تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸
Volume 15, No. 3, Fall 2019 (IR-WRR)
۲۹۴-۳۰۳

بررسی اثرات بازخرید آب توسط بانک آب با استفاده از مدل‌سازی عامل-بنیان

وحید آقائی[۱]، حسین علیزاده[۲*]، عباس افشار[۳] و مجید احتیاط[۴]

چکیده

بانک آب به عنوان ابزاری کارا و مؤثر برای استفاده پایدار از منابع آبی و تخصیص بهینه منابع آبی بین کاربران در منطقه‌های خشک شناخته می‌شود. بانک‌های آب شرایط داد و ستد قانونی انواع آب سطحی و آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند و با مدیریت مصرف و ذخیره آب امنیت آبی را برای منطقه به ارمغان می‌آورند. در این مقاله یک مدل ترکیبی هیدرولوژیکی و عامل‌بنیان در نرم‌افزار NetLogo به منظور بررسی اثرات هیدرولوژیکی و اقتصادی بازخرید حق‌آبه‌های کشاورزان و ذخیره آنها در آبخوان دشت رفسنجان توسعه داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بازخرید حق‌آبه کشاورزان توسط بانک آب در دشت رفسنجان می‌تواند به تعادل‌بخشی آبخوان کمک کند، ولی برای احیای آبخوان باید با سیاستهای دیگری از جمله کاهش حق‌آبه‌ها بر اساس منابع آبی در دسترس ادغام شود. همچنین، بر مبنای نتایج می‌توان اظهار نمود که بازخرید حق‌آبه‌ها توسط بانک آب دارای عملکرد مؤثر هیدرولوژیکی است به گونه‌ای که انتظار می‌رود با اجرای سیاست بانک آب در منطقه، میانگین افت ۸۰ سانتی‌متر در سال تراز آبخوان به میانگین افت ۵۸ سانتی‌متر در سال کاهش یابد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که عملکرد بانک منجر به بهبود وضعیت اقتصادی در منطقه شده به طوری که خرید حق‌آبه کشاورزان توسط بانک آب سبب افزایش سود خالص کشاورزان به مقدار ۶ درصد خواهد شد.

کلمات کلیدی: بانک‌داری آب، مدل عامل-بنیان، دشت رفسنجان، بازخرید آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۳/۱۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۲۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۴- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، دانشگاه اردکان.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

An Agent-Based Model to Evaluate Water Bank's Buyback Program

V. Aghaie[1], H. Alizadeh[2], A. Afshar[3], and M. Ehtiat[4]*

Abstract

Leading towards sustainable water use and optimal allocation of water resources, water banks are efficient institutions. Water banks facilitate the trade of surface water and groundwater and engender water security. This study develops a couple agent-based groundwater model in NetLogo platform to assess economic and hydrologic impacts of water bank's water buyback programs in the case study of Rafsanjan Plain. Results show that buyback programs can temporarily ameliorate the condition of the Rafsanjan Aquifer, so there is a need for taking other measures, like the cap-and-trade policy, in conjunction with buyback program. The drawdown of aquifer's unit hydrograph reduces from 80 to 58 cm per year owing to the buyback program. Moreover, the water bank improves the economic situation of the area as it increases the farmers' net benefit by 6 percent.

Keywords: Water Bank, Agent-Based Modeling, Rafsanjan Plain, Buyback Program.

Received: June 7, 2019
Accepted: September 13, 2019

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.
2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology. Email: alizadeh@iust.ac.ir
3- Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.
4- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Ardakan University.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

در حالی که نگرانی‌های زیست‌محیطی در حال افزایش است، تخصیص مؤثر آب بین کاربری‌های گوناگون از چالش‌های دنیای امروز می‌باشد (Grafton and Horne, 2014) بطوری‌که میزان آب شیرین موجود در جهان بسیار متغیر و در بسیاری از مناطق سرانه آب‌شیرین موجود در حال کاهش است. دو رویکرد کلیدی در مواجهه با بحران کاهش منابع آبی و افزایش تقاضا وجود دارد که شامل مدیریت تقاضا مانند: آموزش، تنظیم مقررات، برنامه‌ریزی و ایجاد انگیزه‌های اقتصادی و افزایش عرضه آب، مانند: افزایش زیرساخت‌هایی نظیر سد و شیرین‌سازی آب، می‌باشند. در حالی که به نظر میرسد افزایش میزان عرضه یکی از راهکارهای ضروری است، اتخاذ این رویکرد به تنهایی نمی‌تواند تأمین نیازهای آبی رو به افزایش را برآورده کند. در واقع این رویکرد تناقضی در معنای افزایش عرضه و نتیجه آن است از آنجا که تلاش‌ها برای افزایش عرضه بدون در نظر گرفتن مدیریت تقاضا (آموزش نحوه مدیریت مصرف و صرفه‌جویی)، ممکن است شوک عرضه‌ی بزرگتری را بر مستمندان، افراد آسیب‌پذیر جامعه و محیط زیست تحمیل کند (Wheeler et al., 2017; Grafton and Wheeler, 2018; Alamdarlo et al., 2019).

یکی از رویکردهای پربازده مدیریت تقاضای آب، ایجاد بانک آب است. بانک آب یک نهاد حقوقی یا حقیقی است که شرایط داد و ستد قانونی انواع آب سطحی و آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. نهاد بانک آب می‌تواند نقش‌هایی نهادی از جمله تعیین حداقل نیاز زیست‌محیطی، تأیید صلاحیت فعالان بازار، عقد قراردادهای مبادله آب، تعیین قیمت‌های مبادله و فراهم نمودن و تعیین کردن شرایط و مقررات مبادلات را به عهده گیرد (Xu et al., 2018). ساختارهای بانک آب بیشتر ماهیتی نهادی داشته و به صورت یک نهاد دولتی یا خصوصی به عنوان واسطه عمل کرده و شرایط داد و ستد (بین کشاورزان یا بین کشاورزان با بانک) را فراهم می‌کند و گاهی مسئولیت تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی و مسائل اجتماعی را نیز می‌پذیرد (Montilla-López et al., 2018). از بانک‌های موجود می‌توان به بانک آب ایالت آریزونا در امریکا اشاره کرد که برای تأمین امنیت آبی به ذخیره‌سازی آب رودخانه کلرادو می‌پردازد (Zareei, 2018).

یکی از روش‌های مدیریت و تأمین حداقل نیاز زیست‌محیط در شرایط کمبود، کاهش حق‌آبه کاربران است. رویکرد دیگر در نظر گرفتن محیط‌زیست به عنوان یک کاربر و خرید حق‌آبه توسط دولت یا بانک آب به منظور فراهم کردن حداقل نیاز زیست‌محیطی است. در نتیجه، تخصیص حق‌آبه به کاربران باید متناسب با منابع آبی موجود باشد و نیاز زیست‌محیطی نیز مانند دیگر کاربران در نظر گرفته شود (Grafton and Horne, 2014; Erfani et al., 2015). در این بین معمولاً انتقادات از رویکرد کاهش حق‌آبه‌ها به علت عدم تمایل سیاست‌مداران برای کاهش حق‌آبه‌ها و عدم رضایت کشاورزان شکل می‌گیرد. از طرف دیگر، در نظر گرفتن حق‌آبه‌های زیست‌محیطی به پیچیده‌تر شدن فرآیندهای مربوط به مدیریت منابع آبی می‌انجامد. از طرف دیگر، بانک‌داری آب پدیده‌ای وابسته به تصمیمات نهاد بانک آب و کاربران است که به پیچیدگی مسأله می‌افزاید. همچنین، تغییرات آب و هوایی و اقلیم منطقه و اندرکنش منابع آبی (سطحی و زیرزمینی) مدیریت مسأله را پیچیده‌تر می‌کند. بنابراین، بانک آب را می‌توان یک سیستم سازگار پیچیده در نظر گرفت. سیستم سازگار پیچیده به سیستمی گفته میشود که شامل عوامل مستقل، تأثیرگذار روی هم و سازگار باشد (Macal and North, 2005; Yang et al., 2011).

به طور کلی برای شبیه‌سازی و تحلیل یک سیستم، دو رویکرد متمرکز و غیرمتمرکز وجود دارد. در دیدگاه‌های متمرکز، با استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی، فرض می‌شود که تمام بازیگران مسأله کاملا منطقی رفتار می‌کنند و در نتیجه می‌توانند تصمیم‌های کاملاً بهینه بگیرند. البته اینگونه فرض‌ها در تئوری برای حل مسائل بسیار مفیدند، در عین حال مبتنی بر شناخت کامل از رفتار انسان‌اند که عملی نیست. معمولاً دو دلیل عمده برای محدودیت کارایی رویکردهای متمرکز وجود دارد: اولاً وقتی انسان با مسائل پیچیده مواجه میشود، قابلیت کاملاً منطقی رفتار کردن را ندارد و به عبارت ساده‌تر، منطق انسان محدود است. دومین دلیل آن است که در فعل و انفعالات پیچیده عاملان، هیچ عاملی نمی‌تواند مطمئن باشد که بقیه چگونه رفتار خواهند کرد و در نتیجه مجبور است رفتار دیگر بازیگران را حدس بزند تا بتواند در مورد رفتار خود تصمیم‌گیری کند. در نقطه مقابل، رویکردهای غیرمتمرکز دیدگاهی جزء به کل دارند و تمام روابط بین اجزاء سیستم را در نظر می‌گیرند و از این رهگذر به نتیجه کلی سیستم پی می‌برند. همچنین، رویکردهای غیرمتمرکز کاربرد بسیار وسیعی برای تحلیل و فهم سیستم‌های سازگار پیچیده دارند. یکی از انواع رویکردهای غیرمتمرکز، مدل‌سازی عامل–بنیان است. این روش برای درک رفتار سیستم‌های متشکل از اجزاء مستقل، دارای تعامل و سازگار، مناسب بوده و امکان فهم و تحلیل سیستم‌های سازگار پیچیده مثل بانک آب را فراهم می‌نماید (Arthur, 1994; Macal and North, 2005; Du et al., 2017). در این راستا محققین متعددی سیستم‌های اجتماعی–زیست‌محیطی را زیرمجموعه‌ای از سیستم‌های سازگار پیچیده طبقه‌بندی کرده‌اند و برای درک و تحلیل آنها از مدل‌سازی عامل‌بنیان

استفاده کرده‌اند (Ohab-Yazdi and Ahmadi, 2017; Najjar-Ghabel et al., 2019; Anbari and Zarghami, 2019). در این مطالعه برای شبیه‌سازی ایده بانک‌داری آب از نرم‌افزار NetLogo، یک محیط برنامه‌نویسی عامل-بنیان برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده، استفاده شده است. محیط نرم‌افزاری NetLogo دارای افزونه‌ها و ابزارهای فراوانی است که روند شبیه‌سازی را بسیار سرعت می‌بخشند: از جمله افزونه GIS (برای فراخوانی لایه‌های GIS)، Matrix (برای عملیات ماتریسی)، BehaviorSearch (برای بهینه‌سازی و جستجوی یک رفتار خاص سیستم به وسیله الگوریتم‌های فراکاوشی) و BehaviorSpace (برای تغییر متغیرهای سیستم و جستجوی اثر این تغییرات) (Castilla-Rho et al., 2015; Wilensky and Rand, 2015)

۲- مورد مطالعاتی؛ دشت رفسنجان

دشت رفسنجان در حوضه آبریز درجه دو درانجیر-ساغند قرار گرفته است و شامل بیش از ۶۰ هزار هکتار باغ پسته است، که با منابع آب زیرزمینی آبیاری می‌شوند. دشت رفسنجان در محدوده استان‌های کرمان و یزد قرار گرفته است و جزء مناطق با اقلیم خشک محسوب می‌شود. منبع اصلی تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت دشت رفسنجان آب زیرزمینی است. در سالهای اخیر تخلیه بیش از حد آبهای زیرزمینی موجب افت سطح آبخوان به میزان متوسط ۸۰ سانتی‌متر در سال شده است. افت بیش از اندازه سطح آب دشت رفسنجان باعث به وجود آمدن مشکلاتی از قبیل: افزایش هزینه پمپاژ، خشک شدن بعضی از چاهها، ایجاد پدیده فرونشست زمین و کاهش سود خالص کشاورزان منطقه شده است (Karamouz et al., 2011; Rahnama and Zamzam, 2013; Shajari, 2015). موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در آبخوان دشت رفسنجان، که از نوع سفره زیرزمینی آزاد است، بیش از ۱۴۲۴ چاه کشاورزی، شرب و صنعت قرار دارد که برای تأمین نیاز آبی این محدوده مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. موقعیت مکانی پیزومترهای فعال موجود در آبخوان، چاه‌های کشاورزی و شرایط مرزی آبخوان دشت رفسنجان در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

۳- روش تحقیق

در این بخش یک چارچوب مدل‌سازی عامل بنیان ارائه می‌گردد که در آن به چگونگی تصمیم‌گیری عوامل کشاورز در مورد قیمت و حجم پیشنهادی فروش آب، و تصمیم عامل بانک در مورد حجم و قیمت پیشنهادی خرید آب پرداخته شده است. سپس مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده معرفی شده است.

۳-۱- تصمیم‌گیری عوامل کشاورز برای فروش حق‌آبه

این مدل شامل ۳۰۰ عامل کشاورز برای آبخوان دشت رفسنجان است که هر کدام مبتنی بر تمایل‌ها و نرخ یادگیری که دارند قیمت‌های پیشنهادی خود را در طول زمان به‌روزرسانی می‌کنند. هر عامل کشاورز نیاز آبی خود را طبق مدل زیر تخمین می‌زند (Smajgl et al., 2009):

$$ID_{it}=\frac{RMW_{it}-PCP_{it}}{100}\times A_i \qquad (۱)$$

که در آن ID_{it} با واحد مگا لیتر بر سال نشان‌دهنده نیاز آبی عامل i ام در گام زمانی t ام، RMW_{it} با واحد میلی‌متر بر مترمربع، بیانگر نیاز آبی توصیه شده، PCP_{it} با واحد میلی‌متر بر مترمربع بارش منطقه عامل i ام در گام زمانی t ام و A_i با واحد هکتار سطح زیر کشت عامل i ام می‌باشند.

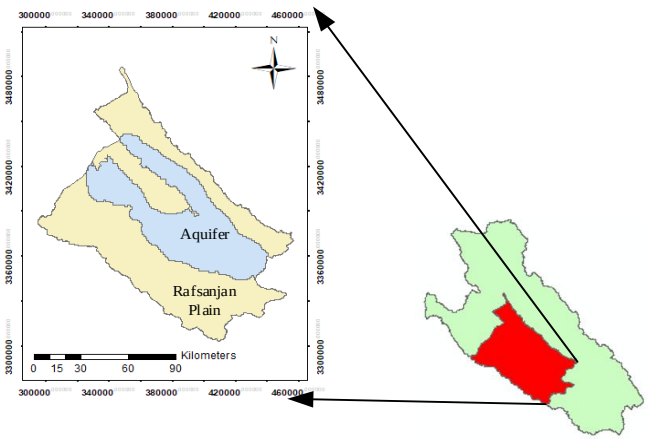


Fig. 1- The location of the case study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

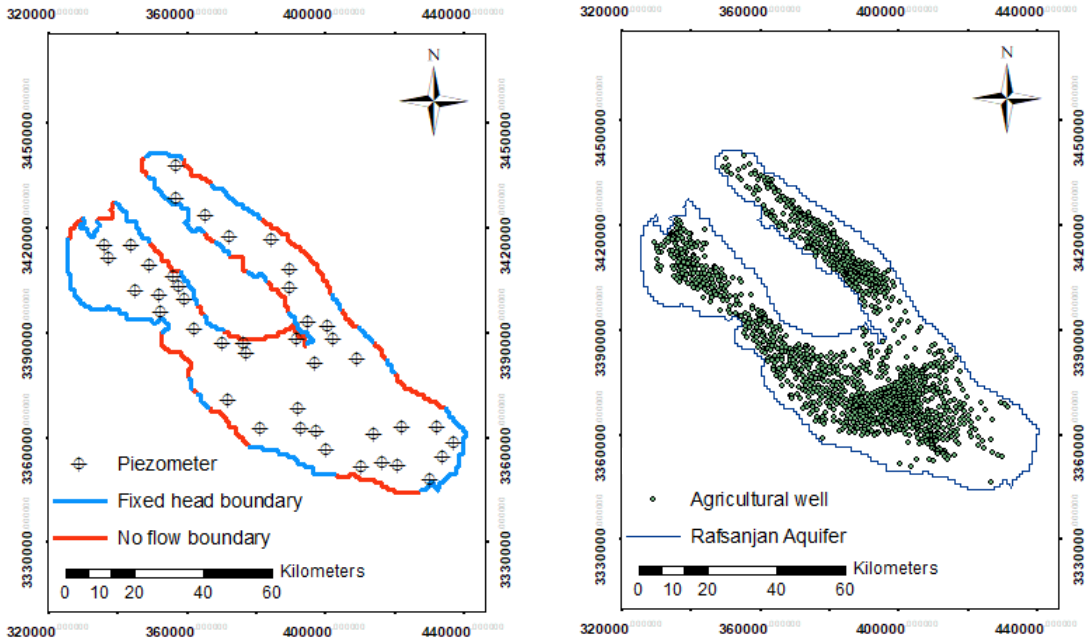


Fig. 2- The location of piezometers, wells and boundary condition of Aquifer

شکل ۲- شرایط مرزی و موقعیت پیزومترها و چاه‌های موجود آبخوان

در این بخش به نظر می‌رسد که تمام کشاورزان ممکن است انگیزه کم‌آبیاری به منظور حصول سود بیشتر را داشته باشند. برای بدست آوردن میزان کم‌آبیاری کشاورزان یک رفتار که عبارت است از انگیزه‌ی کم آبیاری St_{it} به کشاورزان اختصاص داده شده است. انگیزه کم‌آبیاری متغیری تصادفی بوده و مقداری بین صفر تا یک دارد بطوری که اگر کشاورز اصلاً اقدام به آبیاری نکند مقدار آن برابر صفر بوده و در حالتی که کشاورز تصمیم به آبیاری بدون تنش دارد مقدار St_{it} برابر یک است. در نتیجه تمام کشاورزان میزان نیاز آبی خود را بر اساس دو متغیر انگیزه کم‌آبیاری St_{it} و نیاز آبی بدون کم‌آبیاری ID_{it} به صورت زیر به‌روزرسانی می‌کنند:

$$ID'_{it}=ID_{it}\times St_{it} \qquad (۲)$$

$$St_{it}:r.v. \quad 0\le St_{it}\le 1 \qquad (۳)$$

که در آن ID'_{it} میزان نیاز آبی عامل i–اُم در گام زمانی t–اُم با در نظر گرفتن کم‌آبیاری است. شایان ذکر است، متغیر تصادفی ID_{it} در ابتدای دوره شبیه‌سازی با توزیع یکنواخت بین صفر و یک توزیع شده است. سپس این متغیر تصادفی با گذشت زمان مشروط بر بازخورد اطلاعات سود و زیان کشاورزان موجود در حافظه آنها و با هدف بیشینه شدن سود خالص بروزرسانی می‌شود.

مقدار عرضه و تقاضا نیز از اختلاف نیاز آبی و میزان حق‌آبه بصورت رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q_{it}=(WP_{it}-ID'_{it}) \qquad (۴)$$

که درآن Q_{it} نشان‌دهنده عرضه عامل i ام در گام زمانی t–ام می‌باشد و WP_{it} میزان حق‌آبه عامل i–ام در زمان t ام است که برابر با نرخ برداشت عامل‌ها طبق اطلاعات آماربرداری سال ۱۳۸۱ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است اگر Q_{it} برای کشاورزی منفی باشد کشاورز آبی به بانک آب عرضه نمی‌کند.

در تئوری، کشاورزانی که تصمیم به فروش حق‌آبه خود گرفته‌اند حاشیه منفعتی برابر با صفر دارند. اگرچه با فرض اینکه عرضه‌کنندگان می‌توانند با یک استراتژی منطقی حاشیه منفعت عرضه خود را تعیین کنند، از رابطه زیر برای تعیین حاشیه منفعت کشاورزان استفاده شده است (Smajgl et al., 2009):

$$MB_{it}=(Y_{it}^{p(w)}-Y_{it}^{a(w-1)})\times pr_{it} \qquad (۵)$$

که در آن $Y_{it}^{a(w-1)}$ و $Y_{it}^{p(w)}$، هر دو با واحد تن در هکتار، به ترتیب میزان تولید محصول عامل i ام در گام زمانی t ام با تنش آبی (به میزان یک واحد کمتر از نیاز آبی) و بدون تنش آبی و pr_{it} قیمت محصول عامل i ام در گام زمانی t ام است. در نهایت کشاورزان قیمت پیشنهادی فروش آب خود را به صورت زیر تخمین می‌زنند:

$$p_{it}=(1+\mu_{it})\times\frac{MB_{it}}{1-\omega} \qquad (۶)$$

که در آن $\mu_{it}>0$، یک پارامتر بدون بعد و نشان دهنده میزان تمایل به سودجویی عامل‌های کشاورز است و در مرحله شروع فرآیند شبیه‌سازی برای تمام کشاورزان صفر در نظر گرفته شده است. همچنین $\omega\in[0,1]$ ضریب هزینه تراکنش است. همچنین عامل‌های کشاورز میزان تمایل

به سودجویی خود را طی زمان و طبق رابطه زیر به روزرسانی می‌کنند (Du et al., 2017):

$$\mu_{it+1}=\mu_{it}+\beta_i\times\frac{(1-\omega)\times(\tau_{it}-p_{it})}{MB_{it}} \quad (۷)$$

که در آن β_i یک پارامتر بدون بعد و نشان دهنده نرخ یادگیری عامل‌های کشاورز است که با توزیع یکنواخت به عامل‌ها اختصاص داده شده است.

۳-۲- تصمیم‌گیری بانک آب برای بازخرید آب

نهاد بانک آب به صورت یک عامل مستقل با خصوصیات رفتاری منحصربه‌فرد در مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است که بر اساس ترسالی یا خشکسالی اقدام به خرید آب به منظور تأمین نیاز زیست‌محیطی می‌کند. عامل نهاد طبق مدل تابع مطلوبیت Cobb-Douglas برای دو کالا منافع زیست محیطی را بیشینه می‌کند (Hamill and Gilbert, 2015):

$$U=A^{\alpha}\times B^{1-\alpha} \quad (۸)$$

که در آن A میزان آب مورد نیاز نهاد، B تمام کالاها و خدمات دیگر مورد نیاز نهاد و α میزان تمایل نهاد به تأمین نیاز آبی زیست‌محیطی می‌باشد. هرچه α بیشتر باشد، نهاد، تمایل بیشتری برای تأمین نیاز آبی زیست‌محیطی دارد. α به صورتی در مدل تعیین شده است که در مواقع ترسالی تمایل نهاد برای تأمین نیاز آبی زیست‌محیطی حداکثر باشد یعنی α به یک نزدیک شود. مقدار این پارامتر به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\alpha=\frac{PCP_t-PCP_{min}}{PCP_{max}-PCP_{min}} \quad (۹)$$

که در آن PCP_{max}، PCP_{min} و PCP_t به ترتیب بیشترین بارش دوره شبیه‌سازی، کمترین بارش دوره و بارش سال جاری می‌باشند. برای نهاد یک بودجه‌ی سالیانه ثابت، BC_t، تعریف شده است که این بودجه ثابت توسط دولت تعیین می‌شود. این بودجه ثابت طبق رابطه زیر هرساله با هدف تأمین نیازهای نهاد بانک آب تخصیص داده می‌شود و با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$BC_t=P_{At}\times A_t+P_{Bt}\times A_t \quad (۱۰)$$

که در آن P_{Bt} و P_{At} به ترتیب قیمت واحد کالاها و خدمات B و قیمت واحد آب در گام زمانی t ام می‌باشند. در تئوری اقتصاد خرد زمانی تابع مطلوبیت بیشینه می‌شود که شیب تابع مطلوبیت و شیب تابع درآمد مساوی شوند. شیب تابع مطلوبیت به صورت زیر برآورد می‌گردد:

$$MRS=\frac{\partial U/\partial A}{\partial U/\partial B}=\frac{\alpha A^{\alpha-1}B^{1-\alpha}}{1-\alpha A^{\alpha}B^{-\alpha}}=\frac{\alpha B}{(1-\alpha)A} \quad (۱۱)$$

با این توجه و از برابر قرار دادن شیب تابع مطلوبت و شیب تابع درآمد، رابطه زیر قابل ارائه است:

$$MRS=\frac{\alpha B}{(1-\alpha)A}=\frac{P_{At}}{P_{Bt}} \quad (۱۲)$$

و در نهایت میزان آبی که مطلوبیت بانک آب را بیشینه می‌کند برابر است با:

$$A^{*}=\frac{\alpha\times BC_t}{P_{At}} \quad (۱۳)$$

که در آن A^{*} مقدار بهینه نیاز آبی نهاد در گام زمانی t اُم است. بدین ترتیب نهاد بانک آب در دوره‌های ترسالی بیشترین نیاز آبی (به منظور ذخیره در آبخوان) و در مواقع خشکسالی کمترین نیاز آبی را دارد. همچنین قیمت پیشنهادی نهاد با توجه به رابطه زیر تعیین می‌شود (Gonzales and Ajami, 2019):

$$P_{At}=(1-\mu_{it})\times\eta_t \quad (۱۴)$$

که در آن $0<\mu_{it}<1$ پارامتری بدون بعد و نشان دهنده میزان تمایل به سودجویی عامل نهاد بانک است و در مرحله شروع فرآیند شبیه‌سازی صفر در نظر گرفته شده است. همچنین η_t میانگین قیمت سه دوره قبلی آب می‌باشد که بیانگر بیشترین قیمتی است که بانک حاضر به پرداخت است. در نهایت، بانک آب میزان تمایل به سودجویی خود را به صورت زیر به‌روزرسانی می‌کند (Du et al., 2017):

$$\mu_{it+1}=\mu_{it}+\beta_i\times(\tau_{it}-P_{At})/\eta_t \quad (۱۵)$$

۳-۳- مدل هیدرولوژیکی

زیرمدل هیدرولوژیکی در این تحقیق در واقع بخش آب‌زیرزمینی از ابزار FlowLogo است که توسط Castilla-Rho et al. (2015) در محیط نرم‌افزاری NetLogo توسعه یافته است. FlowLogo از ترکیب مدل‌های عامل-بنیان و مدل تفاضل محدود جریان آب‌زیرزمینی دوبعدی ایجاد شده است. شایان ذکر است که محیط نرم‌افزاری NetLogo داده‌های مورد نیاز شامل DEM، داده‌های چاه‌های کشاورزی و شرب و صنعت منطقه، داده‌های پیزومترهای موجود در منطقه، شیپ‌فایل شرایط مرزی آبخوان و غیره را در قالب لایه‌های GIS دریافت می‌کند. معادله حاکم بر جریان دوبعدی آب‌های زیرزمینی در آبخوان آزاد که در ابزار FlowLogo مورد توجه است به صورت زیر است (Castilla-Rho et al., 2015):

$$\frac{\delta}{\delta x}\left(K_x\times h\frac{\delta h}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(K_y\times h\frac{\delta h}{\delta y}\right)=S_y\frac{\delta h}{\delta t}+W(x.y.t) \quad (۱۶)$$

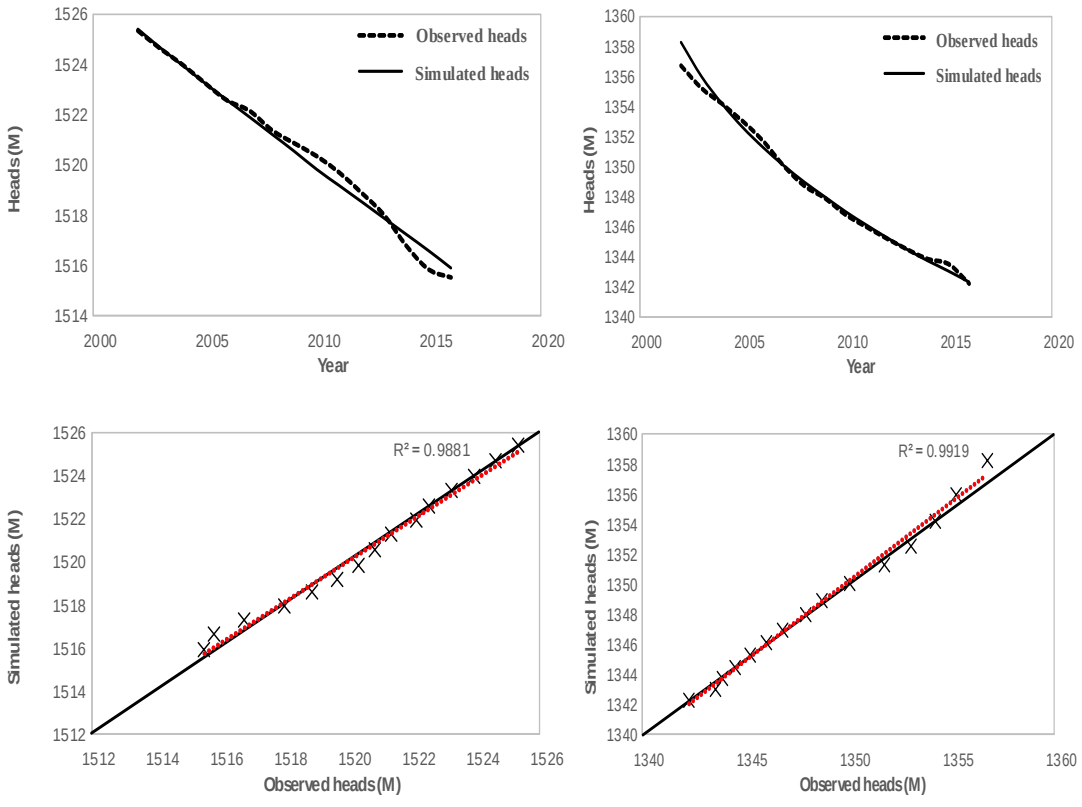
که در آن K_x و K_y با دیمانسیون $[LT^{-1}]$ نشان‌دهنده هدایت هیدرولیکی به ترتیب در راستای x و در راستای y، h [L] بیانگر هد هیدرولیکی درون مرز آبخوان، $W(x.y.t)$ $[LT^{-1}]$ نماینده میزان تخلیه و تغذیه‌ی آبخوان و S_y آبدهی ویژه، که بدون بعد است، می‌باشند. ابزار FlowLogo با حل عددی معادله ۱۶ به روش تفاضل محدود می‌تواند جریان آب‌زیرزمینی را در آبخوان‌های آزاد و بسته شبیه‌سازی کند.

۳-۴- کالیبراسیون مدل آب‌زیرزمینی

از آنجا که در حال حاضر هیچ نوع ساختار بازار رسمی در دشت رفسنجان موجود نبوده و اطلاعاتی از مبادلات احتمالی آب در شرایط اجرای نهاد بانک آب نیز در دسترس نیست، در این پژوهش برای کالیبراسیون مدل آب زیرزمینی از داده‌های مشاهداتی و محاسباتی تراز آب پیزومترهای آبخوان در سناریوی بدون نهاد بانک آب اکتفا شده است. فرایند کالیبراسیون مدل شبیه‌ساز آب‌زیرزمینی در دو مرحله جریان آب زیرزمینی پایدار و ناپایدار انجام شده است. به گونه‌ای که در مرحله اول، با فرض جریان پایدار در ماه فروردین سال ۸۲، اختلاف تراز مشاهداتی و محاسباتی ۴۲ پیزومتر موجود کمینه شد و ضرایب هدایت هیدرولیکی در ۴۲ سطح تاثیر پیزومتر با خطای RMSE برابر با ۵ متر بدست آمد. در مرحله دوم (جریان ناپایدار)، با کمینه کردن اختلاف تراز مشاهداتی و محاسباتی پیزومترهای موجود در یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۰-۱۳۸۱)، ضرایب آبدهی ویژه در ۴۲ سطح تاثیر پیزومتر با خطای RMSE برابر با ۱۵ متر بدست آمد. قابل ذکر است که برای کالیبراسیون مدل آب‌زیرزمینی از ابزار BehaviorSearch استفاده شده است. ابزار BehaviorSearch به وسیله زبان برنامه‌نویسی جاوا برنامه‌نویسی شده است و به منظور بهینه‌سازی قابلیت کوپل شدن با نرم‌افزار NetLogo را دارد. در شکل ۳ برای دو پیزومتر نمونه، مقادیر تراز محاسباتی و مشاهداتی مقایسه شده‌اند.

۴- نتایج

در این بخش به بررسی نتایج تحلیل و شبیه‌سازی پیاده‌سازی سیاست بانک‌داری آب و خرید حق‌آبه‌های کشاورزان به منظور احیای آبخوان دشت رفسنجان پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۴-الف نمایش داده شده است بانک آب با خرید حق‌آبه‌های کشاورزان توانسته است میانگین افت ۸۰ سانتی‌متر در سال را به ۵۸ سانتی‌متر در سال کاهش دهد و شرایط هیدرولوژیکی آبخوان را بهبود بخشد. همچنین شکل ۴-ب نشان می‌دهد که تحت سناریوی حالت فعلی، بدون بانک آب (NWB)، سود خالص کشاورزان در طول زمان کاهش می‌یابد. دلیل کاهش سود خالص کشاورزان افت سطح تراز آبخوان و در نتیجه افزایش هزینه پمپاژ است. از طرفی تحت سناریوی ایجاد بانک آب (WB)، سود خالص کشاورزان به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است که دلیل آن سود ناشی از فروش حق‌آبه به بانک آب است.



(a) (b)

Fig. 3- Comparing observed and simulated heads (a) piezometer #2 (b) piezometer #20

شکل ۳- مقایسه مقادیر تراز مشاهداتی و محاسباتی الف) پیزومتر ۲۰ و ب) پیزومتر ۲

این نتایج در راستای تحقیقات گذشته (Safari et al., 2016) نشان‌دهنده تأثیر مثبت اقتصادی بانک آب بر کشاورزان منطقه است. این شرایط در صورتی است که بانک آب به صورت میانگین سالیانه ۳۵۰ میلیارد تومان برای خرید حق‌آبه هزینه کرده است که این ذخیره‌سازی آب در بانک می‌تواند در دوره‌های خشکسالی امنیت آبی را به ارمغان آورد.

به منظور بررسی چگونگی عملکرد بانک آب در خرید حق‌آبه‌های کشاورزان، در شکل ۵ حجم و قیمت مبادلات نمایش داده شده است. با توجه شکل ۵-a و شکل ۴-b مشاهده می‌شود که در سال‌هایی که بر حجم خرید آب افزوده شده است، سود خالص کشاورزان افزایش قابل توجهی یافته است (مانند سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۴). قابل ذکر است که دلیل نوسان‌های قیمت و حجم آب در شکل ۵ به اندرکنش‌های عرضه و تقاضا مرتبط است. به گونه‌ای که عرضه‌کنندگان (کشاورزان) تلاش می‌کنند قیمت آب را بالا پیشنهاد دهند و در مقابل تقاضاکننده (دولت) نیز تلاش می‌کند با قیمت پایین‌تری آب را خریداری کند. بدین ترتیب عامل‌ها با توجه به موفقیت یا عدم موفقیت در تراکنش تمایل به سودجویی خود را تغییر داده و باعث می‌شوند قیمت مبادلات نوسان کنند و این نوسان قیمت مبادلات نیز بر میزان حجم تراکنش تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بانک آب موفق شده است به صورت میانگین سالیانه ۱۰۰ میلیون متر مکعب آب در آبخوان ذخیره کند. با توجه به اینکه کاربران دشت رفسنجان ۲۰۰ میلیون متر مکعب در سال بیشتر از میزان آبدهی ایمن آبخوان برداشت می‌کنند (Karamouz et al., 2011)، بانک آب نیاز به بودجه‌ی بیشتری از ۳۵۰ میلیارد تومان در سال نیاز دارد تا بتواند شرایط آبخوان را به صورت مؤثرتری بهبود ببخشد. البته باید بررسی سیاست‌های دیگر، از جمله ایجاد بازار آب بین کشاورزان، کاهش حق‌آبه‌های کشاورزان بر اساس منابع در دسترس، و ارتقاء تکنولوژی‌های آبیاری را نیز در دستور کار قرار داد زیرا ممکن است اختصاص بودجه‌ای بیشتر از این مقرون‌به‌صرفه، و یا امکان‌پذیر، نباشد.

شکل ۶ سری زمانی تغییرات ضریب جینی را در دو سناریوی ایجاد نهاد بانک آب (WB) و حالت فعلی (NWB) مقایسه می‌کند. ضریب جینی نشان‌دهنده چگونگی توزیع ثروت بین کاربران است به طوری که وقتی این ضریب به ۰ نزدیک می‌شود نشان‌دهنده عدالت کامل است و وقتی که به یک نزدیک می‌شود نشان‌دهنده ناهمگونی شدید در توزیع ثروت بین کشاورزان است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ایجاد نهاد بانک آب ضریب جینی را افزایش داده است. افزایش ضریب جینی به این دلیل است که با بودجه محدود نهاد، فقط تعدادی از کشاوران، یعنی کشاورزانی که قیمت مناسب‌تری برای فروش آب پیشنهاد داده‌اند، می‌توانند حق‌آبه خود را عرضه کنند. در نتیجه گروهی از کشاورزان افزایش سود را تجربه خواهند کرد و گروه دیگر افزایشی در درآمد ندارند. از این رو توزیع ثروت بین کشاورزان ناهمگون‌تر نسبت به سناریوی (NWB) شده است و ضریب جینی افزایش یافته است.

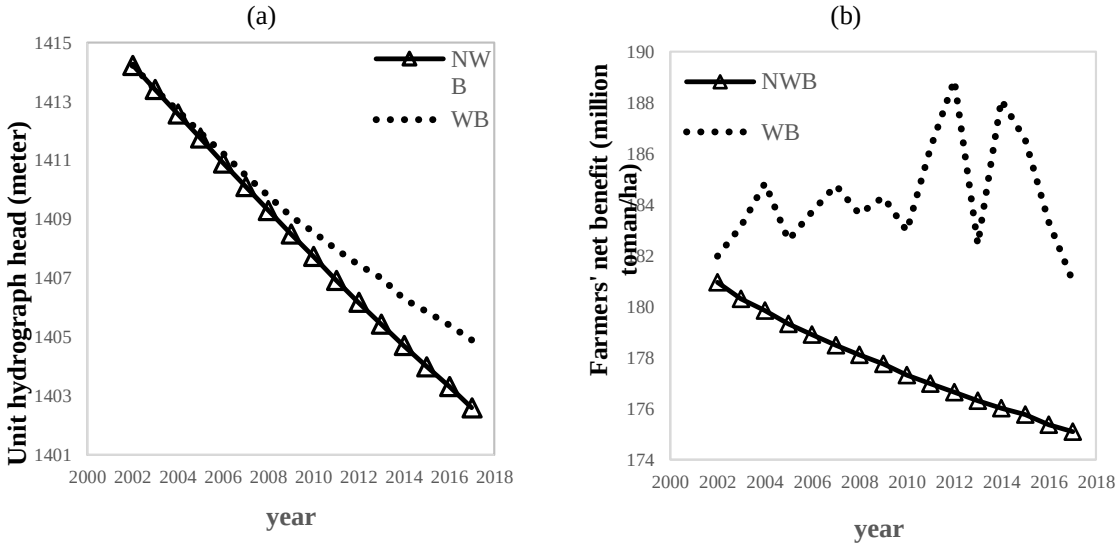


Fig. 4- (a) Aquifer's unit hydrograph and (b) farmers' net benefit; NWB and WB indicate no water bank and water bank scenarios, respectively.

شکل ۴-الف) هیدروگراف واحد آبخوان و ب) سود خالص کشاورزان؛ NWB و WB به ترتیب نشان‌دهنده سناریوهای بدون وجود بانک و با وجود بانک‌اند.

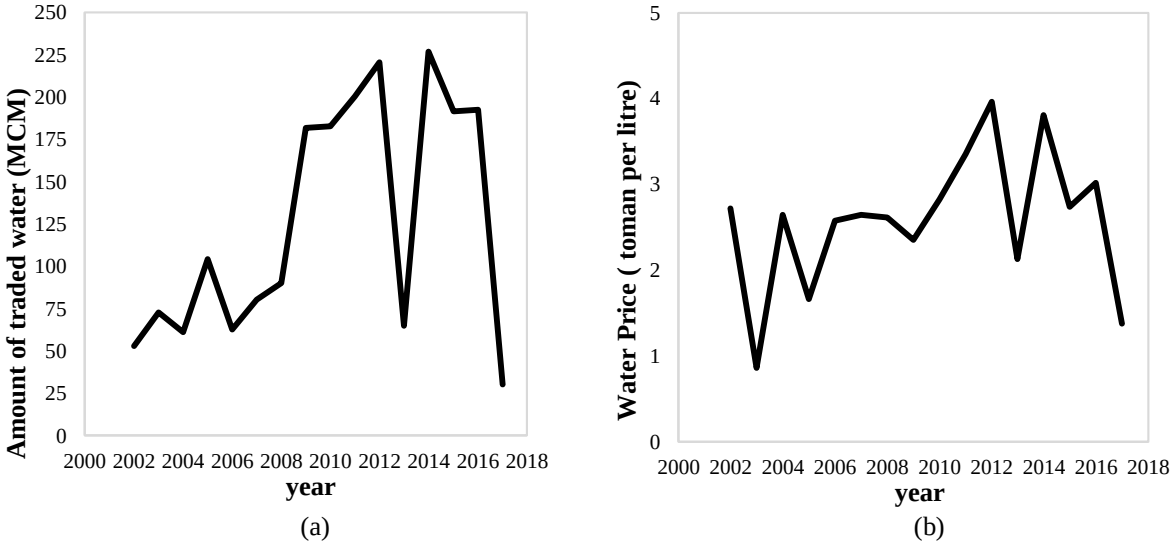


Fig. 5- (a) Traded amount and (b) water price

شکل ۵- الف) حجم خرید بانک و ب) قیمت مبادلات

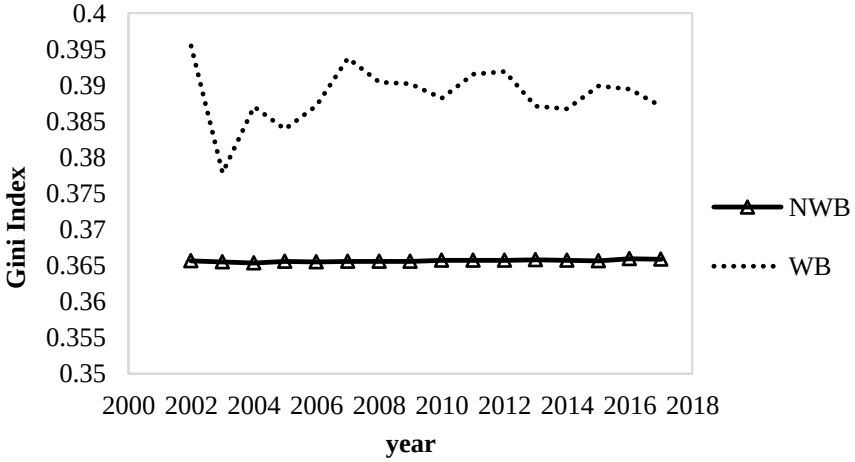


Fig. 6-Gini index; NWB and WB indicate the no water bank and water bank scenarios, respectively

شکل ۶- ضریب جینی؛ NWB و WB به ترتیب نشان‌دهنده سناریوهای بدون وجود بانک و با بانک‌اند.

۴- نتیجه‌گیری

به منظور حل بحران‌ها و مشکلات ناشی از کمبود منابع آبی ایران لازم است تا سیاست‌هایی که ممکن است منجر به استفاده پایدار از منابع آبی و کاهش بحران آب شوند، بررسی و ارزیابی شوند. در نتیجه، در این پژوهش سیاست مدیریت تقاضای آب در قالب یک بانک آب زیرزمینی اتخاذ و ارزیابی شده است. در این مقاله با استفاده از مدل عامل-بنیان، اثرات هیدرولوژیکی و اقتصادی ایجاد نهاد بانک آب زیرزمینی در دشت رفسنجان بررسی شده است. دو سناریو برای بانک آب زیرزمینی تحلیل شد. سناریوی اول نشان‌دهنده شرایط فعلی آبخوان دشت رفسنجان (NWB) و سناریوی دوم خرید حق‌آبه کشاورزان توسط بانک به منظور تعادل‌بخشی به آبخوان (WB) را شامل می‌شود.

بر اساس نتایج بدست آمده ایجاد نهاد بانک آب به منظور خرید آب در شرایط مناسب و ذخیره آن در آبخوان می‌تواند شرایط هیدرولوژیکی و اقتصادی منطقه دشت رفسنجان را ارتقاء دهد. نتایج نشان می‌دهند که سود خالص کشاورزان بعد از ایجاد بانک آب ۶ درصد افزایش یافته است. همچنین افت هیدروگراف واحد آبخوان از ۸۰ سانتی‌متر به ۵۸ سانتی‌متر در سال رسیده است. از این رو بانک آب می‌تواند با صرف هزینه سالیانه ۳۵۰ میلیارد تومان شرایط هیدرولوژیکی و اقتصادی را تا حدی بهبود ببخشد. با توجه به حجم بالای هزینه به نظر می‌رسد پیش از اجرای بانک آب در منطقه لازم است که بر مبنای تحقیقات میدانی و بررسی مستندات قانونی امکان‌سنجی پرداخت و ارزیابی منابع تأمین صورت پذیرد.

به نظر می‌رسد برای احیای آبخوان دشت رفسنجان نیاز به بررسی سیاست‌های دیگری از جمله فراهم کردن شرایط داد و ستد حق‌آبه بین کاربری‌های مختلف (کشاورزی، شرب و صنعت)، کاهش حق‌آبه‌ها بر اساس آب در دسترس، ارتقاء تکنولوژی‌های آبیاری و غیره است. همچنین به نظر می‌رسد بانک آب به تنهایی نمی‌تواند با خرید حق‌آبه کشاورزان شرایط پایداری را برای آبخوان ایجاد کند. با توجه به برخی از محدودیت‌های مدل‌سازی پیشنهاد می‌گردد در آینده جزییات بیشتری از تعاملات نهادهای مختلف از جمله وزارت نیرو، سازمان حفاظت محیط زیست و غیره با بانک آب مورد توجه قرار گیرد.

۵- مراجع

Alamdarlo HN, Pourmozafar H, Vakilpoor MH (2019) Improving demand technology and internalizing external effects in groundwater market framework, case study: Qazvin plain in Iran. Agricultural Water Management 213:164-173

Anbari MJ, Zarghami M (2019) An agent-based model to improve groundwater resources conditions with a participatory approach in the Shabestar-Sofian plain. Iran-Water Resouces Research 15(2):0-0 (In Persian)

Arthur WB (1994) Inductive reasoning and bounded rationality. The American Economic Review 84(2):406-411

Castilla-Rho JC, Mariethoz G, Rojas R, Andersen MS, Kelly BFJ (2015) An agent-based platform for simulating complex human–aquifer interactions in managed groundwater systems. Environmental Modelling & Software 73:305-323

Du E, Cai X, Brozović N, Minsker B (2017) Evaluating the impacts of farmers' behaviors on a hypothetical agricultural water market based on double auction. Water Resources Research 53(5):4053-4072

Erfani T, Binions O, Harou JJ (2015) Protecting environmental flows through enhanced water licensing and water markets. Hydrology and Earth System Sciences 19(2):675-689

Ghafouri Fard S, Bagheri A, Shajari S (2015) Stakeholders assessment in water sector (Case study: Rafsanjan area). Iran-Water Resources Research 11(2):16-28 (In Persian)

Gonzales P and Ajami NK (2019) Goal-based water trading expands and diversifies supplies for enhanced resilience. Nature Sustainability 2(2):138-147

Grafton RQ, Horne J (2014) Water markets in the Murray-Darling basin. Agricultural Water Management 145(C):61-71

Grafton RQ, Wheeler SA (2018) Economics of water recovery in the Murray-Darling basin, Australia. Annual Review of Resource Economics 10:487-510

Hamill L, Gilbert N (2015) Agent-based modelling in economics. John Wiley & Sons Publications, London

Karamouz M, Yazdi MSS, Ahmadi B, Zahraie B (2011) A system dynamics approach to economic assessment of water supply and demand strategies. In: World Environmental and Water Resources Congress 2011

Macal CM, North MJ (2005) Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: Simulation Conference 2005, Proceedings of the Winter, IEEE, 14 pp

Montilla-López NM, Gómez-Limón JA, Gutiérrez-Martín C (2018) Sharing a river: Potential performance of a water bank for reallocating irrigation water. Agricultural Water Management 200:47-59

Najjar-Ghabel S, Zarghami M, Akhbari M, Allah Nadiri A (2019) Groundwater management in ardabil plain using agent-based modeling. Iran-Water Resouces Research 15(3):0-0 (In Persian)

Ohab-Yazdi SA, Ahmadi A (2018) Evaluating and simulation of the behavior and interactions of stakeholders and regional water company under agent-based model framework, in Lenjanat sub-basin of Zayandehrood river basin. Iran-Water Resouces Research 14(2):142-154 (In Persian)

Rahnama MB, Zamzam A (2013) Quantitative and qualitative simulation of groundwater by mathematical models in Rafsanjan aquifer using MODFLOW and MT3DMS. Arabian Journal of Geosciences 6(3):901-912

Safari N, Zarghami M, Behboudi D, Alami MT (2016) Market-based welfare effects modeling in regional allocation of water compared to the administrative allocation by developing cooperative game, case study. Iran-Water Resouces Research 12(3):22-34 (In Persian)

Smajgl A, Heckbert S, Ward J, Straton A (2009) Simulating impacts of water trading in an institutional perspective. Environmental Modelling & Software 24(2):191-201

Wheeler SA, Loch A, Crase L, Young M, Grafton RQ (2017) Developing a water market readiness assessment framework. Journal of Hydrology 552:807-820

Wilensky U, Rand W (2015) An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo. MIT Press

Water Resources Planning and Management 138(4):313-325

Zareei M (2018) Agent-Based model for assessing of water banking adea using BID behavioral framework. M.Sc. Thesis, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (In Persian)

Xu T, Zheng H, Zhao J, Liu Y, Tang P, Yang YCE, Wang Z (2018) A two-phase model for trade matching and price setting in double auction water markets. Water Resources Research 54(4):2999-3017

Yang Y-CE, Zhao J, Cai X (2011) Decentralized optimization method for water allocation management in the Yellow River Basin. Journal of