع در این بازی هر ذینفع ابتدای سال اول مدل سازی برای کل دوره ۵ سال تصمیم‌گیری می‌کند و در طول دوره ۵ سال امکان تغییر استراتژی برای ذینفعان وجود نخواهد داشت.

در این بازی برای دولت امکان انتخاب ۳ استراتژی وجود دارد. استراتژی بدبینانه که در محدوده مطالعاتی هیچ اقدامی از سوی دولت در راستای محدود کردن برداشت صورت، استراتژی نیمه‌خوشبینانه که توسط دولت در این استراتژی تاثیر تغییر الگوی کشت بر تغییرات سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است و میزان برداشت متناسب با برداشت بهینه در صورت تغییر در الگوی کشت در نظر گرفته شده است. در این حالت برداشت در کل محدوده معادل ۷۵/۵ میلیون متر مکعب محدود می‌شود و استراتژی خوشبینانه که دولت سطح کشت بهینه ایجاد شده براساس الگوی کشت موجود در محدوده مطالعاتی را مورد بررسی قرار داده است و به صورتی که در این شرایط میزان برداشت معادل ۷۱ میلیون متر مکعب محدود می‌شود. پس از محاسبه مقادیر پیامد به ازای هر ترکیب انتخاب استراتژی از سوی دولت و کشاورزان بازی الگوی کشت در فرم ماتریسی مطابق با شکل ۲ نتیجه شده است.

امکان انتخاب ۳ استراتژی برای کشاورزان نیز وجود دارد. استراتژی کم‌درآمد که معادل ادامه الگوی کشت شرایط موجود است، استراتژی نیمه سودآور که معادل همان الگوی کشت بهینه براساس شرایط موجود نتیجه شده از مدل بهینه‌ساز- شبیه‌ساز است و استراتژی سودآور که معادل تغییر الگوی کشت و تخصیص بیشتر سطح کشت به محصولات پیاز، ذرت و گندم است.

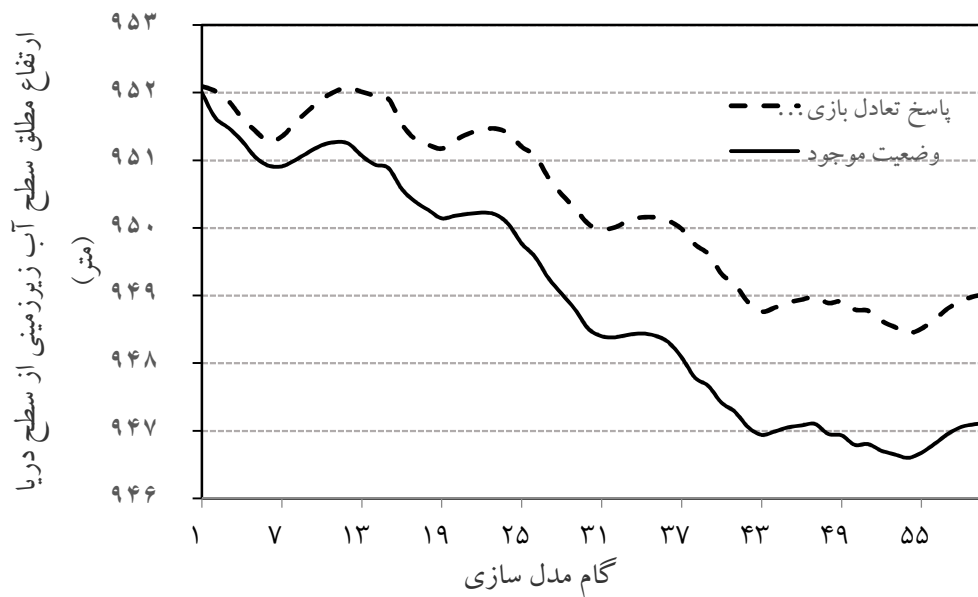
در نهایت ترکیب انتخاب استراتژی خوشبینانه از سوی دولت و استراتژی سودآور از سوی کشاورزان به عنوان پاسخ در تعادل نش، GMR، SMR و SEQ مشخص شده است. این ترکیب تنها ترکیبی است که برای هر دو ذینفع پاسخ متعادل است.

کشاورزان

	استراتژی سودآور	استراتژی نیمه سودآور	استراتژی کم درآمد
استراتژی بدبینانه	(۱، ۹)	(۱، ۸)	(۱، ۴)
استراتژی نیمه بدبینانه	(۲، ۷)	(۲، ۵)	(۲، ۳)
استراتژی خوشبینانه	(۳، ۶)	(۳، ۲)	(۳، ۱)

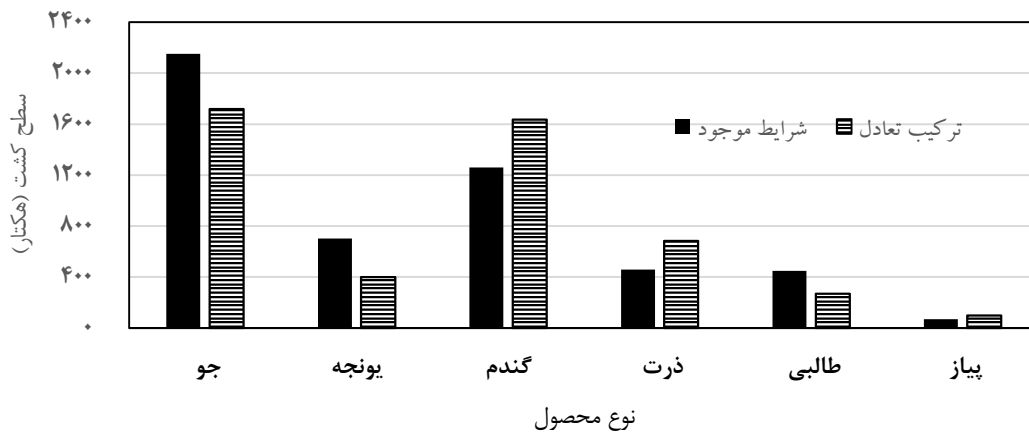
شکل ۲- مقادیر پیامد برای دو ذینفع دولت و کشاورزان در بازی الگوی کشت

براساس نتایج به دست آمده از مدل بهینه‌ساز- شبیه‌ساز به ازای این ترکیب استراتژی تغییرات سطح آب مدل سازی شده در طول ۵ سال مطابق شکل ۳ نتیجه شده است. با توجه به محدودیت اعمال شده در استراتژی تغییر الگوی کشت یا سودآور برای کشاورزان، در مجموع محدوده مطالعاتی سطح کشت جو ۲۰٪، یونجه ۳۸٪ و طالبی به اندازه ۴۰٪ نسبت به میانگین موجود کاهش یافته‌اند. یونجه و طالبی به دلیل نیاز آبی زیادتر نسبت به جو با کاهش سطح بیش تری مواجه شده‌اند. در این استراتژی سطح کشت سه محصول گندم، ذرت و پیاز نسبت به میانگین افزایش یافته است. ذرت به دلیل عملکرد بالا و نیاز آبی کم دارای بیش‌ترین افزایش سطح کشت معادل ۴۰٪ است. سطح کشت پیاز نیز ۳۷٪ و گندم ۲۴٪ در این استراتژی مطابق شکل ۴ افزایش یافته است.



شکل ۳- تغییرات سطح آب در ازای پاسخ تعادل بازی الگوی کشت





شکل ۴- مقایسه سطح کشت محصولات غالب در محدوده مطالعاتی بادخالد-آباد در شرایط موجود و پاسخ تعادل

بنابراین روند تصمیم‌گیری دولت در مقابل اعمال محدودیت‌های متفاوت در برداشت از آبخوان و کشاورزان در مقابل انتخاب الگوی کشت‌های متفاوت به صورتی خواهد بود که دولت بیش‌ترین محدودیت در برداشت آبخوان را اعمال کرده و خوشبینانه‌ترین استراتژی را انتخاب می‌کند و کشاورزان در راستای دستیابی به بیش‌ترین منفعت در این شرایط استراتژی سود آور را انتخاب خواهند کرد. به این معنی که دولت با اعمال ضرایب تعدیل در سه زون ۱، ۲ و ۳ و حذف تمامی اضافه برداشت‌ها در زون ۲ میزان برداشت کشاورزان را محدود به ۷۱ میلیون متر مکعب در سال کرده و کشاورزان با انتخاب استراتژی تغییر الگوی کشت به بیش‌ترین سود در این شرایط معادل با ۴۶۱ میلیارد ریال دست پیدا می‌کنند.

#### ۴- مراجع

- Alizadeh, M.R., Nikoo, M.R., Rakhshandehroo, G.R., (2017) "Developing a multi-objective conflict-resolution model for optimal groundwater management based on fallback bargaining models and social choice rules: a case study", *Water resources management*, 31(5), PP. 1457-1472 .
- Konikow, L.F., Kendy, E., (2005) "Groundwater depletion: A global problem", *Hydrogeology Journal*, 13(1), PP. 317-320 .
- López-Corona, O. et al., (2013) "Playing with models and optimization to overcome the tragedy of the commons in groundwater", *Complexity*, 19(1), PP. 9-21 .
- Ostrom, E., (2010) "Beyond markets and states: polycentric governance of complex economic systems", *Transnational Corporations Review*, 2(2), PP. 1-12 .
- 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), PP. 3905-3918 .
- Raquel, S., Ferenc, S., Emery, C., Abraham, R., (2007) "Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico", *Journal of environmental management*, 84(4), PP. 560-571 .
- Von Neumann, J., Morgenstern, O., 1945. *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press Princeton, NJ .

## Game theory in groundwater resource conflict management

Sara Nazari<sup>1,\*</sup>, Azadeh Ahmadi<sup>2</sup>, Babak Ebrahimi<sup>3</sup>

1- M.Sc., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology,  
Isfahan, Iran, sara.nazari@cv.iut.ac.ir

2- Associated Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of  
Technology, Isfahan, Iran, aahmadi@cc.iut.ac.ir,

3- Ph.D., Regional Water Company of Isfahan, mbeb50@yahoo.com

### Abstract

In the current condition, due to the excessive withdrawal of groundwater resources as the main source of water supply, a sharp drop in groundwater levels and increase in salinity in most arid and semi-arid regions has been created. Groundwater resource management has always been accompanied by numerous conflicts and severe crisis in available water supplies, in response to a growing needs. One of the most sufficient theories for solving conflicts is the game theory which is used in this study. The research methodology is based on the principle that the government's objective is to reduce the withdrawal from the aquifer and to reduce the water level depletion and the farmers' objective is to increase profits and consequently increase the aquifer extraction. In this study, groundwater flow and salinity changes were modeled for 5 years, and then the optimization model was created and connected directly to the quantitative and qualitative simulator models. In the following, different strategies for both beneficiaries are developed and non-cooperative games are used to examine how decisions are made. The final stable state in game theory indicates an increase of more than 2 meters in the water level and an increase in the profit of 43 billion Rials of farmers at the end of the 5-year modeling.

**Key words:** Common-pool, Non-cooperative game theories, MODFLOW, MT3DMS