تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸
Volume 15, No. 2, Summer 2019 (IR-WRR)
۷۳-۸۷

توسعه مدل عامل‌بنیان جهت احیای منابع آب زیرزمینی با رویکرد مشارکتی: مطالعه مـوردی دشت شبستر-صوفیان، ایران

محمدجواد عنبری[۱*] و مهدی ضرغامی[۲]

چکیده

اتکای بخش‌های زیادی از کشور بر منابع آب زیرزمینی از یک طرف و افت روزافزون سطح تراز ایستابی آبخوان‌ها از طرف دیگر اهمیت توجه به این بخش از منابع آب را بیش از پیش افزایش داده است. به دلیل پیچیدگی‌های سیستم‌های اجتماعی- زیست‌محیطی مرتبط با منابع آب زیرزمینی، نیاز به استفاده از ابزاری است که بتواند این پیچیدگی‌ها را در قالب روابط عامل‌های مؤثر مدل نماید. مدل‌سازی عامل‌بنیان، شبیه‌سازی کامپیوتری با رویکردی جامع‌نگر از ذینفعان یا همان عامل‌هایی است که با یکدیگر و با محیط خود بر اساس اصول رفتاری خاص تعامل می‌کنند. در این مقاله، با کاربرد مدل‌سازی عامل‌بنیان رفتار کشاورزان، عامل‌های نهادی مؤثر، آبخوان و نیز روابط آن‌ها در دشت شبستر-صوفیان با مشارکت ذینفعان از طریق به‌کارگیری مصاحبه‌ها و پرسش‌نامه‌های نیمه‌ساختاریافته مدل شده است. نتایج بررسی اجرای پنج سناریوی نمونه نشان می‌دهد در صورت هماهنگی مناسب نهادها و جلب مشارکت کشاورزان، ضمن افزایش درآمد کشاورزان، می‌توان در طول ۱۰ سال، حدود ۲۰۰ میلیون مترمکعب از برداشت چاه‌ها را کاهش داده و در نتیجه تا حدود ۴۰ درصد بیلان منفی آبخوان را جبران نمود. با استفاده از این مدل می‌توان فهم مناسب‌تری از سیستم پیچیده منابع آب زیرزمینی به دست آورده، مشارکت ذینفعان را جلب کرده و با تعریف سناریوها در فرآیندی مشارکتی، به راهکارهای بهتر در فرآیند تصمیم‌گیری دست یافت.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عامل‌بنیان، مدیریت منابع آب زیرزمینی، حکمرانی آب، اجتماعی-اکولوژیکی، آبخوان شبستر-صوفیان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۳/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۹/۱۷

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و عضو هیات علمی و رئیس پژوهشکده محیط زیست دانشگاه تبریز.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

An Agent-Based Model to Improve Groundwater Resources Conditions with a Participatory Approach in the Shabestar-Sofian Plain, Iran

M.J. Anbari[1] and M. Zarghami[2]*

Abstract

The reliance of a great part of the country's water supply on groundwater resources on the one hand, and increasing water level drop of the aquifers on the other hand, significantly increased the importance of groundwater resources management. Due to the complexities in the socio-ecological systems related to the groundwater resources, there is a need for tools to model these complexities in the form of effective agents' relations. Agent-based modeling (ABM) is a computer -based simulation with a comprehensive approach of stakeholders, or agents that interact with each other and with their environment based on certain behavioral principles. In this paper, farmers, effective institutional agents and aquifer behaviors and their interactions in the Shabestar-Sofian plain, Iran is modeled using ABM with stakeholder participation through interviews and semi-structured questionnaires. The results of the implementation of five sample scenarios showed that if the institutions are properly coordinated and the participation of farmers is attracted, it could be possible to reduce about 200 million cubic meters of wells extraction over 10 years, while simultaneously increasing the income of farmers and compensating about 40 percent of negative groundwater balance. Using this model, a better understanding of the sophisticated system of groundwater resources can be obtained, stakeholder participation can be attracted, and by defining scenarios in a participatory process, better solutions can be achieved in the decision-making process.

Keywords: Agent-Based Modeling, Groundwater Resources Management, Water Governance, Social-Ecological, Shabestar-Sofian Aquifer.

Received: May 31, 2018
Accepted: December 8, 2018

1- Ph.D. Candidate, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: mzarghami@tabrizu.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی موجب ایجاد پیامدهای منفی اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی بسیاری در کشور شده است. از جمله این پیامدها می‌توان به فرونشست دشت‌ها (زلزله خاموش)، کف‌شکنی چاه‌ها و بالارفتن هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آبدهی چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات، پایین آمدن کیفیت آب‌های زیرزمینی و افزایش شوری آب، تأثیر منفی بر آب‌های سطحی و خشک شدن تالاب‌ها، کاهش سطح زمین‌های زیرکشت و تخریب غیرقابل بازگشت آبخوان‌های موجود اشاره نمود که هر یک به تنهایی بخشی از عملکرد جامعه را مورد تهدید قرار داده است. وضعیت منابع آب زیرزمینی کشور به اندازه‌ای بحرانی است که وزارت نیرو بر اساس مفاد ماده ۴ قانون توزیع عادلانه آب نسبت به اعلام ممنوعیت توسعه بهره‌برداری آبخوان‌های حدود ۳۸۸ دشت از ۶۰۹ دشت کشور اقدام نموده است. علی‌رغم تلاش‌های وزارت نیرو طی چندین سال اخیر در قالب برنامه‌های مختلف، روند نزول تراز آب‌های زیرزمینی نه تنها کاهش نیافته بلکه در بسیاری از موارد روندی صعودی را طی کرده است. امروزه کارشناسان و محققین به این نتیجه رسیده‌اند که مسائل مرتبط با منابع آب زیرزمینی، سیستم‌های پیچیده اجتماعی-زیست‌محیطی را شامل می‌شوند (Zellner, 2008). تعاملات و روابط بین اجزای مختلف یک سیستم حکمرانی منابع آب گاهی بسیار پیچیده و مبهم است. نتایج اقدامات خاص هر بخش سیستم می‌تواند منجر به پیامدهای پیش‌بینی نشده در دیگر بخش‌های سیستم شود و روابط بین آن‌ها در بسیاری از موارد خوب توصیف و فهم نشده است. این موضوع علت مهمی برای توسعه ابزارهایی است که در راستای فهمی کامل‌تر از پویایی، الگوها و مکانیزم‌های پدیده‌های پیچیده کمک می‌نمایند. یکی از ابزارهای بسیار مناسب در این زمینه، مدل‌سازی عامل‌بنیان است که امکان ارائه عامل‌ها و محیط آن‌ها، مدل نمودن تعامل بین عامل‌ها با یکدیگر و نیز با محیط پیرامون را فراهم می‌کند (Torres, 2013). در این مدل‌ها، با در نظر گرفتن تغییرات مشخصات، رفتارها و حتی گاهی اهداف عامل‌ها بر اساس شرایط مختلف در طول دوره شبیه‌سازی و بر اساس سناریوهای قابل تعریف، می‌توان روند تغییرات را در حالت‌های مختلف بررسی نموده و درک بهتری از روند دینامیک سیستم مورد مطالعه به دست آورد. عامل به واحدهایی از سیستم اطلاق می‌شود که دارای قدرت تصمیم‌گیری مستقل بوده و مشخصات، اهداف و رفتار منحصربه‌فرد و قابل اصلاح دارند (Akhbari and Grigg, 2015). طبق تعریف، هر یک از عامل‌های موجود در سیستم دارای اهداف مختص به خود و گاهی متضاد با دیگر عامل‌ها هستند. بنابراین در راستای بهبود وضعیت سیستم، شناخت مشخصات و رفتارهای هر عامل با توجه به اهداف آن ضرورتی انکارناپذیر است. مدل عامل‌بنیان[1] (ABM) می‌تواند ابزاری مناسب جهت شناسایی فعالیت‌های کلیدی افراد و مؤسسات در راستای دستیابی به بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی در قالب سناریوهای بهینه فراهم نماید.

ایده مدل‌سازی عامل‌بنیان به صورت یک مفهوم نسبتاً ساده در دهه ۱۹۴۰ میلادی ارائه شد. اما به دلیل این‌که نیاز به روش‌های محاسباتی پیشرفته داشت تا دهه ۱۹۹۰ چندان متداول نشد. یکی از اولین مدل‌های عامل‌بنیان مدل تفکیک شلینگ بود که در مقاله او با عنوان «مدل‌های دینامیکی تفکیک» شرح داده شد (Schelling, 1971). در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی در زمینه مدیریت منابع آب با کاربرد مدل‌سازی عامل‌بنیان صورت گرفته است. Bars et al. (2002) از مدل ABM چندعامله جهت کمک به حل مناقشات بین بازیگران مختلف در زمینه مناقشات مرتبط با تخصیص منابع آبی موجود بهره برده‌اند. به این منظور پیامدهای قوانین و احکام مختلف مربوط به تخصیص آب، نگرش‌های بازیگران مختلف و نیز توانایی آن‌ها برای تغییر رفتار خود در نظر گرفته شده است. Schluter and Pahl-Wostl (2007) یک روش مدل‌سازی عامل‌بنیان جهت بررسی مشخصات و مکانیزم‌های تاب‌آوری سیستم در یک سیستم پیچیده مدیریت منابع، مبتنی بر یک مطالعه موردی در زمینه مصرف آب در حوضه رودخانه آمودریا پیشنهاد داده‌اند. اصطلاح تاب‌آوری در این پژوهش به صورت وجود تعدد گزینه‌های واکنشی (مکانیزم‌های پاسخ سیستم) و انعطاف‌پذیری سیستم اجتماعی جهت پاسخ سازگارانه به تغییرات در مقیاس مناسب تعریف شده است. در واقع، تاب‌آوری مشخصه‌ای از یک سیستم است که قابلیت آن را در سازگاری با اختلال‌ها در سیستم و سازماندهی مجدد در زمان تحمل تغییرات در راستای حفظ ساختار و عملکرد سیستم نشان می‌دهد. در این پژوهش، جهت مقایسه تاب‌آوری در برابر تغییرات تنظیمات نهادی مدیریت آب، در حالت متغیر بودن و عدم‌قطعیت آب در دسترس، شبیه‌سازی انجام شده است. Zellner (2008) نیز پتانسیل‌ها و محدودیت‌های مدل‌های عامل‌بنیان را به عنوان مدل‌هایی که می‌توانند در فهم چنین سیستم‌های پیچیده‌ای نقش ایفا کنند مورد بررسی قرار داده است و به عنوان نمونه کاربرد آن را در مدیریت آب زیرزمینی نشان داده است.

Kock (2008) دو مدل عامل‌بنیان برای سیستم اجتماعی-هیدرولوژیکی در آلباسته اسپانیا و رودخانه اسنیک در شرق ایالت آیداهو آمریکا توسعه داده است. در این پژوهش، جهت ارزیابی اثرات توسعه ظرفیت نهادی در کاهش سطح مناقشه‌ها، از افزودن نهاد بانک آب زیرزمینی[2] به عنوان نمونه استفاده شده است. براساس نتایج این تحقیق، ظرفیت نهادی و سیستم پویای مناقشات آبی به شدت به هم

وابسته‌اند. در پژوهشی دیگر، Chu et al. (2009) با توجه به پیچیدگی‌های موجود در سیستم مصرف آب شهری، یک مدل شبیه‌سازی اجتماعی عامل‌بنیان را جهت ارائه مشخصات رفتاری این سیستم توسعه داده‌اند. مدل توسعه داده شده توانایی ارزیابی پاسخ‌های ناهمگن مشترکان آب، در نظر گرفتن عوامل نفوذ در بازار تکنولوژی‌های مرتبط با صرفه‌جویی آب، سیاست‌های نهادهای مدیریتی، توسعه اقتصادی و نیز آگاهی و اولویت‌های جامعه را دارد. Reeves and Zellner (2010) نیز مدل عددی جریان آب زیرزمینی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (MODFLOW)[3] را با یک مدل کاربری زمین عامل‌بنیان جهت به دست آوردن یک شبیه‌ساز برای مطالعات برنامه‌ریزی زیست‌محیطی تجمیع کرده‌اند. An (2012) به بررسی مدل‌های مختلف تصمیم‌گیری با استفاده از شبیه‌سازی عامل‌بنیان در سیستم‌های پویای حاصل ارتباط بشر و طبیعت با توجه به تئوری پیچیدگی پرداخته و قوت و ضعف هر یک را شرح داده است.

Holtz and Pahl-Wostl (2012) از یک مدل عامل‌بنیان جهت بررسی تاریخچه کشت آبی در حوضه گوادیانا در اسپانیا در راستای یادگیری در مورد اثر خصوصیات و مشخصات کشاورزان بر کاربری زمین و مصرف بیش از اندازه مربوطه بهره برده‌اند. در این مقاله نتیجه‌گیری شده است که فهم صحیحی از سیستم اجتماعی مصرف‌کننده منابع جهت حل مسائل مربوط به مصرف بیش از اندازه آب مورد نیاز است و مدل‌های عامل‌بنیان، ابزارهای مفیدی جهت افزایش چنین درکی حتی در شرایط وجود داده‌های کم و غیرقطعی که در مسائل مربوط به مصرف منابع معمول است، می‌باشند. در مقاله‌ای دیگر، Torres (2013) با استفاده از تلفیق مدل‌سازی عامل‌بنیان با مدل‌های هیدرولیکی با مبنای فیزیکی از شبکه‌های آب، عملکرد زیرساخت‌های آبی را در سرویس‌دهی مناسب در آینده و چگونگی تأثیر آن در شکل‌گیری فرآیند توسعه شهری بررسی کرده است. از مدل به کار رفته برای ارزیابی سناریوهای توسعه شهری بالقوه در آینده، تغییر کاربری زمین و در نهایت نتایج روند مدیریت آب استفاده شده است.

Akhbari and Grigg (2013) روشی جدید در مدل‌سازی عامل‌بنیان جهت شبیه‌سازی رفتار و تعاملات گروه‌های درگیر در سناریو مناقشه که به صورت یک بازی مدل می‌شود، معرفی کرده‌اند که در منطقه‌ای از کالیفرنیا پیاده شده است. در این مدل، ABM تعاملات بین گروه‌ها و نحوه تشویق آن‌ها جهت شرکت در بازی در راستای حرکت به سمت راه‌حل را شرح می‌دهد. همچنین Akhbari and Grigg (2015)، پیشنهادهایی جهت شناسایی عامل‌های مؤثر در تصمیمات بخش آب ارائه کرده‌اند. مدل ارائه شده، کاربرد سناریوهای مختلف مدیریتی را جهت دستیابی به نرخ خاصی از کاهش تخصیص آب کشاورزی از حالت‌های مختلف مصالحه بررسی می‌کند.

Barreteau et al. (2014) یک مدل عامل‌بنیان جهت ارائه شاخص‌های مناسب خشکسالی در مقیاس مکانی مناسب برای هر دسته از ذینفعان طراحی کرده‌اند. تست اولیه مدل، مناسب بودن آن را برای تحلیل حساسیت راندمان مدیریت خشکسالی نشان می‌دهد. مدل ارائه شده نتایج اجرای سیاست در نظر گرفتن هم‌زمان فرآیندهای اجتماعی و هیدرولوژیکی در مقیاس مکانی کوچک را ارزیابی می‌کند. Al-Amin et al. (2015) نیز یک مدل عامل‌بنیان را جهت تحلیل تعاملات پویای تقاضاهای در حال تغییر آب و منابع محدود آب زیرزمینی تحت تنش‌های سناریوهای رشد جمعیت و تغییر اقلیم در محدوده شهری آریزونا توسعه داده‌اند. در این مدل، عامل‌های تصمیم‌گیرنده (نهادهای حکمرانی) محدودیت‌های مصرف آب را به صورت قانون و یا رویکردهای تشویقی اعمال می‌کنند. در این پژوهش، اثرات استراتژی‌های مدیریتی بر صرفه‌جویی آب و سطح تراز آبخوان‌های منطقه با توجه به تقاضای مصرف آب و کاهش مصرف در بخش‌های مختلف مصرف آب شهری بررسی شده است.

Berglund et al. (2015) معرفی جامعی از مدل‌های عامل‌بنیان برای محققین منابع آب ارائه داده است و سیستم‌های منابع آب را به عنوان سیستم‌های انطباقی[4] پیچیده که می‌توانند توسط مدل‌های عامل‌بنیان مورد بررسی قرار گیرند، معرفی می‌کند. در این مقاله عنوان شده است که مدل‌های عامل‌بنیان در زمینه منابع آب از جهت وسعت کاری، سیستم آبی مورد بررسی، پرسش‌های مدیریتی و درجه تعامل بین سیستم‌های اجتماعی و فیزیکی متفاوت هستند. در پژوهشی دیگر، Castilla-Rho et al. (2015) مدل FlowLogo را جهت توسعه مدل‌های توأم آب زیرزمینی و عامل‌بنیان (GW-ABMs) ارائه نموده که در نرم‌افزار NetLogo توسعه داده شده است. با تحلیل سناریوهای مختلف در این مثال، توانایی مدل در تعریف عامل‌ها در روند تصمیم‌گیری، مدل کردن بازخوردهای بین رفتارهای هر عامل، پویایی آب زیرزمینی و انجام تحلیل حساسیت در مورد پارامترهای اجتماعی و فیزیکی نشان داده شده است. Ghallehban-Tekmedash et al. (2015) نیز اساس مدل‌سازی ABM را تبیین کرده، ابزارهای مورد استفاده در این زمینه را معرفی کرده و کاربرد آن در زمینه مدیریت منابع آب را نشان داده‌اند.

Bakarji et al. (2017) یک چارچوب ساده عامل‌بنیان جهت ایجاد مدل تصمیم اجتماعی–هیدرولوژیکی پیشنهاد کرده‌اند که از آن برای ترکیب مدل پویایی رفتار اجتماعی و آلودگی آب زیرزمینی استفاده شده

است. از مزیت‌های مدل ایجاد شده، سادگی آن، شبیه‌سازی انعطاف‌پذیر دنیای واقعی و امکان ایجاد رابطه بازخوردی پویا بین محیط و جامعه است. Lotfi and Araghinejad (2017) ضمن معرفی کلی رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان، به بررسی چهار چالش اصلی پیش رو در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب پرداخته است: طراحی رفتار عامل‌ها؛ برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و اکولوژیکی؛ مکانی کردن مـــدل؛ کالیبراسیون، صحت‌سنجی و اعتبارسنجی. در پژوهشی دیگر، Ohab-Yazdi and Ahmadi (2018) جهت شناسایی و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر رفتار عامل‌ها در نظارت منابع آب و شبیه‌سازی آن‌ها تحت قوانین و سیاست‌های آب، ابتدا چارچوب قواعد رفتاری عامل‌ها در محدوده لنجانات را تشکیل داده و سپس با مدل عامل‌بنیان و به‌کارگیری نرم‌افزار AnyLogic، رفتارها را شبیه‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش، جهت ارزیابی اثر پارامترهایی مثل "تشکیل جلسات با دیگر ارگان‌ها توسط شرکت آب منطقه‌ای" در کنترل تخلفات، دو سناریوی کارآمد و ناکارآمد تعریف شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر رفتار و نحوه تعامل شرکت آب منطقه‌ای با دیگر ارگان‌ها مانند اضافه کردن پارامتر "تشکیل جلسات با دادستان و دیگر ارگان‌ها" تأثیر زیادی بر کنترل تخلفات داشته است. در زمینه استفاده از رویکرد مشارکتی در مدیریت منابع آب و تحلیل ذینفعان نیز Ghafouri Fard et al. (2015) و Barari et al. (2016) بر اهمیت ایجاد بستر مشارکت کلیه گروداران در فرآیندهای تصمیم‌گیری تأکید نموده‌اند.

با توجه به پیشینه تحقیق ارائه شده، در سالیان اخیر کاربرد مدل‌سازی عامل بنیان در مدیریت منابع آب رشد قابل توجهی داشته است؛ هرچند در کشور ما به تازگی مورد توجه محققین واقع شده است. نکته مهم در کاربرد این مدل‌ها، فهم صحیح از سیستم مورد بررسی و تحلیل دقیق ذینفعان با روش مناسب است. ذینفعان مورد بررسی در هر منطقه خصوصیات رفتاری و تعاملات منحصربه‌فرد خود را دارند که به دلایلی مانند مسائل فرهنگی، اقتصادی و یا حتی شرایط سیاسی گاهی کاملا متفاوت هستند. نهادهای مربوطه و رفتارهای آن‌ها و نیز قوانین موجود در زمینه حکمرانی آب نیز از این قاعده مستثنا نبوده و در هر مورد خاص، نیاز به بررسی جداگانه وجود دارد.

نکته دیگر توجه به سناریوهای مدیریتی است که با توجه به مسائل موجود در منطقه و شرایط خاص آن، باید به صورت منحصربه‌فرد پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گیرد. این سناریوها باید از درون خود مسأله و با رویکرد مشارکتی تعریف شود و نگاه از بیرون به موضوع هرگز نمی‌تواند منجر به کاهش مؤثر معضلات گردد.

یکی از موضوعاتی که در تحقیقات گذشته کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است، تأثیر عامل‌های نهادی و نحوه ارتباط آن‌ها بر تغییر رفتار بهره‌برداران از منابع آبی است که در این مقاله سعی شده است با ارائه نمونه‌ای واقعی مورد ارزیابی قرار گیرد. با این که به نظر می‌رسد رویکردهای مدیریتی اعمال شده توسط نهادهای مؤثر باید موجب بهبود وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی گردند، اما به دلیل عدم هماهنگی مؤثر بین نهادها و نیز عدم توجه به مدل‌های رفتاری ذینفعان در عمل نتیجه مطلوب حاصل نشده است. لذا در این پژوهش تلاش شده است با مدل نمودن رفتارهای دو نهاد اصلی تأثیرگذار، کشاورزان منطقه به عنوان بهره‌برداران عمده آب زیرزمینی دشت شبستر– صوفیان و نیز ارتباطات پیچیده بین عامل‌های مذکور، بتوان اثر اجرای نمونه‌ای از سیاست‌های مطرح را بررسی نموده و راهکارهایی در جهت بهبود اجرای سیاست‌ها با رویکرد مشارکتی ارائه نمود.

۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت شبستر– صوفیان از جمله دشت‌های مهم استان آذربایجان شرقی است که در شمال شرقی دریاچه ارومیه واقع شده و یکی از زیرحوضه‌های ۲۵گانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. این دشت در مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۵ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی واقع گردیده است (شکل ۱). وسعت کل محدوده مطالعاتی برابر ۱۵۱۴ کیلومترمربع می‌باشد که حدود ۸۱۲/۷ کیلومترمربع آن را مناطق کوهستانی و حدود ۵۰۱/۳ کیلومترمربع آن را دشت تشکیل می‌دهد (Dehghan et al., 2011). در منطقه شبستر، آب‌های زیرزمینی به عنوان منبع استراتژیک و قابل دسترس، نقش مهم و حیاتی را در تأمین نیازهای آبی مختلف شرب، صنعت و کشاورزی ایفا می‌نماید.

بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت مصارف کشاورزی و همچنین کاهش نزولات جوی و وقوع خشکسالی‌ها در سال‌های گذشته سبب افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت مذکور گردیده است. آبخوان شبستر یکی از بحرانی‌ترین آبخوان‌های حوضه دریاچه ارومیه است؛ به طوری که طبق بررسی‌ها، متوسط تراز آب زیرزمینی در دشت حدود ۶۳ سانتیمتر در سال افت داشته است (Dinpazhoh et al., 2014). افت ایجاد شده در سطح آبخوان، پیامدهای منفی مختلف همچون خطر پیشروی آب شور دریاچه، تنزل کیفیت آب زیرزمینی، فرونشست زمین، خشک شدن و یا کاهش آبدهی چاه‌ها و به تبع آن توسعه کف‌شکنی و افزایش هزینه پمپاژ آب را به همراه داشته است (Zeinali et al., 2011).

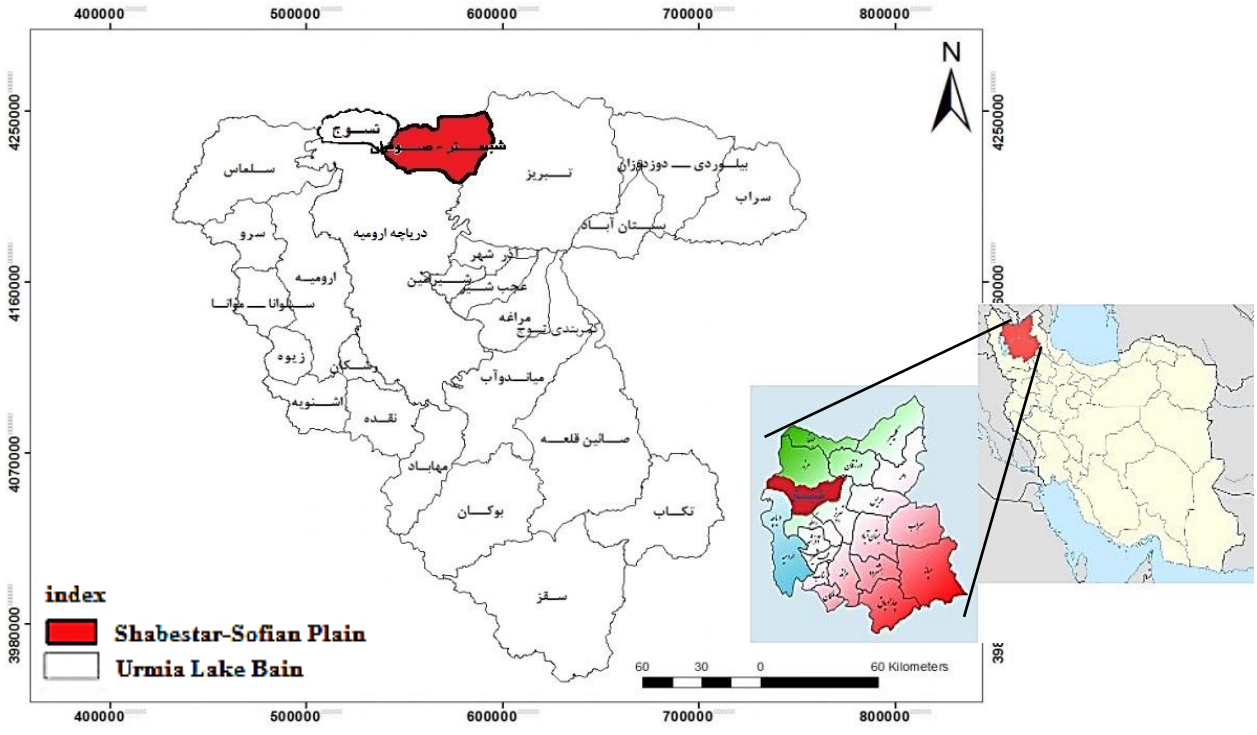

Fig. 1- The location of Shabestar-Sofian plain in Urmia Lake basin

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زیرحوضه شبستر- صوفیان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

۳- روش تحقیق

۳-۱- معرفی مدل‌های عامل‌بنیان

یک مدل عامل‌بنیان، یک شبیه‌سازی کامپیوتری از تعدادی از عامل‌ها[5] است که در قالب قواعد و قوانین مقرر تعامل می‌کنند. یک عامل نماینده عنصری مستقل است که بر فرآیند تصمیم‌گیری تأثیر می‌گذارد و می‌تواند یک فرد، یک نهاد یا یک گروه از بازیگران/ذینفعان مؤثر باشد. عامل‌ها در یک محیط[6] دینامیک قرار گرفته‌اند و با آن دارای اثر متقابل هستند. عامل‌ها دارای ظرفیت یادگیری و تطابق با تغییرات موجود در دیگر عامل‌ها و محیط هستند (An, 2012). مدل کامپیوتری مسیر تعاملات بسیاری از عامل‌ها را جهت بررسی اتفاقات و رویدادها در طول زمان مورد ارزیابی قرار می‌دهد (Farmer and Foley, 2009). یکی از مزیت‌های مدل‌سازی محاسباتی این است که کارشناس را مجبور می‌کند که دقیق باشد؛ چرا که برخلاف مدل‌های تئوری و غیرمحاسباتی، یک برنامه کامپیوتری باید به صورت کامل و دقیق بیان گردد تا قابل‌اجرا باشد (Gilbert, 2008). مدل‌سازی عامل‌بنیان راهی جهت مدل نمودن پویایی سیستم‌های پیچیده متشکل از عامل‌های مستقلی است. این عامل‌ها با یکدیگر تعاملاتی دارند که به‌نوبه خود در رفتار آن‌ها تاثیر می‌گذارد (Macal and North, 2010). مدل‌سازی کامپیوتری در علوم طبیعی و مهندسی بیش‌تر بر اساس مدل‌سازی معادله‌بنیان (مانند دینامیک گازها، سیالات یا اجسام جامد) استوار بوده است. یقینا با استفاده از این روش‌ها نمی‌توان مسائل علوم اجتماعی را مدل‌سازی و این جنبه از مسائل را در رفتارهای سیستم به صورت ریاضی فرمول‌بندی نمود. در ABM، رفتارها و تعاملات عامل‌ها ممکن است با معادلاتی فرمول‌بندی شوند (Castilla-Rho et al., 2015)؛ اما در بیش‌تر موارد می‌توان هر عامل را در قالب قواعد و اصول مشخص (مانند قوانین اگر-آنگاه یا عملگرهای منطقی) بیان نمود. این موضوع روش مدل‌سازی را انعطاف‌پذیرتر می‌کند. به علاوه، در این روش مدل‌سازی می‌توان تغییرات قوانین رفتاری و اثرات تصادفی تغییرات را در نظر گرفت (Helbing and Balietti, 2011).

۳-۱-۱- نحوه مدل‌سازی عامل‌بنیان

در کنار روند استاندارد موجود در ساخت مدل‌ها، گام‌های عمومی در ساخت یک مدل عامل‌بنیان عبارتند از (Macal and North, 2006): (۱) شناخت عامل‌ها: شناسایی انواع عامل‌ها و مشخصات و خصوصیات آن‌ها؛ (۲) شناخت محیط: تعریف محیطی که عامل‌ها در آن زندگی کرده و با هم تعامل می‌کنند؛ (۳) روش‌های عملکرد عامل‌ها: مشخص نمودن روش‌هایی که به‌وسیله آن‌ها خصوصیات عامل‌ها در پاسخ به تعاملات با عامل‌های دیگر و یا با محیط به‌روز می‌شود؛ (۴) نحوه

تعامل عامل‌ها: افزودن روش‌هایی که کنترل کند کدام عامل، چه موقع و چگونه در طول شبیه‌سازی با دیگر عامل‌ها و با محیط تعامل نماید و (۵) پیاده‌سازی: پیاده نمودن مـــدل عامل‌بنیان در نرم‌افزار محاسباتی. در فرآیند اجـرای مـــدل، عامل به صورت تکرارشونـده رفتارهای خـــود را اعمال کرده و بـــا دیگر عامل‌ها و محیط تعامل می‌کند (Macal and North, 2010).

در پژوهش حاضر مدل عامل‌بنیان با استفاده از زبان برنامه‌نویسی JAVA و با بهره‌گیری از کتابخانه JADE[۷] توسعه داده شده است. JADE چارچوبی است که جهت مدل‌سازی عامل‌بنیان در زبان برنامه‌نویسی جاوا کدنویسی شده و با استفاده از استانداردهای FIPA[۸] امکان ایجاد عامل‌های هوشمند را فراهم می‌نماید. FIPA یکی از سازمان‌های استاندارد جامعه کامپیوتری IEEE است که استانداردهای نرم‌افزاری را برای سیستم‌های عامل‌بنیان و به ویژه نحوه تعامل عامل‌ها با مشارکت بخش عظیمی از جامعه متخصصین مدل‌سازی عامل‌بنیان تولید کرده و تا کنون نقش بسیار مهمی در این زمینه داشته است. دلیل انتخاب ابزار JADE از میان ابزارهای موجود، ویژگی‌ها و امتیازات این چارچوب شامل پشتیبانی اجرای فعالیت‌های موازی و هم‌زمان عامل‌ها از طریق مدل رفتاری و امکان ایجاد مدل‌های رفتاری مختلف با استفاده از کلاس‌های تعریف شده، ظرفیت فوق‌العاده در انتقال انواع پیام‌های ACL[۹] در مدل جهت تعامل و ارتباط انعطاف‌پذیر و مؤثر عامل‌ها (پیام‌های ACL شامل یک سری مشخصه‌های تعریف شده استاندارد توسط FIPA است)، امکان بهره‌گیری از رابط گرافیکی کاربر (GUI) مناسب و دارای قابلیت شخصی‌سازی بالا و دسترسی به کدهای نوشته شده و امکان تغییر آن‌ها در صورت نیاز و توسعه مدل بدون وجود محدودیت موجود در بسته‌های نرم‌افزاری از طریق کدنویسی در محیط جاوا.

بنابر توضیحات ارائه شده، روندنمای کلی مدل رفتاری پیشنهادی را می‌توان به صورت شکل ۲ ارائه نمود. رویکرد استفاده از پرسش‌نامه و مصاحبه‌های تخصصی، در مراحل مختلف پژوهش مورد توجه بوده است. در حقیقت مدل رفتاری عامل‌بنیان با ارتباط مستقیم با ذینفعان شکل می‌گیرد. جهت مشخص نمودن هدف و رویکرد مدل‌سازی، مصاحبه‌های مختلفی با کارشناسان و ذینفعان مختلف مؤثر در منطقه شامل مدیران و کارشناسان نهادهای آب منطقه‌ای، اداره امور آب شبستر، جهاد کشاورزی استان و شهرستان و نیز کشاورزان روستاهای مختلف شبستر صورت گرفته است. همچنین در مراحل بعدی برای شناسایی ذینفعان، خصوصیات آن‌ها، تعاملات بین آن‌ها و نیز تعریف سناریوها از این رویکرد استفاده شده است. در این پژوهش، از روش پژوهش کیفی و مصاحبه‌ها و پرسش‌نامه‌های نیمه‌ساختاریافته استفاده شده است. لازم به ذکر است در حالی که مصاحبه ساختاریافته دارای مجموعه‌ای دقیق از سؤالات است که اجازه انعطاف در مصاحبه را نمی‌دهد، در مصاحبه نیمه‌ساختاریافته، اجازه پرداختن به ایده‌های جدید داده می‌شود تا در طول مصاحبه به عنوان نتیجه‌ای از آنچه مصاحبه‌شونده می‌گوید به ارمغان آورده شود. مصاحبه‌کننده در مصاحبه نیمه‌ساختاریافته به طور کلی دارای یک چارچوب خاص است که باید به آن پرداخته و در آن چارچوب حرکت نماید. در پژوهش کیفی، برای مصاحبه‌ها از قاعده اشباع استفاده شده است. بنابراین قاعده، مصاحبه‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر مقوله یا موضوع جدیدی از درون مصاحبه‌ها کشف نگردد و در آن صورت، فرآیند مصاحبه‌ها متوقف شده و پیاده‌سازی انجام می‌شود.

در زمینه روش‌های اعتبار یا پایایی در پژوهش کیفی، متن مصاحبه توسط روش خودبازبینی محقق و کنترل اعضا بررسی شده و اعتبار یافته‌های حاصل از مصاحبه بررسی گردیده است. خودبازبینی محقق یعنی این که پس از پایان مصاحبه‌ها، محقق مصاحبه‌های ضبط شده را چک می‌کند تا مطمئن شود که متون نوشته شده در مصاحبه‌ها، انعکاس دقیقی از نظرات و آن چه مصاحبه شونده در طول مصاحبه بیان کرده، می‌باشد. در کنترل اعضا نیز پس از اتمام مصاحبه، یادداشت‌های میدانی به مصاحبه‌شونده داده می‌شود تا اطمینان حاصل شود که نوشته‌ها با نظرات و ذهنیات مصاحبه شونده مطابقت داشته باشد (Andreas, 2003). در جهت رعایت پایایی مصاحبه‌ها، از مصاحبه‌های همگرا استفاده شده است. در مصاحبه‌های همگرا جهت پیروی از یک رویه مشخص، پروتکل مصاحبه تدوین می‌گردد که این پروتکل کمک می‌کند تا پایایی حفظ شده و در صورت تکرار کار توسط محققین مختلف، نتایج منطقی حاصل شود. مواردی مانند تثلیث پرسش‌های مصاحبه‌ای و تحلیل موارد منفی در طراحی پروتکل مصاحبه، وجود چند مصاحبه‌کننده به صورت جداگانه اما موازی با یکدیگر و استفاده از کمیته راهنما، موجب افزایش اعتبار و پایایی پژوهش کیفی انجام شده، گردیده است (Abbaszadeh, 2012).

۳-۲- توصیف مدل و تحلیل ذینفعان

در مدل ارائه شده نحوه تغییر مشخصه‌ها و رفتارهای گروهی از کشاورزان که از منبع محدود آب زیرزمینی بهره‌برداری می‌کنند، مدل شده است. در منطقه مورد مطالعه، کشاورزان به عنوان عامل‌های منفردی[۱۰] که بهره‌برداران اصلی منابع آب زیرزمینی هستند (حدود ۹۰ درصد) و بیش‌ترین تأثیر را دارند، مورد توجه قرار گرفته‌اند.

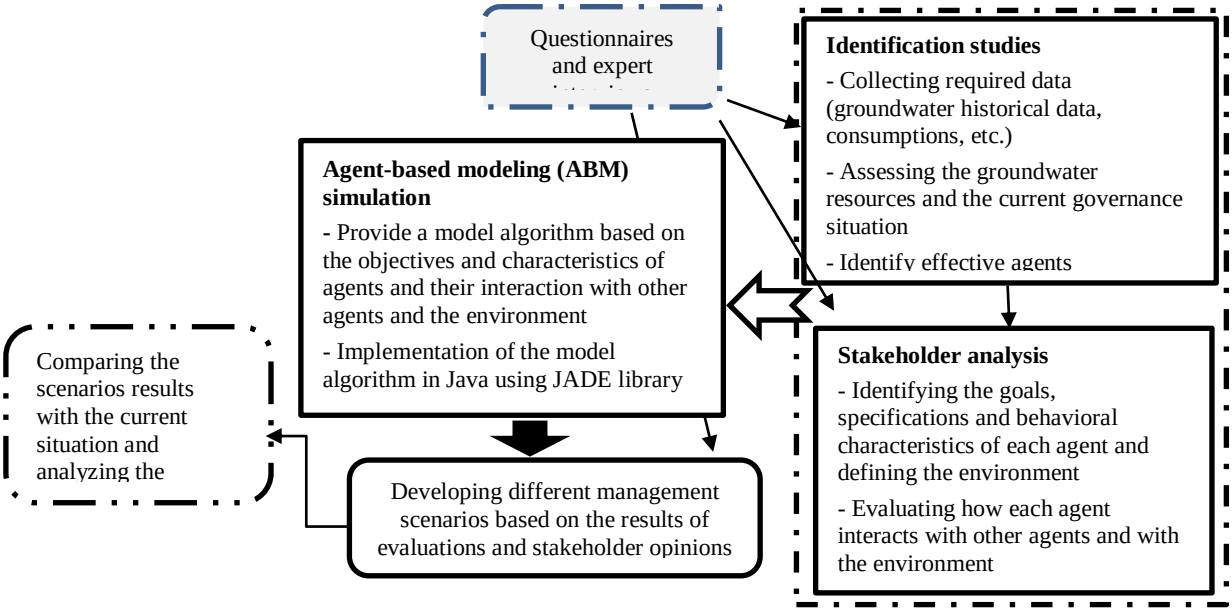

Fig. 2- Stages of developing the agent-based model

شکل ۲- مراحل و گام‌های توسعه مدل عامل‌بنیان

منبع آب زیرزمینی توسط یک عامل نهادی[11] (سازمان آب منطقه‌ای و اداره امور آب) که بر اساس قانون، میزان تخصیص منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها به هر کشاورز را مشخص می‌کند، مدیریت می‌شود. همچنین مدیریت کلی بخش کشاورزی، برعهده سازمان جهاد کشاورزی است که به عنوان دیگر عامل نهادی تأثیرگذار در مدل وارد شده است. شکل شماتیک عامل‌ها و تعاملات آن‌ها با یکدیگر و با محیط در شکل ۳ آورده شده است که جزییات آن، در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

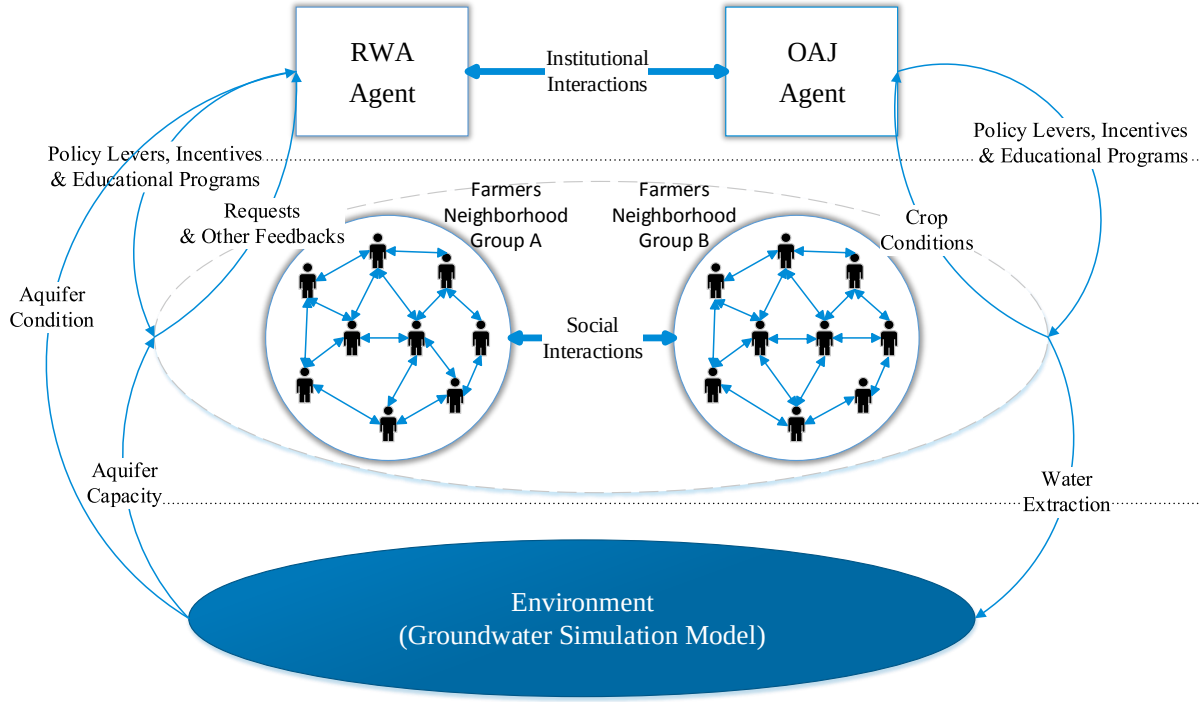

Fig. 3- Different levels of interactions of agents with each other and with the environment

شکل ۳- سطوح مختلف تعاملات عامل‌ها با یکدیگر و با محیط

- عامل کشاورز

هدف این عامل به طور کلی افزایش میزان درآمد (افزایش سرمایه) و یا حداقل حفظ درآمد موجود است. مشخصه‌ها و خصیصه‌های این عامل شامل سرمایه موجود، میزان آب در دسترس (بر اساس حقابه تعیین شده)، الگوی کشت، مساحت زمین تحت کشت، نوع روش آبیاری و غیره می‌باشد. برای هر یک از این خصیصه‌ها در مدل، با توجه به بررسی محلی، پرسش‌نامه‌ها و مصاحبه‌های صورت گرفته در منطقه معیارها و روابطی در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، میزان آبی که توسط هر کشاورز مصرف می‌شود، به مساحت تحت کشت، نوع الگوی کشت و روش آبیاری (سنتی یا مدرن) بستگی دارد. همچنان که ذکر شد یکی از خصوصیاتی که عامل‌ها دارند امکان ارتباط و تعامل با دیگر ذینفعان و بازیگران سیستم است. عامل‌های منفرد در دو نوع تعامل شرکت دارند. نوع اول تأثیری است که بر محیط دارند (پمپاژ آب زیرزمینی) که نتایجی مانند افزایش هزینه پمپاژ برای سایر عامل‌ها را به دنبال خواهد داشت. در واقع این نوع تعامل یک مکانیزم ارتباط غیرمستقیم بین عامل‌ها است. این رفتار بازگشتی در مدل با استفاده از شرط گذاشتن برای رفتار عامل‌ها در متغیرهای وضعیت شبیه‌ساز آب زیرزمینی لحاظ می‌شود. نوع دوم تعامل، ارتباط مستقیم بین عامل‌ها است. این موضوع در مدل با فراهم نمودن امکان به اشتراک گذاشتن اطلاعات یا ارزیابی مشاهداتی سایر عامل‌های در همسایگی خود (مثلا کشاورزان موجود در یک روستا) ایجاد می‌شود.

یکی از خصوصیات مهم هر عامل کشاورز که در این مدل مورد توجه قرار گرفته است، میزان محافظه‌کار بودن[۱۲] یا مقاومت عامل در مقابل تغییر است. سیاست‌های مختلفی از طرف دولت از طریق نهادهای ذیربط جهت اصلاح و بهبود وضعیت موجود اعمال می‌گردد (شامل تغییر الگوی کشت، تغییر سیستم آبیاری و غیره). پارامتر محافظه‌کاری در راستای در نظر گرفتن میزان تمایل کشاورزان به اصلاح رویکرد قبلی خود در نظر گرفته شده است. کشاورزان از این جهت، به چند دسته تقسیم می‌شوند. کشاورزان دارای کم‌ترین درجه محافظه‌کاری، در صورت وجود سایر شرایط لازم به سرعت رویکرد خود را اصلاح می‌کنند اما کشاورزان با درجه محافظه‌کاری بالا، حتی با وجود شرایط به سختی و به ویژه در صورت فراگیر شدن اصلاحات مربوطه، تغییر رویکرد خواهند داد.

تحقیقاتی که در زمینه فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان و پیروی سیاست‌های نهادی و به‌کارگیری رویکردهای نوین (به ویژه تکنولوژی‌های پمپاژ و آبیاری) صورت گرفته است، نشان می‌دهد که عملکرد عامل کشاورز در راستای بیشینه نمودن سود اقتصادی است و عامل سود، نقش بسیار مهمی دارد (منابعی مانند Edwards-Jones, 2006; Janssen and van Ittersum, 2007; Holtz and Pahl-Wostl, 2012). از دهه ۹۰ میلادی، بازه وسیعی از عامل‌های دیگر در مطالعات تجربی شناسایی شده‌اند که از عامل‌های روانشناسی کشاورز و ساختار بازار تا عوامل محیط اجتماعی را شامل می‌شوند (Edwards-Jones, 2006). اگرچه اطلاعات کمی در مورد سهم این عوامل مختلف در روند تصمیم‌گیری عامل کشاورز وجود دارد (Janssen and van Ittersum, 2007). با این وجود، مدل توسعه داده شده باید با تأکید بیش‌تر بر تأثیر سود اقتصادی بر روند تصمیم‌گیری کشاورزان، در کنار در نظر گرفتن سایر عوامل تأثیرگذار باشد. با توجه به موارد مذکور، تصمیمات کشاورزان با انگیزه‌های مختلفی اتخاذ می‌گردد و اهداف کشاورزان مناطق مختلف و نیز رفتارهای آن‌ها با وجود اشتراکات بسیار، دارای تفاوت‌هایی نیز هستند. یکی از مسائلی که به عنوان نمونه‌ای از روابط مختلف به کار رفته در مدل می‌توان به آن اشاره نمود، احتمال تغییر روش آبیاری کشاورزان است. پارامترهای موجود در رابطه (۱)، عوامل مهم و مؤثر بر تصمیم‌گیری عامل کشاورز در تغییر یا عدم تغییر تکنولوژی آبیاری است که از نتایج مصاحبه‌ها با کشاورزان و کارشناسان به دست آمده‌اند. البته در سایر پژوهش‌های مرتبط نیز به برخی از این پارامترها اشاره شده است. به عنوان مثال، پژوهش‌هایی مانند Akhbari and Grigg (2015) بر تأثیر همسایگان در بروز رفتار مشارکتی و تغییر رفتار متناسب با رویکردهای سیاستی تأکید کرده‌اند.

$$P_{irrChange} = \frac{\alpha E_{cap} + \beta E_{neighbour} + \gamma E_{cons} + \lambda E_{def}}{\alpha + \beta + \gamma + \lambda} \qquad (۱)$$

در این رابطه، $P_{irrChange}$ احتمال تغییر روش آبیاری یک عامل کشاورز (استفاده از روش‌های آبیاری تحت فشار)، E_{cap} تأثیر میزان سرمایه موجود کشاورز، $E_{neighbour}$ تأثیر همسایگان، E_{cons} پارامتر محافظه‌کاری عامل و E_{def} اثر کمبود منابع آبی بر تصمیم عامل کشاورز جهت تغییر روش آبیاری است. پارامترهای α، β، γ و λ نیز به ترتیب میزان اثرگذاری پارامترهای مذکور را نشان می‌دهد که بر اساس شرایط محلی و با استفاده از نتایج پرسش‌نامه‌ها تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که در محاسبه تأثیر میزان سرمایه کشاورز، هزینه تغییر تکنولوژی آبیاری بر اساس نوع آن و مساحت زمین کشاورز به عنوان حداقل سرمایه لازم در نظر گرفته شده و بر اساس میزان افزایش سرمایه نسبت به این میزان حداقل تا دو برابر سرمایه حداقل، مقدار این پارامتر از صفر تا یک تغییر خواهد کرد. تأثیر همسایگان نیز بر اساس نسبت تعداد همسایگان دارای آبیاری مدرن به کل تعداد همسایگان تعریف شده است. جهت تعریف همسایگی‌ها، روستاهای موجود در دشت شبستر- صوفیان بر اساس نزدیکی و ارتباط بین روستاها در ۱۲ زیربخش تقسیم شده‌اند. اثر کمبود نیز به صورت نسبت

مجموع کمبود آبی محاسبه شده در مدل در سال جاری به کل نیاز آبی برای آن عامل در نظر گرفته می‌شود.

تغییرات میزان سرمایه کشاورز بر اساس درآمد خالص این عامل در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از روابط (۲) و (۳) در هر سال محاسبه می‌گردد. رابطه خطی استفاده شده بین میزان تأمین آب مورد نیاز و درآمد سالانه کشاورز بـــر اساس فـرض ساده‌کننده رابطه خطی بین کمبود آب و میزان تـــولید محصول در نظر گرفته شده است (Schlüter and Pahl-Wostl, 2007). در واقع، تولید محصول در گیاهان مختلف وابسته به مراحل مختلف رشد و شدت کمبود آب، به نسبت‌های متفاوتی از کمبود آب تأثیر می‌پذیرد و در مورد هر گیاه باید در شرایط محلی مورد بررسی دقیق قرار گیرد.

$$I_i = I_{\max,i} . A_{c,i} . (1 - \frac{\sum_{m=1}^{12} Def_{i,m}}{\sum_{m=1}^{12} D_{i,m}}) \qquad (۲)$$

$$I_{max,i} = (Y_i * P_i - C_i)/1E + 06 \qquad (۳)$$

در این روابط، $I_{i,t}$ درآمد خالص سالانه کشاورز در سال i (میلیون ریال)، $I_{max,i}$ درآمد خالص سال i در هر هکتار با فرض عدم وجود کمبود آب (میلیون ریال)، $A_{c,i}$ مساحت کشت شده عامل در سال i (هکتار)، $Def_{i,m}$ میزان کمبود آبی در ماه mام سال i (مترمکعب) است که از تفاضل میزان آب موجود (بر اساس مجوز برداشت) عامل و $D_{i,m}$ که میزان آب مورد نیاز در ماه mام سال i (مترمکعب) است، به دست می‌آید. Y_i عملکرد میانگین محصول (تولید محصول (کیلوگرم) در هر هکتار)، P_i قیمت هر کیلوگرم محصول (ریال) و C_i هزینه تقریبی تولید در هر هکتار (ریال) است که بر اساس نوع محصول کشت شده برای عامل i محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که پارامترهای مذکور بر اساس توضیحات آورده شده در بخش ۳-۳ و بر اساس مقادیر جدول ۱ در نظر گرفته می‌شوند.

- عامل آب منطقه‌ای

هدف کلی این عامل جلوگیری از افت بیش‌تر سطح آبخوان و احیا و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی موجود در آینده است. سازمان آب منطقه‌ای استان و به تبع آن اداره امور آب شهرستان شبستر، بر اساس سیاست‌های کلی تعیین شده توسط شورای عالی آب و اسناد بالادستی موجود، لازم است رویکردهای مدیریتی لازم را در راستای هدف مذکور اتخاذ نماید. لذا در هر سال آبی، حداکثر مجاز برداشت آب از چاه‌ها اعلام شده و با توجه به نصب کنتورهای هوشمند، میزان برداشت‌ها کنترل می‌گردد. در مدل ارائه شده، حداکثر مجاز برداشت در ابتدای هر سال به تمامی کشاورزان اعلان عمومی شده (از طریق یک پیام ACL) و میزان آب در دسترس هر کشاورز، بر اساس آن مشخص می‌گردد. البته ممکن است تخصیص در نظر گرفته شده برای هر عامل که توسط آب منطقه‌ای تعیین می‌گردد، رعایت نشده و در مدل، احتمال اضافه برداشت براساس شرایط سناریوهای تعریف شده در بخش ۳-۴ لحاظ گردیده است.

- عامل جهاد کشاورزی

هدف اصلی این عامل، افزایش میزان تولید محصولات کشاورزی در منطقه و یا حداقل ثابت نگه‌داشتن آن است. از دیگر اهداف عمده این عامل، تلاش در راستای تغییر الگوی کشت در راستای سیاست‌های تعیین شده و مکانیزه نمودن آبیاری است. در این راستا، سیاست‌های تشویقی از طرف این نهاد که متولی اصلی بخش کشاورزی است، در نظر گرفته شده است. به عنوان نمونه، اعطای کمک‌های بلاعوض جهت توسعه سیستم‌های آبیاری نوین از سیاست‌هایی است که در این زمینه در نظر گرفته شده است. در مدل ABM، اثرات این سیاست‌های تشویقی در قالب سناریوهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

یکی از عناصر مهم مدل حاضر علاوه بر محیط مجازی تعامل عامل‌ها در جامعه، آبخوانی است که عامل‌ها در تعامل با آن هستند. سطح آب زیرزمینی در اثر کاهش تغذیه، افزایش برداشت یا بهره‌برداری و یا ترکیبی از هر دو افت خواهد کرد. در کنار تغذیه‌ای که توسط بارش و جریان آب سطحی صورت می‌گیرد، عامل کشاورز از آبخوان برداشت کرده و موجب کاهش سطح آب زیرزمینی می‌شود. از طرف دیگر، همچنان که ذکر شد عامل آب منطقه‌ای در تلاش است که از افت سطح آب زیرزمینی جلوگیری کرده و وضعیت آن را بهبود بخشد. در سیستم‌های اجتماعی اکولوژیکی منابع آب، کاربران با رفتارها و تصمیم‌های خود، بر منابع آب اثر گذاشته و متقابلاً از آن‌ها تأثیر می‌گیرند. مدل‌سازی آب زیرزمینی در این مطالعه با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی[۱۳] انجام شده است. در این مدل، داده‌های بارش، تبخیر و سطح آب زیرزمینی در زمان قبل (t-1) به عنوان گره‌های ورودی شبکه عصبی و سطح آب زیرزمینی در زمان حال (t) به عنوان گره خروجی، شبکه آموزش داده شده و سپس مورد تست قرار گرفته است. سپس از مدل آموزش دیده جهت برآورد سطح آب زیرزمینی در بازه‌های زمانی مختلف در ارتباط با مدل عامل‌بنیان استفاده گردیده است.

۳-۳- پیاده‌سازی مدل

مدل حاضر در گام زمانی ماهانه برای مدت ۱۰ سال اجرا می‌شود. جهت افزایش سرعت اجرای مدل، کشاورزان با مشخصات مشابه در

هر روستا به صورت یک عامل در مدل وارد شده‌اند که طبق بررسی انجام شده، تأثیری در دقت مدل و نتایج آن ایجاد نمی‌شود. لذا تعداد ۵۰۸ عامل کشاورز در مدل در نظر گرفته شده است. در این مدل، ۱۱ نوع الگوی کشت مختلف زراعی و باغی (الگوی کشت غالب منطقه) لحاظ شده است. روش‌های آبیاری در نظر گرفته شده شامل دو روش کلی آبیاری سنتی و مدرن (شامل آبیاری قطره‌ای و بارانی) هستند. با توجه به اهمیت عامل اقتصادی در تصمیم‌گیری کشاورزان، در مدل حاضر زیرمدل محاسبه سود اقتصادی کشاورزان در نظر گرفته شده است. در جدول ۱، مشخصات در نظر گرفته شده برای هر یک از محصولات نشان داده شده است. قیمت محصولات و هزینه‌های تولید در هر هکتار (شامل کود، سم، بذر، کارگر، هزینه پمپاژ و غیره) با استفاده از گزارش آمارگیری قیمت فروش محصولات و هزینه خدمات کشاورزی که توسط مرکز آمار ایران در سال ۹۵ انجام شده، محاسبه شده است (Statistical Center of Iran, 2016). میزان تولید محصول در هر هکتار در منطقه (عملکرد محصول) نیز بر اساس اطلاعات اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی تحت عنوان سیمای آماری بر اساس میانگین مقادیر سال‌های ۹۱ تا ۹۵ به دست آمده است. نیاز خالص آبیاری محصولات از نتایج طرح نیاز خالص آبیاری محصولات زراعی و باغی ایران معروف به سند ملی آب (نرم‌افزار NETWAT) استخراج شده که به صورت نیاز ماهانه در مدل وارد گردیده است. بر اساس نحوه اجرای روش‌های آبیاری در منطقه (بر اساس نظرات کارشناسی) و نیز گزارش Agricultural Engineering Research Institute (2015)، راندمان آبیاری در روش سطحی برابر ۰/۴۵، راندمان آبیاری بارانی ۰/۶۵ (اراضی زراعی) و راندمان آبیاری قطره‌ای برابر ۰/۸ (باغات) لحاظ گردیده است.

۳-۴- تعریف سناریوها

با استفاده از مدل توسعه داده شده می‌توان رویکردهای مدیریتی مختلف را مورد ارزیابی قرار داد. یکی از مسائلی که در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود این است که بسیاری از کشاورزان در وضعیت عدم وجود کنتورهای هوشمند، آب زیرزمینی را بیش‌تر از میزان تعیین شده در پروانه چاه (احکام و قواعد رسمی) برداشت می‌کنند. بنابراین نمی‌توان به سادگی فرض نمود که با اعمال محدودیت‌های مصارف آب توسط عامل آب منطقه‌ای، اضافه برداشت‌ها کنترل خواهند شد و همه کشاورزان همواره از قوانین پیروی می‌کنند. اما در طرح نصب کنتورهای هوشمند که از برنامه‌های مذکور در طرح احیا و تعادل بخشی منابع آب زیرزمینی است، احتمال اضافه برداشت بسیار کم‌تر می‌شود. با توجه به بررسی انجام شده، در منطقه شبستر- صوفیان همکاری و مشارکت کشاورزان در اجرای طرح‌هایی مانند نصب کنتورهای هوشمند به نسبت مناطق دیگر بهتر بوده و طبق اظهارات مسئولین استانی و محلی، مشکلات حادی که در برخی دشت‌های استان در اجرای طرح‌ها وجود داشته، در این منطقه بسیار کم‌تر دیده شده است. لذا هر چند در حالت نصب کنتورهای هوشمند باز هم احتمال اضافه برداشت وجود دارد و این احتمال صفر در نظر گرفته نشده (به دلیل امکان تخلفاتی مانند دستکاری کنتورها و غیره)، اما این احتمال بسیار کم‌تر می‌شود. لذا به عنوان نمونه‌ای از تأثیر رویکردهای مدیریتی جهت لحاظ مسأله مذکور، سناریوهایی قبل از اجرای طرح و سناریوهایی دیگر با در نظر گرفتن اجرای طرح طی پنج سال (طبق برنامه طرح تعادل‌بخشی)، در مدل وارد شده و اثرات آن مورد بررسی قرار گرفته است.

Table 1- Crop characteristics for predominant crops in Shabestar-Sofian plain

جدول ۱- مشخصات الگوی کشت غالب در دشت شبستر- صوفیان

Categories	Yield/irrigated (kg/ha)	Net irrigation requirement (m^3/ha)	Total estimated production cost (2016) (million rial/ha)	Price (2016) (rial/kg)
Wheat	3948	1780	27.5	11954
Barley	3635	1140	24.1	8947
Onion	42408	4860	113.8	7089
Tomato	41583	4340	128.1	4310
Alfalfa	8163	5920	31.0	7292
Sunflower	1669	3940	73.2	52256
Peach	13223	5950	165.0	18808
Apricot	11679	3770	165.0	22367
Apple	16914	4680	153.0	16187
Almond	1829	4770	167.0	154764
Grape	10633	4060	109.0	11143

با توجه به سیاست اتخاذ شده توسط نهادهای محلی، در سال‌های اول طرح به دلیل جلوگیری از وارد شدن فشار ناگهانی بر کشاورزان، در صورت درخواست هر کشاورز امکان تخصیص حداکثر ۲۰ درصد آب علاوه بر تخصیص اولیه وجود خواهد داشت. در مدل، عامل‌های کشاورز در صورت کمبود آب جدی، یک پیام درخواست به آب منطقه‌ای ارسال می‌کنند. این پیام‌ها توسط عامل آب منطقه‌ای دریافت و بررسی می‌شود. در دو سال اول، حداکثر با دو درخواست و در سه سال بعدی با یک درخواست اضافه تخصیص در هر سال موافقت شده و میزان تخصیص اضافی در یک پیام با قالب موافقت به همان عامل کشاورز ارسال می‌شود و به درخواست‌های بیش‌تر، جواب منفی داده می‌شود.

در سال‌های اخیر، سازمان جهاد کشاورزی با در نظر گرفتن مشوق‌هایی تلاش کرده است که کشاورزان را به تغییر سیستم آبیاری خود ترغیب نماید. در کنار این مشوق‌ها، آموزش‌هایی در راستای نیل به این هدف در نظر گرفته شده است. اما نتایج مصاحبه‌ها و پرسش‌نامه‌ها نشان می‌دهد که به دلیل عدم پرداخت به موقع تسهیلات و کمک‌های بلاعوض در نظر گرفته شده، عملاً درصد تأثیر این مشوق‌ها چندان بالا نبوده و بیش‌تر تأثیر فهم کشاورزان از مزایای استفاده از سیستم‌های تحت فشار، آن‌ها را به سمت این تغییر سوق داده است. در سناریوهای چهارم و پنجم فرض شده که جهاد کشاورزی، اعطای کمک‌های بلاعوض خود را با روندی مناسب و بدون مشکلات موجود ارائه دهد. پیام‌های درخواست به عامل جهاد کشاورزی ارسال شده و پس از بررسی درخواست‌ها با توجه به منابع موجود، در صورت امکان تسهیلات به صورت پیامی با قالب موافقت به عامل مربوطه فرستاده می‌شود. جهت بررسی موارد مذکور، به عنوان نمونه ۵ سناریوی مدیریتی مختلف (جدول ۲) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج مقایسه می‌شوند.

۴- نتایج و بحث

پنج سناریوی مذکور در جدول ۲ در مدل ABM توسعه داده شده اجرا شده و نتایج آن در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ آورده شده است. همچنان که در شکل ۴ مشخص است ترویج روش‌های نوین آبیاری، نصب کنتورهای هوشمند و اعطای تسهیلات هر یک به سهم خود توانسته‌اند میزان کل برداشت از آب زیرزمینی را کاهش داده و به پایداری منابع آب زیرزمینی کمک کنند. نتایج نشان می‌دهد اجرای همزمان هر سه طرح می‌تواند میزان برداشت‌های سالانه را تا پایان دوره مدل‌سازی حدود ۲۴ میلیون مترمکعب کاهش دهد و حجم تجمعی برداشت‌ها در طول ۱۰ سال به میزان ۲۰۲ میلیون متر مکعب کاهش خواهد یافت. با توجه به این که برآورد بیلان منفی آبخوان دشت شبستر- صوفیان در شرایط فعلی حدود ۵۰۰ میلیون متر مکعب است، حدود ۴۰ درصد از این میزان در طول ۱۰ سال جبران خواهد شد.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴، موفقیت طرح نصب کنتورهای هوشمند در صورت اجرای همزمان مدرن کردن روش‌های آبیاری بهبود چشمگیری می‌یابد (تفاوت سناریوی دوم با سناریوهای بعدی). همچنان که در شکل ۵ مشاهده می‌شود اجرای طرح نصب کنتورهای هوشمند به تنهایی به دلیل ایجاد کمبود زیاد در تأمین نیازها، منجر به کاهش قابل توجه درآمد کشاورزان خواهد شد (کاهش حدود ۱۲۷ میلیارد ریالی درآمد سالانه کل کشاورزان) و لذا نارضایتی اجتماعی را افزایش داده و احتمال در پیش گرفتن راهکارهای خلاف قانون افزایش می‌یابد (همچنان که در برخی مناطق مسائلی مانند دستکاری کنتورها و غیره گزارش شده است). لازم به ذکر است که در منطقه مورد مطالعه به جز بخش‌هایی محدود از دشت که کشت و صنعت‌ها فعالیت می‌کنند، بخش عمده کشاورزی به صورت سنتی است و در واقع، اقتصاد خانوارها به درآمد محدود حاصل از کشاورزی در زمین‌های بعضاً بسیار کوچک وابسته است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که اجرای طرح‌های پایش و کنترل مانند طرح نصب کنتورهای هوشمند بدون در نظر گرفتن سناریوهایی که به کاهش مصرف کشاورزان کمک نماید، هرگز به حکمرانی پایدار منجر نخواهد شد و تنها موجب افزایش تنش‌های اجتماعی و سیاسی می‌گردد.

Table 2- Management scenarios considered in the developed model
جدول ۲- معرفی سناریوهای مدیریتی و تلفیقی تعریف شده در این تحقیق

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Promoting modern irrigation methods	×	×	✓	✓	✓
Plan to install intelligent flow meters	×	✓	✓	×	✓
Paying grants to farmers	×	×	×	✓	✓

اما همچنان که در نمودار نمایان است تغییر روش‌های آبیاری از سنتی به مدرن وضعیت را بهبود داده و به دلیل افزایش راندمان آبیاری کمبود تأمین چندانی در سیستم ایجاد نمی‌شود. در این حالت، تنها در سال‌های اول درآمد کشاورزان اندکی کاهش می‌یابد و حتی در سال‌های بعد، درآمد کشاورزان کمی افزایش یافته است (سناریوی سوم). دلیل این موضوع آن است که تأثیر ترویج روش‌های نوین آبیاری، تجربه موفق همسایگان در به‌کارگیری آبیاری‌های بارانی و قطره‌ای و غیره در سال‌های بعدی بیش‌تر نمایان می‌شود. در مقایسه سناریوهای سوم و چهارم، تأثیر اعطای تسهیلات بلاعوض و نصب کنتورهای هوشمند در کاهش حجم برداشت‌های سال پایانی دوره شبیه‌سازی تقریبا یکسان بوده است. اما میزان برداشت تجمعی در طول ۱۰ سال مدل‌سازی در سناریوی چهارم ۲۸ میلیون مترمکعب کم‌تر از سناریوی سوم بوده است. البته با توجه به این‌که در پنج سال اول طرح نصب کنتورهای هوشمند، امکان تخصیص اضافه در نظر گرفته شده است، در سال‌های بعد اثرگذاری آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، میزان تخصیص توسط عامل آب منطقه‌ای بر اساس ۲۰۰۰ ساعت در سال برای هر چاه تعیین شده که در صورت کاهش این میزان، تأثیر اجرای نصب کنتورها در کاهش برداشت‌ها نیز بیش‌تر خواهد شد. ضمناً باید توجه نمود که در زمینه اعطای تسهیلات بلاعوض فرض بر این بوده است که اجرای طرح با هیچ‌گونه محدودیت منابع مالی مواجه نبوده و بتوان به تمامی متقاضیان در اسرع وقت تسهیلات مورد نیاز را پرداخت کرد. در این صورت، با توجه به عدم نصب کنتورهای هوشمند در سناریوی چهارم و امکان کاشت محصولات با حداکثر ظرفیت ممکن، بیش‌ترین سود سالانه برای کشاورزان حاصل خواهد شد.

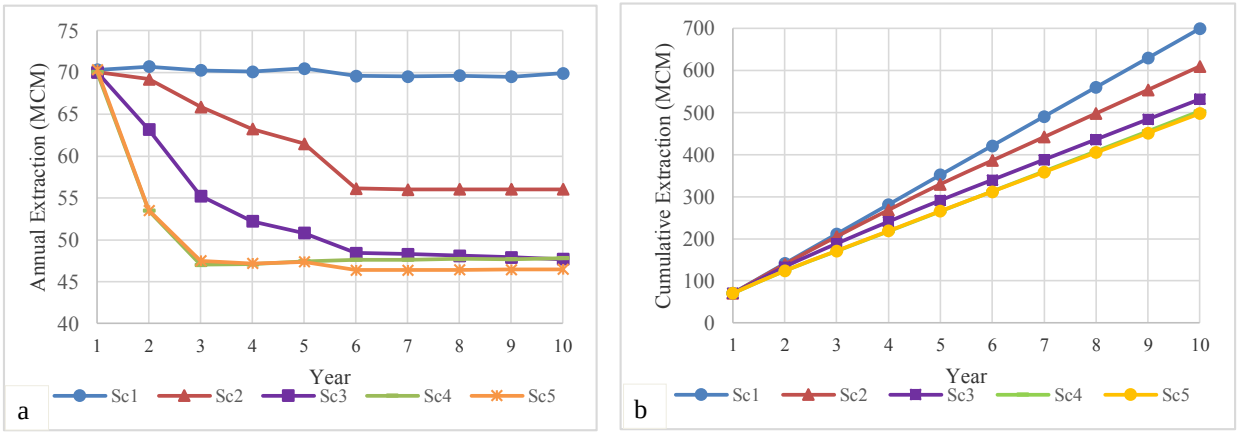

Fig. 4- Output parameters variations in different scenarios: a) Total annual extraction, b) Total cumulative extraction;

شکل ۴- تغییرات خروجی‌های مدل: a) برداشت کل سالانه و b) برداشت تجمعی کل، در سناریوهای مختلف

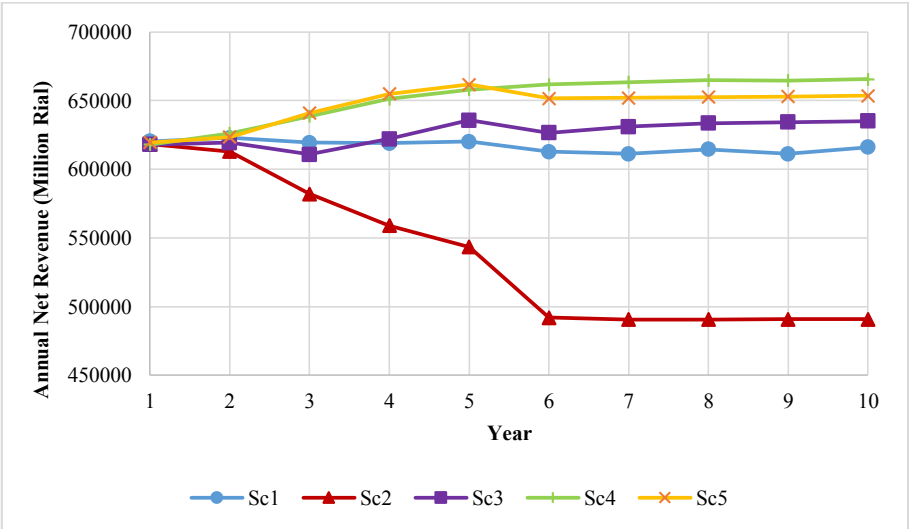

Fig. 5- Output total annual net revenue variations in different scenarios

شکل ۵- تغییرات درآمد خالص سالانه کل کشاورزان در سناریوهای مختلف مدل‌سازی شده

در شکل ۶ نیز مساحت اراضی تحت کشت با روش‌های آبیاری سنتی و مدرن به تفکیک در سال‌های اجرای مدل برای سناریوهای مختلف آورده شده است. همچنان که در شکل مشخص است در صورت اجرای هر سه طرح حمایتی و پایشی در طول پنج سال اول تقریباً تمامی اراضی به آبیاری مدرن مجهز خواهند شد. البته همچنان که ذکر شد در زمینه اعطای تسهیلات بلاعوض در مدل حاضر، فرض بر عدم وجود محدودیت در اعطای تسهیلات و ایده‌آل بودن شرایط اجرای این طرح بوده است. لذا همچنان که در نتایج نشان داده شده است در سناریوی چهارم تقریباً تمامی زمین‌هایی که در سناریوهای قبلی به سیستم آبیاری نوین مجهز نشده بودند شامل این تغییر شده‌اند. نکته قابل توجه این است که بر اساس نتایج سناریوی سوم، اجرای طرح نصب کنتورهای هوشمند در کنار ترویج روش‌های آبیاری مدرن منجر به تغییر روش آبیاری بیش از ۸۰ درصد اراضی شده است. این موضوع با نتایج عملی مشاهده شده در برخی روستاها که برنامه ترویج و هوشمندسازی به خوبی در حال اجرا هستند، مطابقت دارد. به عنوان نمونه در مصاحبه‌های انجام شده، در برخی از موارد که کشاورزان نسبت به منافع تغییر روش آبیاری آگاهی کافی داشتند، اذعان می‌کردند که با وجود عدم اعطای تسهیلات، سیستم آبیاری خود را به آبیاری بارانی یا قطره‌ای تغییر داده‌اند. در این روستاها، تأثیر همسایگان و هم‌روستاییانی که سیستم آبیاری خود را تغییر داده‌اند و مشاهده مزایای این تغییر، مشوق بسیار خوبی در این زمینه بوده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده، خروجی نمونه سناریوهای مدیریتی اجرا شده در مدل به صورت کمی نشان می‌دهد در صورتی اجرای طرح‌های تشویقی و تنبیهی موفق خواهد بود که تمامی عامل‌های نهادی با همکاری هم و به صورت هماهنگ طرح‌های خود را در منطقه اجرا نمایند و نیز جلب مشارکت کشاورزان از طریق روش‌های ترویجی و غیره اثرگذاری اجرای طرح‌ها را به صورت قابل توجه افزایش خواهد داد. در این صورت، می‌توان بیلان منفی سفره آب زیرزمینی را کاهش داده و حتی در آینده‌ای نزدیک به بیلان مثبت دست یافت.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل عامل‌بنیان به عنوان روشی کارآمد جهت مدیریت مشارکتی منابع آب زیرزمینی معرفی شده است. با استفاده از این روش می‌توان ضمن مدل نمودن رفتار ذینفعان مختلف و روابط و تعاملات بین آن‌ها و با محیط، با مشارکت پویای ذینفعان منفرد و نهادی در فرآیند مدل‌سازی امکان اتخاذ تصمیمات صحیح با پشتوانه اجرایی مناسب را فراهم نمود. در مدل حاضر، اهداف، خصوصیات و رفتارهای کشاورزان به عنوان بهره‌برداران اصلی آب زیرزمینی و دو عامل نهادی اصلی آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی با مشارکت خود کشاورزان و کارشناسان نهادهای مذکور در قالب مصاحبه‌ها، پرسش‌نامه‌ها و جلسات حضوری مدل شده‌اند. همچنین سناریوهای نمونه‌ای که از خروجی همان فرآیند مشارکتی به‌دست آمده بودند در مدل وارد شده و نتایج آن‌ها مورد ارزیابی واقع شد. بر اساس نتایج به دست آمده، در صورت اجرای هر سه طرح ترویج روش‌های نوین آبیاری، نصب کنتورهای هوشمند و اعطای تسهیلات بلاعوض می‌توان حدود ۴۰ درصد بیلان منفی آبخوان را در طول ۱۰ سال جبران نمود. لذا در صورت هماهنگی لازم نهادهای مؤثر در اجرای طرح‌ها و جلب مشارکت کشاورزان منطقه از طریق آموزش و ترویج می‌توان وضعیت بحرانی منابع آب زیرزمینی را به تدریج بهبود داده و از روند سریع افت کیفی و خشک شدن چاه‌ها جلوگیری کرد. در این مقاله، با ارائه نمونه‌ای از مدل‌سازی رفتاری افراد و نهادهای مرتبط نشان داده شد که می‌توان با کمک گرفتن از مدل‌های عامل‌بنیان، سناریوهای مدیریتی مختلف را در فرآیند مشارکتی و با توجه به فرآیندهای بازخوردی پیش از اجرا و تحمیل هزینه‌های مربوطه مورد بررسی قرار داده و بهبود قابل توجهی در رویکردهای مدیریتی ایجاد نمود.

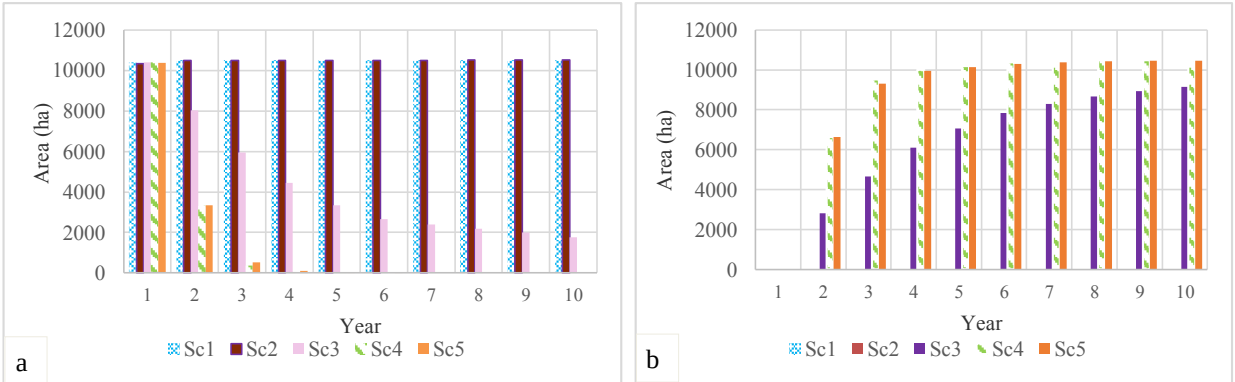

Fig. 6- Variations of irrigation area using a) Traditional, b) Modern methods; in different scenarios

شکل ۶- تغییرات مساحت تحت کشت با روش آبیاری: a) سنتی و b) مدرن، در سناریوهای مختلف

علاوه بر این، توسعه این گونه مدل‌ها می‌تواند با ایجاد فهم بهتر در ذینفعان در سطوح مختلف منفرد، گروهی و نهادی، ضمن جلب مشارکت مؤثر، در روند آموزش ذینفعان تأثیر قابل توجهی داشته و تغییر الگوی رفتاری مورد نیاز جهت بهبود عملکرد سیستم را پدید آورد. ضمنا بر پایه فهم ایجاد شده می‌توان روند اصلاحات حکمرانی مناسب را پی‌ریزی و پیگیری نمود.

۶- تشکر

مؤلفین بر خود لازم می‌دانند از شرکت آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی آذربایجان شرقی، اداره امور آب و جهاد کشاورزی شهرستان شبستر، اساتید محترم دکتر عطاالله ندیری و دکتر محمد عباس‌زاده و همکاران دکتر علی بوداقی و مهندس محمدامین کاظمی و نیز تمامی کشاورزان روستاهای منطقه که در پیشبرد پژوهش حاضر صمیمانه همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی نمایند.

پی‌نوشت‌ها

1- Agent-Based Modeling
2- Groundwater Banking
3- Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey
4- Adaptive Systems
5- Agent
6- Environment
7- Java Agent Development Framework
8- The Foundation for Intelligent, Physical Agents (http://www.fipa.org)
9- Agent Communication Language
10- Individual Agent
11- Institutional Agent
12- Conservatism
13- Artificial Neural Network

۷- مراجع

Abbaszadeh M (2012) Validity and reliability in qualitative researches. Applied Sociology 23(1):19-34 (In Persian)

Agricultural Engineering Research Institute (2015) Improving the efficiency of water use. Technical Report (In Persian)

Akhbari M, Grigg NS (2013) A framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. Water Resources Management 27(11):4039-4052

Akhbari M, Grigg NS (2015) Managing water resources conflicts: Modelling behavior in a decision tool. Water Resources Management 29(14):5201-5216

Al-Amin S, Berglund EZ, Larson KL (2015) Agent-based modeling to simulate demand management strategies for shared groundwater resources. In: World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems (ASCE 2015), May 17-21, Austin, Texas

An L (2012) Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. Ecological Modelling 229:25-36

Andreas MR (2003) Validity and reliability tests in case study research: a literature review with "hands-on applications for each research phase. Qualitative Market Research 6(2):75-86

Bakarji J, O'Malley D, Vesselinov VV (2017) Agent-based socio-hydrological hybrid modeling for water resource management. Water Resources Management 31(12):3881-3898

Barari MH, Bagheri A, Hashemi SM (2016) Analysis of the issues of Lake Zrêbar in a context of integrated water resources management using a stakeholders' participatory approach in a basin scale. Iran-Water Resources Research 12(2):1-12 (In Persian)

Bars ML, Attonaty JM, Pinson S (2002) An agent-based simulation for water sharing between different users. In: Xth EAAE Congress: Exploring Diversity in the European Agri-Food System, 28-31 August, Zaragoza (Spain)

Barreteau O, Sauquet E, Riaux J, Gailliard N, Barbier R (2014) Advances in social simulation: Agent based simulation of drought management in practice. Springer Berlin Heidelberg 237-248

Belaqziz S, El Fazzikia A, Mangiarottib S, Le Pageb M, Khabbac S, Er Rakid S, El Adnania M, Jarlanb L (2013) An agent based modeling for the gravity irrigation management. Procedia Environmental Sciences 19:804-813

Bellifemine F, Caire G, Trucco T, Rimassa G (2010) JADE Programmer's Guide. Telecom Italia S.P.A., Boston, USA

Berglund EZ (2015) Using agent-based modeling for water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management 141(11):1-17

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 and Software 73:305-323

Chu J, Wang C, Chen J, Wang H (2009) Agent-based residential water use behavior simulation and policy

Lotfi S, Araghinejad S (2017) A review on challenges in application of agent-based models in water resources systems. Iran-Water Resources Research 13(2):115-126 (In Persian)

Macal CM, North MJ (2006) Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference (IEEE), 73-83

Macal CM, North MJ (2010) Tutorial on agent-based modelling and simulation. Journal of Simulation 4:151-162

Ohab-Yazdi SA and Ahmadi A (2018) Simulation of the effective agents' behavior on water resources management for evaluation of their interactions under agent-based model framework in lenjanat sub-basin of Zayandehrood river basin. Iran-Water Resources Research 14(2):131-149 (In Persian)

Reeves HW, Zellner ML (2010) Linking MODFLOW with an agent-based land-use model to support decision making. Groundwater 48(5):649-660

Schelling TC (1971) Dynamic models of segregation. Journal of Mathematical Sociology 1:143-186

Schlüter M, Pahl-Wostl C (2007) Mechanisms of resilience in common-pool resource management systems: an agent-based model of water use in a river basin. Ecology and Society 12(2):4-26

Statistical Center of Iran (2016) The yields price and cost of agricultural services in rural areas. Technical Report (In Persian)

Torres AS (2013) Modelling the future water infrastructure of cities. Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, the Netherlands

Zeinali A, Hassanpoor MA, Mirheidari F (2011) Adverse consequences of declining groundwater level in Shabestar-Sofian plain and approach of the balance maintenance. In: Second National Conference of Applied Research in Iran Water Resources, May 18-19, Zanjan, Iran (In Persian)

Zellner ML (2008) Embracing complexity and uncertainty: the potential of agent-based modeling for environmental planning and policy. Planning Theory & Practice 9(4):437-457

implications: A case-study in Beijing City. Water Resources Management 23:3267-3295

Dehghan M, Rezayian S, Naderi J (2011) Assessment of the groundwater quality changes in Shabestar plain using GIS. In: Geometric Conference 2011, Iran National Cartographic Center, Tehran, Iran (In Persian)

Dinpazhoh Y, Fakheri-Fard A, Hassanpoor MA, Beheshtee-Vayghan V (2014) Trend analysis of groundwater quality in Shabestar-Sofain plain. Irrigation Sciences and Engineering 38(1):55-69 (In Persian)

Farmer JD, Foley D (2009) The economy needs agent-based modelling. Nature 460(7256):685-686

Ghallehban-Tekmedash M, Taheri-Tizro A, Zare-Abyane H (2015) Agent based modeling framework in simulation of stakeholder's behavior for managing water resources. Journal of Water and Sustainable Development 2(1):87-94 (In Persian)

Gilbert N (2008) Agent-based models. Sage Publications, California, USA

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)

Helbing D, Balietti S (2011) How to do agent-based simulations in the future: from modeling social mechanisms to emergent phenomena and interactive systems design. Santa Fe Institute, Santa Fe, USA

Holtz G, Pahl-Wostl C (2012) An agent-based model of groundwater over-exploitation in the Upper Guadiana, Spain. Regional Environmental Change 12(1):95-121

Janssen S, van Ittersum MK (2007) Assessing farm innovation and responses to policies: a review of bio-economic farm models. Agricultural Systems 94:622-636

Kock BE (2008) Agent-based models of socio-hydrological systems for exploring the institutional dynamics of water resources conflict. M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA