تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هفدهم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰
Volume 17, No. 4, Winter 2022 (IR-WRR)
۱۳۱-۱۴۳

توسعه مدل عامل‌بنیان با هدف بررسی سیاست‌های مدیریت منابع آب زیرزمینی؛ مطالعه موردی آبخوان دامغان

راضیه جباری[۱*]، مهدی ضرغامی[۲]، محمدجواد عنبری[۳] و عطاالله ندیری[۴]

چکیده

برداشت بیش از حد آب از سفره‌های زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه‌خشک تهدید جدی برای منابع طبیعی و محیط‌زیست به شمار می‌آید. دشت ممنوعه بحرانی دامغان در سال‌های اخیر با افت سطح تراز آب زیرزمینی مواجه بوده است. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی رفتار ذینفعان مؤثر در منطقه، از مدل عامل‌بنیان استفاده شده است. در ابتدا مدل عامل‌بنیان با توجه به ذینفعان کلیدی منطقه (کشاورزان مهم‌ترین مصرف کننده آب زیرزمینی در منطقه، شرکت آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی)، مشخصات، رفتار، خصوصیات محیط و نحوه تعامل بین عامل‌ها و محیط (آبخوان دامغان) درنظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به چاه‌های بهره‌برداری و مشخصات کشت غالب منطقه مربوط به سال ۱۳۹۷ می‌باشد. به منظور شناسایی رفتار و خصوصیات عامل‌ها، بازدید از منطقه و مصاحبه با کارشناسان و کشاورزان صورت پذیرفته است. مشخصه‌ها، رفتارها و تعاملات عامل‌ها با قوانین اگر-آنگاه یا عملگرهای منطقی بیان و یا با معادلاتی فرمول‌بندی شده است. سپس، سناریوهای مدیریتی در منطقه مورد مطالعه، به مدت ۱۰ سال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که اجرای همزمان چهار طرح نصب کنتورهای هوشمند، تعدیل پروانه چاه‌ها، ترویج سیستم‌های نوین آبیاری و ایجاد شرکت‌های تعاونی تولید ضمن حفظ درآمد خالص کشاورزان منجر به کاهش برداشت آب به میزان ۴۴ درصد نسبت به سناریوی پایه می‌شود. همچنین، در اثر اجرای این ۴ طرح، روش آبیاری ۴۰۰۰ هکتار از اراضی کشاورزی به آبیاری‌های تحت فشار تغییر می‌یابد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عامل‌بنیان، شبیه‌سازی رفتاری، ذینفعان، برداشت منابع آب زیرزمینی، دشت دامغان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۲۷
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۹

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران.
۲- هیأت علمی قطب هیدروانفورماتیک دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط زیست دانشگاه تبریز و هیأت علمی همکار پژوهشکده سیاست‌گذاری دانشگاه صنعتی شریف، ایران.
۳- دانش‌آموخته دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران.
۴- استادیار گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکانپذیر است.

Development of Agent-Based Model with the Aim of Discussion Groundwater Resources Management Policies; Case Study of Damghan Aquifer

R. Jabbari [1] , M. Zarghami [2], M.J. Anbari[3], and A. Nadiri [4]*

Abstract

Excessive water extraction from aquifers in arid and semi-arid areas poses a serious threat to natural resources and the environment. Damghan's critical forbidden plain has faced a drop in groundwater level in recent years. In this study, the agent-based model has been used to simulate the behavior of effective stakeholders in the region. First, the agent-based model is considered based on the key stakeholders of the region (farmers are the most important consumers of groundwater in the region, Regional Water Company and Agriculture- Jahad), characteristics, behavior, characteristics of the environment, how the interaction between the agents and the environment (Damghan aquifer). Information about exploitation wells and characteristics of the dominant cultivation in the region is related to 1397. To identify the behavior and characteristics of the agents, a visit to the area and interviews with experts and farmers have been done. The characteristics, behaviors, and interactions of agents are expressed by if-then rules or logical operators or by formulated equations. Then, management scenarios in the study area have been studied for 10 years. The results show that the simultaneous implementation of four projects of installing smart meters, modifying well licenses, promoting new irrigation systems, and establishing production cooperatives while maintaining farmers' net incomes will reduce water withdrawal 44% compared to the base scenario. Also, as a result of the implementation of these four projects, the irrigation method of 4000 hectares of agricultural lands will be changed to pressurized irrigation.

Keywords: Agent-Based Modeling, Behavioral Simulation, Stakeholders, Groundwater Resources Extraction, Damghan Plain, Iran.

Received: October 19, 2021
Accepted: January 29, 2022

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran. Email: raziyejabbari73@gmail.com
2- Professor, Center of Excellence in Hydroinformatics, Department of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz and Adjunct Professor, Sharif Policy Research Institute, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
3- Ph.D. Graduated of Water Resources Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.
4- Assistant Professor, Department of Earth Science and Institute of Environment, University of Tabriz, Iran.
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1400.17.4.8.5

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

افزایش تقاضای آب در نتیجه افزایش جمعیت، بهره‌برداری بیش از حد منابع آب و بروز خشکسالی در چند دهه اخیر، موجب کاهش روزافزون این منابع ارزشمند به‌خصوص منابع آب زیرزمینی شده است. از مدل‌سازی عامل‌بنیان[1] (ABM) در شاخه مدیریت منابع آب به دلیل پیچیدگی رفتار انسان‌ها با محیط بهره می‌گیرند. پیچیدگی رفتار ذینفعان و اجرای قوانین جدید طرح احیاء و تعادل‌بخشی، مدیریت منابع آب زیرزمینی را با چالش‌های جدی روبرو کرده است که بخش مهمی از آن، ناشی از تأثیر رفتار ذینفعان (کشاورزان، نهادها، تشکل‌ها و دیگر بهره‌برداران) در سیستم پیچیده هیدرولوژیکی- اجتماعی بر وضعیت آبخوان است. Zellner (2008) پتانسیل و محدودیت‌های این نوع مدل را به عنوان مدل‌هایی که می‌توانند در فهم چنین سیستم‌های پیچیده‌ای نقش ایفا کنند ارزیابی کرده است. توضیح پیچیدگی این نوع مدل‌ها باعث می‌شود تصمیم‌های آگاهانه‌تری در خصوص مدیریت منابع آب گرفته شود. همچنین، به عنوان نمونه کاربرد مدل‌سازی عامل‌بنیان را در مدیریت آب زیرزمینی نشان داده است. رفتار و تعاملات ذینفعان در مدیریت مناقشات را می‌توان از طریق بازی در مدل عامل‌بنیان شبیه‌سازی کرد، که در آن ذینفعان در جهت همکاری در بازی به حل مشکل تشویق می‌شوند. برخی از پیشرفت‌های اجتماعی و نهادی در قالب ارائه مشوق‌ها، مجازات‌ها، مقررات جدید و غیره به عنوان راهبردهای تشویقی به مدل معرفی شده است. به عنوان مثال، تشویق دولت برای همکاری، جریمه در صورت عدم همکاری و وضع قوانین جدید، فشار سایر عوامل و قید ضرورت حفظ کمیت و کیفیت آب، می‌تواند عامل را مجبور به همکاری و کاهش آب تقاضا شده نماید (Akhbari and Grigg, 2013). Akhbari and Grigg (2015) در پژوهشی دیگر علاوه بر ارائه پیشنهادهایی برای شناسایی و توصیف ذینفعان اصلی، چارچوبی بـرای مدیریت مناقشات توسعه داده‌اند که شامل سه مدل می‌باشد: مدل شبیه‌سازی حوضه آبریز، مدل بهینه‌سازی و یک مدل شبیه‌سازی رفتاری. مدل بهینه‌سازی، مصالحه بین توابع هدف را تعیین کرده است. مصالحه‌های حاصل از این مدل، توسط ذینفعان سیستم ارزیابی و رتبه‌بندی شده است و بازخورد آن‌ها جهت توسعه مدل شبیه‌سازی رفتاری درنظر گرفته شده است. در نتیجه، مدل شبیه‌سازی رفتاری، مبتنی بر ABM، تعامل ذینفعان و واکنش آنها به تصمیمات تخصیص آب و نیز ارتباطات نهادی را شبیه‌سازی کرده و توسعه داده است. با این حال، عدم‌قطعیت‌های مرتبط با این رویکرد مدل‌سازی می‌تواند از طریق مطالعات جامعه‌شناختی و تعامل با ذینفعان کاهش یابد در نتیجه مدل توسعه یافته یک رابط هیدرولوژیکی-زیست‌محیطی-انسانی، به منظور ابزار پشتیبانی قدرتمند تصمیم‌گیری برای مدیریت مناقشات و تصمیمات عملی در منابع آب ایجاد می‌کند. این مـدل کاربرد سناریوهای مختلف مـدیریتی را جهت دستیابی بـه نرخ خاصی از کاهش تخصیص آب کشاورزی، از حالت‌هـای مختلف مصالحه ارزیابی می‌کند. Farhadi et al. (2016) یک ساختار عامل‌بنیان را برای بهینه‌سازی کاهش کسری آب آبیاری، افـزایش عدالت در تخصیص آب و کاهش افت آب‌های زیرزمینی به عنوان اهداف سه ذینفع اصلی کشاورزان، دولت و سازمان حفاظت محیط‌زیست ارائه کرده‌اند. عوامل تأثیرگذار اجتماعی شامل آموزش، جریمه و تأثیر همسایگان جهت تشویق کشاورزان به همکاری با تصمیمات مدیریتی در مدل لحاظ شده است که نتایج آن کاهش چشمگیری در استخراج منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. Castilla-Rho et al. (2017) یک مدل عامل‌بنیان برای آبیاری زمین‌های کشاورزی از طریق آب‌های زیرزمینی توسعه داده‌اند که بر اساس همکاری عوامل و اقدامات اجتماعی است به علاوه یک ابزار قدرتمند برای ارزیابی احتمال رعایت مقررات براساس شرایط فرهنگی، اجتماعی- اقتصادی، نهادی و فیزیکی و آمادگی برای تغییر فراتر از آستانه‌ها ارائه شده است. Hu and Beattie (2019) یک مدل عامل‌بنیان با استفاده از استراتژی بهینه‌سازی دو مرحله‌ای با هدف بهینه‌سازی ناهمگنی تصمیم‌گیری کشاورزان در مورد انتخاب محصول و آبیاری از طریق آب زیرزمینی تهیه کرده است. عملکرد استراتژی بهینه‌سازی تحت تأثیر چهار عامل رفتاری ارزیابی می‌شود.

Pouladi et al. (2019) مدل‌سازی عامل‌بنیان (ABM) و نظریه رفتار برنامه‌ریزی شده (TPB) را در چارچوب یک مدل اجتماعی- هیدرولوژیکی ارائه کرده‌اند. این پژوهش به طور عمده به تأثیر رفتار کشاورزان در خشکسالی‌های حـوضه رودخانه زرینه‌رود از طریق پرسش‌نامه و مصاحبه پرداخته است. نتایج نشان می‌دهند مهم‌ترین عوامل در فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان عبارتند از: شرایط مالی، وسعت زمین‌های کشاورزی، سن و تحصیلات کشاورزان. Darbandsari et al. (2020) یک مدل حل اختلاف جدید بر اساس رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان جهت ارزیابی سیاست‌های مختلف مدیریت آب از طریق شبیه‌سازی رفتار ذینفعان مختلف ارائه کرده‌اند. نتایج، کاربرد و بهره‌وری این روش را در مدل‌سازی و مدیریت سیستم‌های منابع آب پیچیده را که از مسائل اجتماعی- اقتصادی و زیست‌محیطی رنج می‌برند، نشان می‌دهند. Anbari et al. (2021) یک مدل عامل‌بنیان جهت کشف راه‌حل‌های پایدار در شرایط عدم قطعیت برای احیای آب زیرزمینی در یک آبخوان بحرانی حوضه دریاچه ارومیه، توسعه داده‌اند. نتایج اجرای سناریوهای مدیریتی مختلف نشان می‌دهند که در صورت هماهنگی لازم در اجرای طرح‌ها می‌توان در طول دوره شبیه‌سازی، تعادل منفی آبخوان را در حدود ۵۰ درصد افت ۳۰ سال گذشته کاهش داد.

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. با این که به نظر می‌رسد رویکردهای مدیریتی اعمال شده توسط نهادهای مؤثر باید موجب بهبود وضعیت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی شوند، 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 مطالعه تلاش شده است با مدل نمودن رفتارهای نهادهای تأثیرگذار در منطقه، بهره‌برداران منابع آب زیرزمینی دشت و نیز ارتباطات پیچیده بین عامل‌های مذکور، اثر اجرای سیاست‌های مطرح بررسی شده و راهکارهایی در جهت بهبود اجرای سیاست‌ها ارائه شده است. در همین راستا از تشکیل شرکت‌های تعاونی در مدل استفاده شده تا موجب کاهش خرده‌مالکی و بهبود وضعیت زندگی کشاورزان گردد و در نهایت با استفاده از مدل عامل‌بنیان سناریوهای مدیریتی مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه

شهر دامغان با جمعیت و مساحتی به ترتیب در حدود ۵۹۰۰۰ نفر و ۱۳۰۰۰ کیلومتر مربع در ناحیه خشک و نیمه خشک ایران قرار گرفته است که سه دشت دامغان، کویر حاج علی قلی (کویر چاه جم) و دشت یزدان آباد (سر کویر) را دربر گرفته است. مختصات جغرافیایی محدوده مطالعاتی دامغان ´۲۳ :°۵۳ تا ´۴۲ :°۵۴ طول شرقی و ´۴۳ :°۳۵ تا ´۳۱ :°۳۶ عرض شمالی می‌باشد. آبخوان دشت دامغان از نوع آزاد و نشتی با وسعتی حدود ۱۳۳۸ کیلومتر مربع می‌باشد که حدود ۶۶ درصد کل دشت را دربر می‌گیرد. بر اساس اطلاعات آماربرداری سال ۱۳۸۸، از این آبخوان سالانه حجم آبی معادل ۱۷۸ میلیون مترمکعب توسط ۱۳۰۵ حلقه چاه مجاز، ۴۱ حلقه چاه غیر مجاز، ۱۰۰ رشته قنات و ۴۱۲ دهنه چشمه تخلیه می‌شود. که از این میزان حجم آب حدود ۱۶۲/۵ میلیون مترمکعب در بخش کشاورزی، حدود ۱۲/۵ میلیون مترمکعب در بخش شرب و بهداشت و ۲/۹ میلیون مترمکعب در بخش صنعت مصرف می‌شود. متوسط بارش سالانه حوضه دامغان حدود ۱۳۳/۷ میلیمتر می‌باشد. در حوضه آبریز دامغان درجه حرارت متوسط سالانه ۱۰/۸۶ درجه سانتی‌گراد بوده که حداقل آن در دی ماه و حداکثر آن مربوط به تیر ماه می‌باشد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی استان سمنان، شهر دامغان، آبخوان و چاه‌های موجود را نشان می‌دهد.

بررسی تراز آب زیرزمینی از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ در پیزومترهای دشت دامغان نشان می‌دهد که این دشت به طور متوسط با کسری مخزن سالانه برابر ۳۰ میلیون مترمکعب و متوسط افت سطح آب سالانه معادل ۵۰ سانتی‌متر مواجه بوده است. لذا یافتن راهکارهایی جهت برون‌رفت از وضع موجود و ایجاد پایداری در منابع آب زیرزمینی از ضروریات اصلی حوزه مدیریت منابع آب استان است (شکل ۲).

۳- مواد و روش‌ها

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی رفتار ذینفعان و ذی‌مدخلان، تعامل آن‌ها با یکدیگر و با محیط (آبخوان دشت دامغان) از شبیه‌سازی رفتاری عامل‌بنیان استفاده شده است. یک مدل عامل‌بنیان معمولاً دارای سه عنصر اصلی است که جهت توسعه مدل باید شناسایی، مدل‌سازی و برنامه‌نویسی گردد (Macal and North, 2010):

۱- یک سری از عامل‌ها، مشخصات و رفتارهای آن‌ها؛

۲- روابط بین عامل‌ها و روش‌های تعامل آن‌ها؛

۳- محیط عامل‌ها.

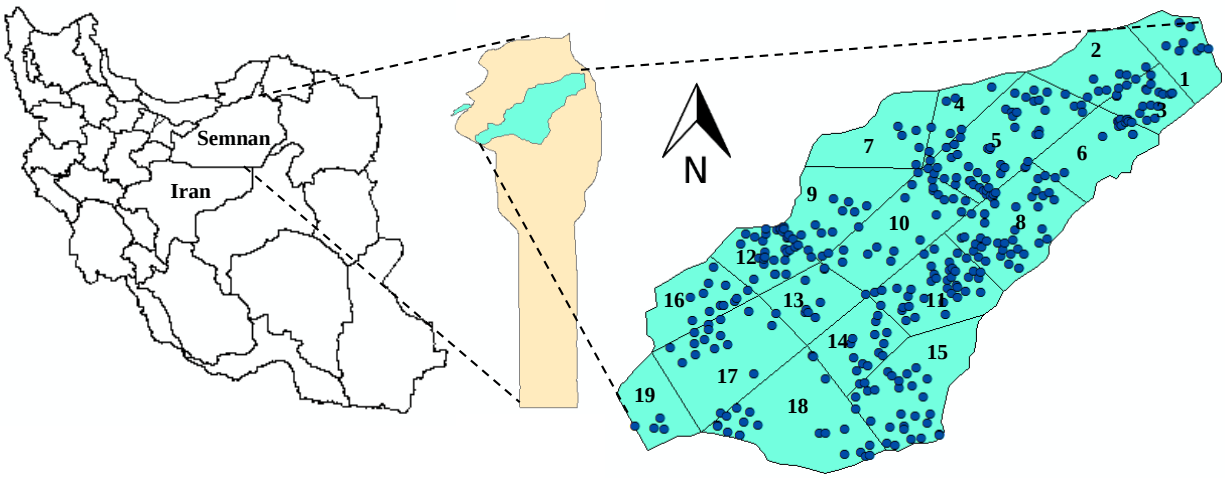

Fig. 1- Geographical location of the study area (Zarghami et al., 2020)

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (Zarghami et al., 2020)

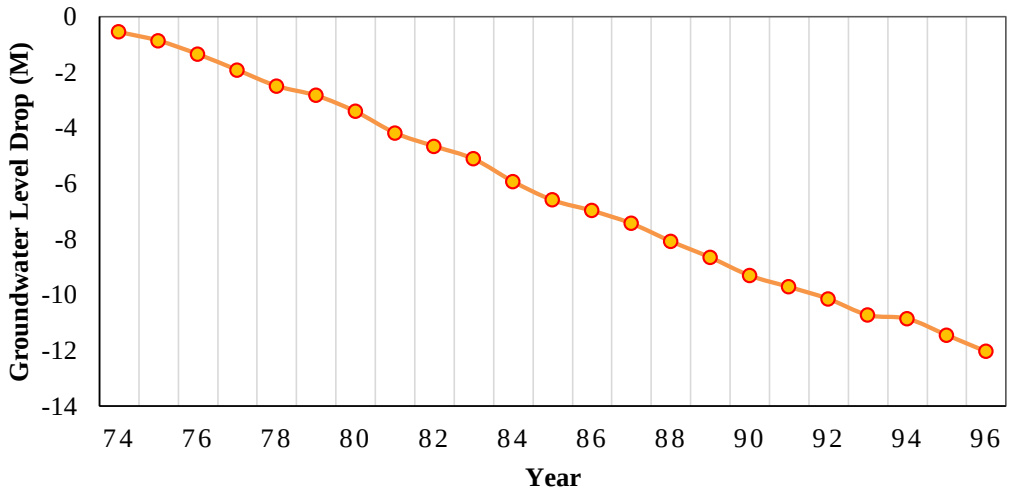

Fig. 2- Graph of the cumulative average of groundwater level decrease in Damghan aquifer (Semnan Regional Water Company, 2018)

شکل ۲- نمودار میانگین تجمعی کاهش سطح آب زیرزمینی آبخوان دامغان (Semnan Regional Water Company, 2018)

عامل در مدل‌های عامل‌بنیان، موجود فیزیکی یا مجازی است که دارای خصوصیات، قوانین رفتاری، حافظه، منابع در دسترس، اطلاعات مورد نیاز برای تصمیم‌گیری و قوانین اصلاح کننده رفتار می‌باشد. به اعتقاد برخی محققان، عنوان عامل برای اجزایی درنظر گرفته می‌شود که می‌توانند از محیط خود یاد بگیرند و رفتار خود را در واکنش بـــه آن تغییر دهند (Ghallehban Tekmedash et al., 2015). در مدل‌سازی عامل‌بنیان عوامل را می‌توان در سه سطح عوامل منفرد[۲]، گروهی[۳] و نهادی[۴] تعریف و ارزیابی نمود. برخی از عوامل مانند کشاورزان در سطح منفرد، عواملی مانند تشکل‌های آب‌بران در سطح گروهی و برخی دیگر مانند سازمان آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی در سطح نهادی قرار دارند (Castilla-Rho et al., 2015). در مطالعه حاضر مدل عامل‌بنیان با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا و با بهره‌گیری از کتابخانه JADE[5] توسعه داده شده است.

۳-۱- ذینفعان کلیدی و خصوصیات آن‌ها

در این مطالعه آبخوان دشت دامغان به عنوان محیط و سه گروه از عامل‌ها به شرح زیر درنظر گرفته شده است: عامل شرکت آب منطقه‌ای به عنوان یک عامل نهادی و نظارتی، عامل جهاد کشاورزی به عنوان یک عامل نهادی دیگر که در ارتباط مستقیم با کشاورزان قرار دارد و در نهایت عامل کشاورز که بیشترین مصرف آب در آبخوان متعلق به این گروه می‌باشد (شکل ۳). اکثر بهره‌برداران در محدوده آبخوان دشت دامغان از چاه برای کشاورزی استفاده می‌کنند.

همواره درآمد یک فاکتور مهم در تصمیم‌گیری‌های عامل کشاورز است. خصوصیات این عامل می‌تواند شامل نوع محصول و نوع آبیاری، سطح زیرکشت، میزان آب مورد نیاز، میزان آب تخصیص‌یافته، هزینه خدمات محصولات کشاورزی (مانند آماده‌سازی زمین، آبیاری و انتقال آب، کارگر و سمپاشی محصولات) و غیره باشد. با توجه به مطالعات اجتماعی، اعتماد یکی از فاکتورهای مهم همکاری و مشارکت در طرح‌های مدیریت منابع آب به شمار می‌آید؛ درنتیجه جلب اعتماد کشاورزان و حمایت و تشویق آن‌ها یکی از فاکتورهای مهم تعامل عامل‌ها با یکدیگر است. جهاد کشاورزی یکی از نهادهایی است که در حمایت از کشاورزان نقش بسزایی دارد. از اهداف عمده این عامل می‌توان به تلاش در راستای تغییر الگوی کشت در راستای سیاست‌های تعیین شده و استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری اشاره کرد؛ به عنوان نمونه اعطای تسهیلات جهت توسعه سیستم‌های آبیاری. همچنین، از دیگر اهداف این عامل، افزایش تولید محصولات کشاورزی و سطح زیرکشت و یا حفظ سطح زیرکشت است. هدف عامل آب منطقه‌ای جلوگیری از افت بیشتر سطح آبخوان، احیاء و تعادل‌بخشی منابع آب زیرزمینی منطقه می‌باشد. بر اساس رویکردهای مدیریتی و وضعیت آبخوان در هر سال، مقدار مجاز برداشت از چاه‌های کشاورزی اعلام می‌شود و میزان برداشت‌ها از طریق کنتورهای هوشمند کنترل می‌شود. البته ممکن است کشاورزان بیشتر از مقدار تخصیص‌یافته به خود از چاه‌ها آب برداشت کنند که بدین منظور احتمال اضافه برداشت در مدل لحاظ شده است (احتمال ۵ درصد اضافه برداشت با توجه به شرایط حاکم و مقدار آب در دسترس در منطقه).

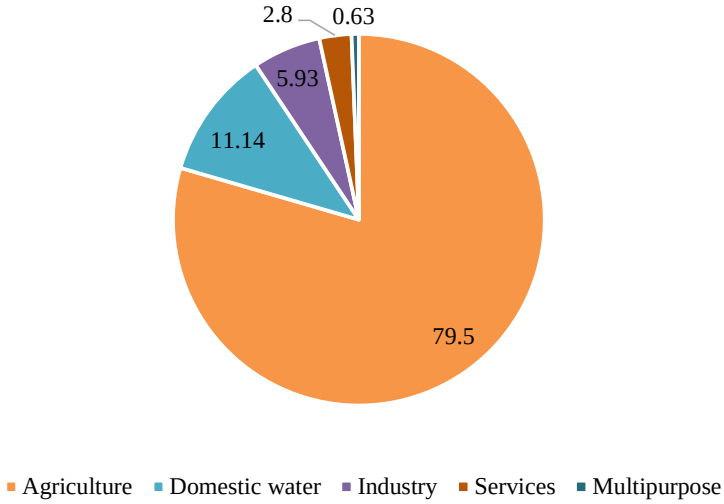

Fig. 3- Percentage of exploitation of active wells in the study area (Semnan Regional Water Company, 2018)
شکل ۳- درصد بهره‌برداری از چاه‌های فعال محدوده مطالعاتی (Semnan Regional Water Company, 2018)

با توجه به مصاحبه‌های انجام شده، در محدوده آبخوان دامغان بیشترین سطح کشت مربوط به پسته است و برخی محصولات زراعی در این منطقه کشت نمی‌شوند. درنتیجه در مدل، یازده نوع الگوی کشت مختلف زراعی و باغی درنظر گرفته شده است. با توجه به داده‌های اخذ شده از سازمان جهاد کشاورزی سمنان، میانگین عملکرد محصولات برای سال ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ به شرح جدول ۱ می‌باشد. نیاز خالص آبیاری به صورت ماهانه با استفاده از نرم‌افزار NETWAT و داده‌های جهاد کشاورزی محاسبه می‌گردد. قیمت فروش محصولات و هزینه خدمات کشاورزی (مانند آماده‌سازی زمین، بذرپاشی، سم‌پاشی، برداشت محصول و غیره) توسط گزارش مرکز آمار ایران و جهاد کشاورزی برای سال ۹۷ ارائه شده است.

۳-۲- شبیه‌سازی رفتار آبخوان با استفاده از مدل عددی

در آبخوان دامغان، ۳۹۰ چاه مجاز کشاورزی با سطح کشت مشخص شده وجود دارد. موقعیت این چاه‌ها در آبخوان بر اساس نظر کارشناسی در مدل به ۱۹ منطقه تقسیم شده است. برای تعریف هر عامل کشاورز، هر چاه کشاورزی به عنوان یک عامل با سطح کشت مشخص و الگوی کشت فرضی تعیین شده است.

Table 1- Crop characteristics for predominant crops in Damghan aquifer
جدول ۱- مشخصات کشت غالب در آبخوان دامغان

Crops	Yield (Kg/ha)	Net irrigation requirement (m^3/ha)	Total production cost (million Rial/ha)	Price (Rial/Kg)
Wheat	3946	3960	25	13027
Barley	3081	3520	25	10932
Watermelon	25539	5430	103	9333
Corn	44127	5000	31	3061
Melon	17083	4790	120	16468
Alfalfa	10590	8450	40	11873
Potato	22423	6810	101	14384
Pistachio	1197	5500	120	716763
Grape	17373	6080	76	20212
Tomato	30298	6680	99	19791
Apple	20981	7880	162	34562

جهت تعریف همسایگی‌ها، روستاهای موجود در دشت دامغان از طریق مصاحبه با کارشناسان به شش زیربخش تقسیم شده است. کشاورزانی که در یک همسایگی قرار دارند، احتمال یادگیری و کسب تجارب را از همدیگر دارند و این کشاورزان در پارامتر احتمال تغییر روش آبیاری طبق بخش ۳-۳-۲ تأثیرگذار هستند. همچنین، با توجه به قرارگیری و نزدیکی روستاها به یکدیگر تعدادی شرکت تعاونی با اهداف ذکر شده در بخش ۳-۳-۵ درنظر گرفته شده است. در مدل توسعه یافته، هر عامل توسط الگوی کشت، سطح کشت، منطقه قرارگیری در آبخوان، همسایگی، تعداد عامل‌های دارای مشخصات یکسان و شماره شرکت تعاونی تعریف شده است. برای سادگی محاسباتی، کشاورزانی که دارای مشخصات درنظر گرفته شده یکسان بوده‌اند، به صورت یک عامل وارد شده‌اند و مشخصات آن‌ها توسط متغیری به تعداد مشخص ضرب شده است.

۳-۳- پارامترهای مدل شبیه‌سازی رفتاری

۳-۳-۱- آبدهی ویژه

آبدهی ویژه (Sy) به حجم آبی گفته می‌شود که در اثر تغییر سطح ایستابی (یا پیزومتریک) به اندازه یک واحد از هر واحد سطح آبخوان برداشت شده و یا به ذخیره آن افزوده شود. در آبخوان دامغان مقدار متوسط ضریب ذخیره در مطالعات بیلان و مطالعات نیمه تفصیلی منطقه، ۵ درصد گزارش شده است. شکل ۴ نقشه آبدهی ویژه منطبق بر شرایط طبیعی آبخوان دشت دامغان را نشان می‌دهد. در مناطقی که مقدار ضریب آبدهی ویژه بیشتر است (نواحی که در شکل ۴ با رنگ قرمز مشخص شده است)، دانه‌بندی خاک درشت‌تر و نزدیک به ماسه است و به تدریج که از مقدار آبدهی ویژه کاسته می‌شود دانه‌بندی خاک منطقه ریزتر می‌گردد. آبدهی ویژه مطابق رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$S_y = \frac{1}{A}\frac{dv}{dh} \qquad (۱)$$

در این رابطه A سطح آبخوان (مترمربع)، dv حجم آب خارج شده (مترمکعب) و dh میزان افت سطح ایستابی (متر) می‌باشد. مطابق این رابطه و مقادیر S_y موجود برای هر ناحیه آبخوان، میزان افت سطح ایستابی تحت سناریوهای مختلف به دست می‌آید.

در نرم‌افزار ArcGIS براساس آبدهی ویژه نقاط مختلف در مدل آب زیرزمینی، مقدار میانگین آبدهی ویژه و مساحت هر زون محاسبه شده است. در نهایت جهت محاسبه متوسط افت آبخوان دشت دامغان از میانگین وزنی مطابق رابطه ۲ استفاده شده است.

$$\overline{dh} = \frac{\sum(A_i \times dh_i)}{\sum(A_i)} \qquad (۲)$$

در این رابطه $\overline{dh}$ متوسط افت آبخوان (متر)، A_i مساحت هر منطقه (زون) (مترمربع) و dh_i میزان افت هر منطقه یا زون (متر) است.

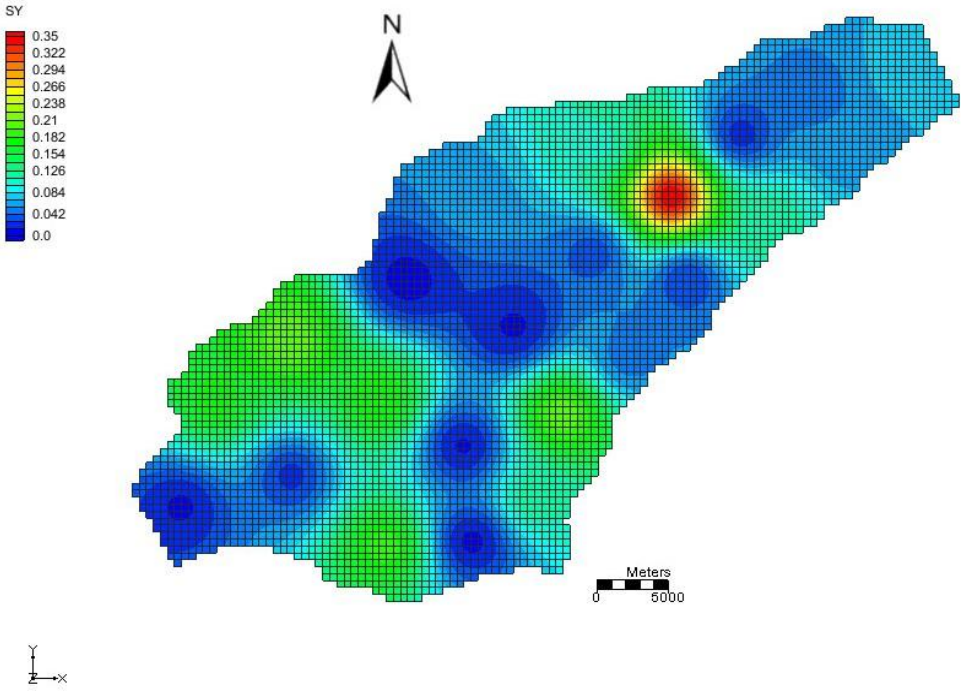

Fig. 4- Specific yield values (Sy) of the Damghan aquifer (Zarghami et al., 2020)

شکل ۴- مقادیر آبدهی ویژه (Sy) آبخوان دامغان (Zarghami et al., 2020)

۳-۳-۲- احتمال تغییر روش آبیاری

تحقیقات نشان می‌دهد که عملکرد عامل کشاورز در راستای بیشینه نمودن سود اقتصادی است، این تحقیقات در زمینه فرآیند تصمیم‌گیری کشاورزان و پیروی از سیاست‌های نهادی و به‌کارگیری رویکردهای نوین (به ویژه تکنولوژی‌های پمپاژ و آبیاری) می‌باشد (منابعی مانند Janssen and van Ittersum, 2007; Pahl-wostl and Holtz, 2012). احتمال تغییر روش آبیاری در مدل شبیه‌سازی به صورت رابطه ۳ در نظر گرفته شده است:

$$P_{irrChange} = \frac{\alpha E_{cap} + \beta E_{neighbour} + \gamma E_{cons} + \lambda E_{def} + \omega E_{area}}{\alpha + \beta + \gamma + \lambda + \omega} \quad (۳)$$

که در این رابطه، E_{cap} تأثیر میزان سرمایه موجود کشاورز، $E_{neighbour}$ تأثیر همسایگان، E_{cons} مربوط به پارامتر محافظه‌کاری عامل، E_{def} اثر کمبود منابع آبی بر تصمیم عامل کشاورز و E_{area} تأثیر سطح کشت جهت تغییر روش آبیاری است. لازم به ذکر است که در محاسبه تأثیر میزان سرمایه کشاورز در رابطه احتمال تغییر روش آبیاری، هزینه تغییر تکنولوژی آبیاری بر اساس نوع آن و مساحت زمین کشاورز به عنوان حداقل سرمایه لازم درنظر 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. اثر کمبود نیز به صورت نسبت مجموع کمبود آبی محاسبه شده در مدل در سال جاری به کل نیز آبی برای آن عامل درنظر گرفته می‌شود. تأثیر سطح کشت عامل کشاورز نیز به صورت روابط شرطی لحاظ شده است. پارامترهای α، β، γ، λ و ω نیز به ترتیب میزان اثرگذاری پارامترهای مذکور را نشان می‌دهند که بر اساس شرایط محلی و با استفاده از نتایج پرسش‌نامه‌ها، مقادیر این پارامترها به ترتیب برابر ۲، ۰/۳، ۰/۷، ۱ و ۱ درنظر گرفته شده است.

۳-۳-۳- درآمد سالانه هر عامل کشاورز

تغییرات میزان سرمایه عامل کشاورز نیز بر اساس درآمد خالص آن در هر سال و متوسط هزینه‌های خانوار در منطقه درنظر گرفته می‌شود. بر اساس فرض ساده‌سازی رابطه خطی بین کمبود آب و تولید محصول، رابطه خطی بین میزان تأمین آب و درآمد سالانه کشاورز درنظر گرفته شده است. اما 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 (Schlüter and Pahl-Wostl, 2007). FAO بر اساس تجزیه و تحلیل تعداد زیادی از پژوهش‌های موجود در زمینه عملکرد محصول و میزان کمبود آب، مقادیر K_y (ضریب واکنش عملکرد) را برای محصولات مختلف پیشنهاد کرده است (جدول ۲). برای سایر محصولات که هنوز مقدار مشخصی ارائه نشده است، $K_y = 1$ فرض می‌شود.

میزان آب مصرفی کشاورزان در هر ماه از طریق نرم‌افزار NETWAT و داده‌های جهاد کشاورزی در مدل وارد شده است. اگر مقدار آب در دسترس کشاورزان کمتر از مقدار موردنیاز باشد، تنش آبی[۶] رخ می‌دهد. مجموع تنش آبی در طول فصل آبیاری مطابق رابطه ۴ بر عملکرد تأثیر می‌گذارد (Schlüter and Pahl-Wostl, 2007):

$$I_{i.t} = I_{max.i} A_{c.i} \left(1 - \frac{\sum_{m=1}^{12} Def_{i.m}}{\sum_{m=1}^{12} D_{i.m}}\right) \quad (۴)$$

در این رابطه، $I_{i.t}$ درآمد خالص سالانه عامل کشاورز i در سال t (میلیون ریال)، $A_{c.i}$ مساحت کشت شده عامل در سال i (هکتار)، $I_{max.i}$ حداکثر درآمد خالص محتمل عامل کشاورز در هر هکتار با فرض عـــدم وجود کمبود آب (میلیون ریال)، $Def_{i.m}$ میزان کمبود آبی عامل در ماه mام سال t (مترمکعب) و $D_{i.m}$ نیاز آبی عامل در ماه mام سال t (مترمکعب) است.

حداکثر درآمد خالص محتمل عامل کشاورز در هر هکتار با استفاده از رابطه ۵ به دست می‌آید (Anbari and Zarghami, 2019):

$$I_{max.i} = (Y_i \times P_i - C_i)/1000000 \quad (۵)$$

در این رابطه، Y_i عملکرد میانگین محصول (میزان 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 کشاورز i محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است که پارامترهای مذکور بر اساس مقادیر جدول ۱ درنظر گرفته شده‌اند.

Table 2- The yield response factor for a number of Damghan plain crops (Steduto et al., 2012)
جدول ۲- ضریب واکنش عملکرد برای تعدادی از محصولات دشت دامغان (Steduto et al., 2012)

Crops	Winter wheat	Alfalfa	Tomato	Watermelon/ Melon	Potato	Corn
K_y	1.05	1.10	1.05	1.10	1.10	1.25

۳-۳-۴- میزان کمبود منابع آبی

میزان کمبود آبی ماهانه هر عامل کشاورز با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$Def_{m.i} = D_{m.i} - AW_{m.i} \quad (۶)$$

که در این رابطه، $AW_{m.i}$ میزان آب موجود (بر اساس مجوز برداشت) عامل کشاورز در ماه mام (مترمکعب) است.

میزان آب مورد نیاز هر عامل کشاورز نیز با استفاده از رابطه ۷ در مدل محاسبه می‌گردد:

$$D_{i.m} = \frac{NWD_{i.m}A_{c.i}}{\eta_i} \quad (۷)$$

در این رابطه، $D_{i.m}$ نیاز آبی عامل کشاورز i در ماه m (مترمکعب)، $NWD_{i.m}$ نیاز خالص آبیاری عامل کشاورز در ماه m و η_i راندمان آبیاری عامل کشاورز i است.

۳-۳-۵- سناریوهای مطرح

با توجه به مصاحبه با کارشناسان و کشاورزان، چهار طرح نصب کنتور هوشمند بر روی چاه‌های کشاورزی، تعدیل پروانه چاه‌ها، ارائه تسهیلات جهت تغییر روش‌های آبیاری و ایجاد شرکت‌های تعاونی تولید روستایی با اهداف خاص درنظر گرفته شده است. در منطقه مورد مطالعه در راستای طرح احیا و تعادل‌بخشی آبخوان‌ها، شرکت آب منطقه‌ای اقدام به نصب کنتورهای هوشمند و نظارت بر میزان برداشت از چاه‌های کشاورزی کرده است. ۸۰ درصد چاه‌های موجود در آبخوان دامغان مجهز به کنتور هوشمند هستند؛ در نتیجه اعمال این سناریو، به صورت نصب کنتور بر روی ۲۰ درصد باقیمانده درنظر گرفته شده است. به دنبال افزایش تقاضا و کمبود منابع آب زیرزمینی عامل آب منطقه‌ای اقدام به کاهش پروانه‌های بهره‌برداری کرده است. در این راستا کاهش تدریجی حقابه‌ها در سه سال اول مدل‌سازی درنظر گرفته شده است در نتیجه حقابه‌ها به میزان ۱۰ درصد کاهش یافته‌اند. جهاد کشاورزی به عنوان یک عامل نهادی، در راستای افزایش بهره‌وری اقدام به ارائه تسهیلات جهت تغییر روش آبیاری کرده است. مطابق مصاحبه‌ها، مشکلات اساسی در دریافت تسهیلات، مشکل پیدا کردن ضامن با شرایط اعلامی بانک، کمبود اعتبارات بانکی، مدت زمان طولانی انتظار و مشکلات مرتبط با روند اداری طرح‌ها گزارش شده است. در نتیجه، ارائه تسهیلات با وضعیت فعلی جهت تغییر روش آبیاری، به تنهایی کفایت نمی‌کند و باید نهادهای مرتبط مشکلات را رفع نمایند و موانع از سر راه کشاورزان برداشته شود. البته در مدل اعطای تسهیلات بدون مشکل فرض شده است. علاوه بر این، عدم اطمینان کشاورزان نسبت به مناسب بودن آبیاری قطره‌ای جهت آبیاری باغات پسته که ظاهراً به دلیل برخی تجربه‌های ناموفق در این زمینه ایجاد شده نیز از جمله عوامل عدم توسعه آبیاری‌های تحت فشار در بخش‌هایی از منطقه بوده است. در ابتدای شبیه‌سازی، طبق بررسی‌های به عمل آمده در خصوص وضع موجود ۳۰ درصد کل سطح کشت، کشت مدرن درنظر گرفته شده است. به نظر می‌رسد با توجه به شرایط خرده‌مالکی شدید موجود در آبخوان دامغان، یکی از مهم‌ترین راهکارها، ایجاد شرکت‌های تعاونی تولید است تا بتوان از این طریق مشکل خرده‌مالکی و تغییر روش‌های آبیاری برای سطح کشت‌های زیر یک هکتار را رفع نمود. از اهداف مهم تشکیل شرکت‌های تعاونی تولید می‌توان به آشنا ساختن اعضا با روش‌های نوین کشاورزی و فراهم نمودن امکان تغییر روش آبیاری، ارتقای سیستم‌های انتقال آب به اراضی و درنتیجه کاهش مصرف آب، استفاده صحیح از ماشین‌آلات کشاورزی متناسب با شرایط محلی و غیره اشاره کرد.

۴- نتایج و بحث

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش قبل، مدل رفتاری عامل‌بنیان تحت ۷ سناریوی مدیریتی مختلف (جدول ۳) شبیه‌سازی شده و در ادامه، تأثیر سناریوها بر میزان برداشت از آبخوان بررسی می‌گردد.

نتایج اجرای مدل در خصوص درآمد خالص کشاورزان به صورت نمودار شکل ۵ است. در طول دوره مدل‌سازی طرح‌های نصب کنتورهای هوشمند و تعدیل پروانه چاه‌ها، کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی را به دنبال دارد. از سوی دیگر در صورت اجرای این طرح‌ها، درآمد کشاورزان کاهش می‌یابد. در نتیجه در سناریو ۱ نسبت به سناریو پایه با کاهش ۳۷ درصدی درآمد خالص کشاورزان منطقه مواجه هستیم. از طرفی بخشی از درآمد کشاورزان جهت تغییر روش آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق نظر کشاورزان منطقه، ارائه تسهیلات به تنهایی هزینه‌های ناشی از تغییر روش آبیاری را تأمین نمی‌کند و کشاورزان از سرمایه و پس‌انداز خود هزینه می‌کنند. بر اساس خروجی‌های مدل توسعه‌یافته، ترویج روش‌های نوین آبیاری در کنار نصب کنتورهای هوشمند و تعدیل پروانه چاه‌ها (سناریو ۳ نسبت به سناریو پایه)، موجب کاهش افت درآمد کشاورزان شده و در این سناریو، درآمد خالص کشاورزان در پایان دوره شبیه‌سازی به میزان ۱۸ درصد کاهش می‌یابد. در اثر ایجاد شرکت‌های تعاونی تولید و ترویج روش‌های نوین آبیاری (سناریو ۴ نسبت به سناریو پایه) درآمد خالص کشاورزان در پایان دوره شبیه‌سازی به میزان ۵۵ درصد افزایش یافته است. با اجرای همزمان چهار طرح در پایان دوره شبیه‌سازی میزان درآمد خالص کشاورزان نسبت به سناریو پایه حفظ شده است.

Table 3- Scenarios considered in the agent-based model of Damghan plain

جدول ۳- سناریوهای مورد بررسی در مدل عامل‌بنیان دشت دامغان

Establishment of cooperative companies	Promoting modern irrigation systems	Adjustment of well licenses	Installing intelligent flowmeters	Scenario
×	×	×	×	Scenario base
×	×	✓	✓	Scenario 1
×	✓	×	✓	Scenario 2
×	✓	✓	✓	Scenario 3
✓	✓	×	×	Scenario 4
✓	×	✓	✓	Scenario 5
✓	✓	✓	✓	Scenario 6

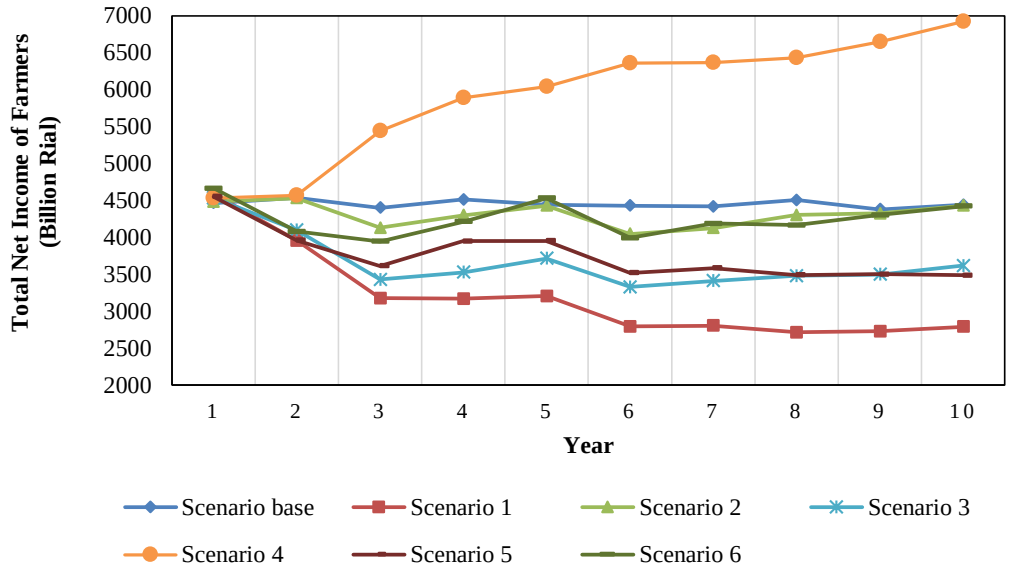

Fig. 5- Changes in the annual net income of all farmers in the region, modeled for 10 years from 1397 under model scenarios

شکل ۵- تغییرات درآمد خالص سالانه کل کشاورزان منطقه، مدل شده به مدت ۱۰ سال از سال ۱۳۹۷ تحت سناریوهای مدل

بر اساس نتایج به دست آمده از اجرای مدل، تغییرات روش آبیاری اراضی منطقه در سناریوهای درنظر گرفته شده به صورت نمودار شکل ۶ است. در سناریوهایی که ترویج روش‌های نوین آبیاری لحاظ شده است؛ سطح کشت مدرن تا حدود ۸۰۰۰ هکتار (دو برابر وضعیت منطقه) قابل تغییر می‌باشد.

طی روند شبیه‌سازی، کشاورزان منطقه بر اساس حقابه مشخصی (مترمکعب در سال) که برای هر هکتار زمین تعیین شده است، اقدام به برداشت از چاه‌های کشاورزی می‌نمایند. نمودار شکل ۷ تغییرات میزان برداشت کل کشاورزان تحت سناریوهای مدل و شکل ۸ میزان کمبود آب کل کشاورزان را مطابق رابطه ۶ نشان می‌دهد. در اثر نصب کنتورهای هوشمند و کاهش ۱۰ درصدی حقابه طی سه سال اول (سناریو ۱ نسبت به سناریو پایه)، میزان برداشت آب از چاه‌ها در پایان دوره شبیه‌سازی ۴۱ درصد کاهش یافته است. در اثر اجرای سه طرح نصب کنتورهای هوشمند، تعدیل پروانه چاه‌ها و ترویج سیستم‌های نوین آبیاری (سناریو ۳ نسبت به سناریو پایه)، میزان برداشت آب از چاه‌ها در پایان دوره شبیه‌سازی ۴۴ درصد کاهش یافته است و کمبود آب به میزان ۳۰ درصد کاهش یافته است. در نتیجه اجرای همزمان چهار طرح، با کاهش ۴۴ درصدی میزان برداشت آب نسبت به سناریو پایه در پایان دوره شبیه‌سازی روبرو هستیم و کمبود آب مورد نیاز اراضی به میزان ۱۲ درصد کاهش یافته است. همچنین، در اثر ایجاد شرکت‌های تعاونی تولید و ترویج روش‌های نوین آبیاری (سناریو ۴ نسبت به سناریو پایه) با کاهش ۴۶ درصدی کمبود آب مورد نیاز اراضی کشاورزی روبرو هستیم.

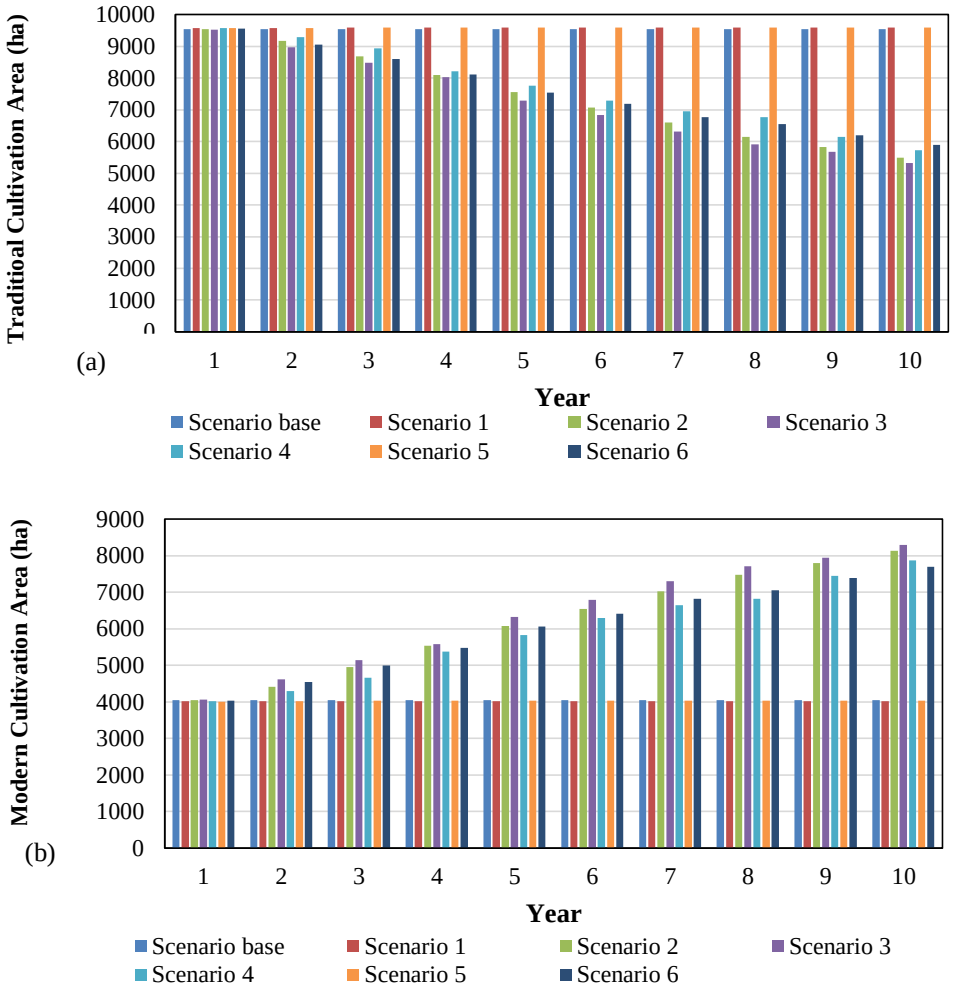

Fig. 6- Changes in the cultivation area of the modeled area, for 10 years from 1397 under model scenarios: a) traditional cultivation area, and b) modern cultivation area

شکل ۶- تغییرات سطح کشت منطقه مدل شده، به مدت ۱۰ سال از سال ۱۳۹۷ تحت سناریوهای مدل: الف) سطح کشت سنتی و ب) سطح کشت مدرن

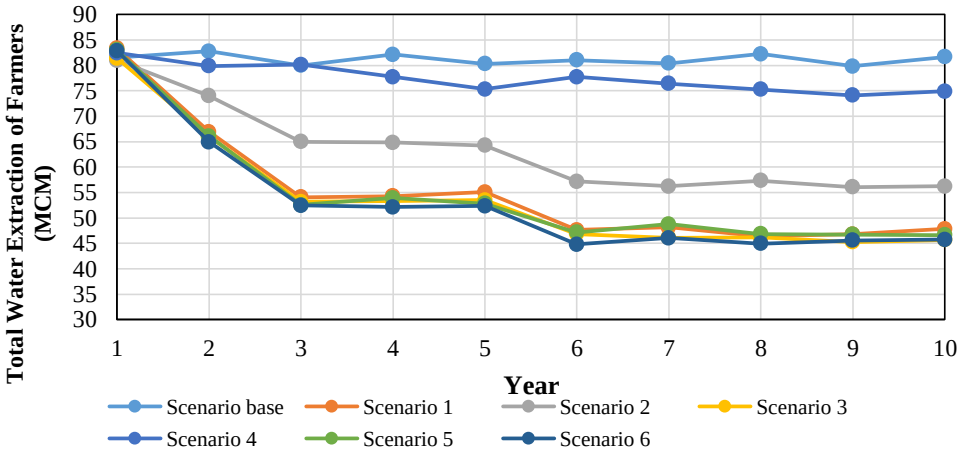

Fig. 7- Graph of total extraction of farmers in the region, modeled for 10 years since 1397 under different scenarios

شکل ۷- نمودار میزان برداشت کل کشاورزان منطقه، مدل شده به مدت ۱۰ سال از سال ۱۳۹۷ تحت سناریوهای مختلف

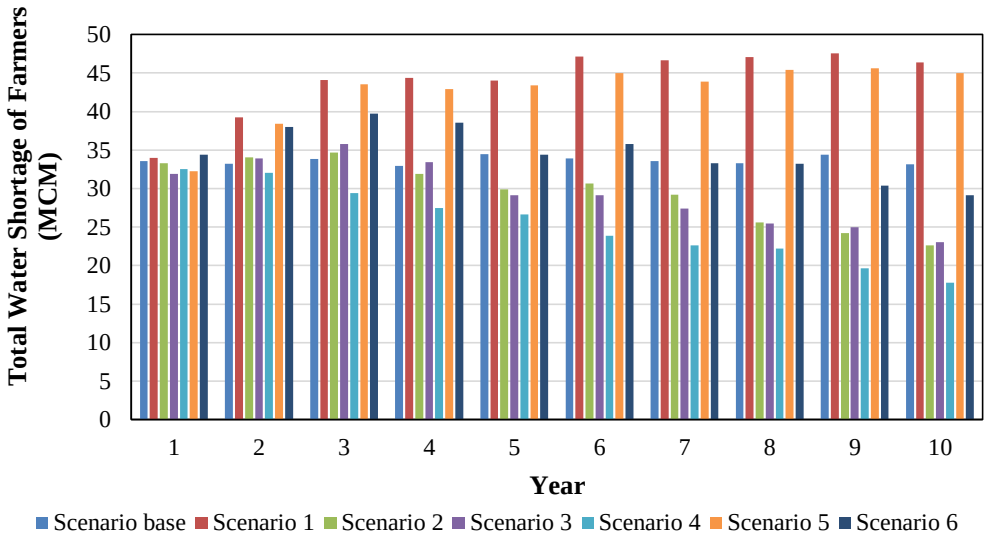

Fig. 8- Graph of groundwater resources deficit in the region, modeled for 10 years since 1397 under different scenarios

شکل ۸- نمودار کمبود منابع آب زیرزمینی در منطقه، مدل شده به مدت ۱۰ سال از سال ۱۳۹۷ تحت سناریوهای مختلف

مطابق رابطه ۱ در صورتی که میزان برداشت و مساحت منطقه‌ها تقریباً یکسان باشد؛ هر چه ضریب ذخیره بیشتر باشد، میزان افت سطح آب زیرزمینی کمتر می‌شود. ضریب ذخیره در منطقه‌های ۴ تا ۶، ۱۲، ۱۳ و ۱۵ تا ۱۸ نسبت به بقیه بیشتر است (دانه‌بندی خاک درشت‌تر و نزدیک به ماسه است)؛ در نتیجه در اثر کاهش برداشت آب در این مناطق، سطح آب بیشتر بالا می‌آید و میزان افت سطح آب نسبت به بقیه مناطق کمتر می‌شود. مطابق شکل ۹ در اثر اجرای همزمان ۴ طرح نسبت به سناریو پایه (سناریو ۶ نسبت به سناریو پایه) میزان افت سطح آب زیرزمینی در حدود ۴۵ سانتی‌متر کاهش می‌یابد.

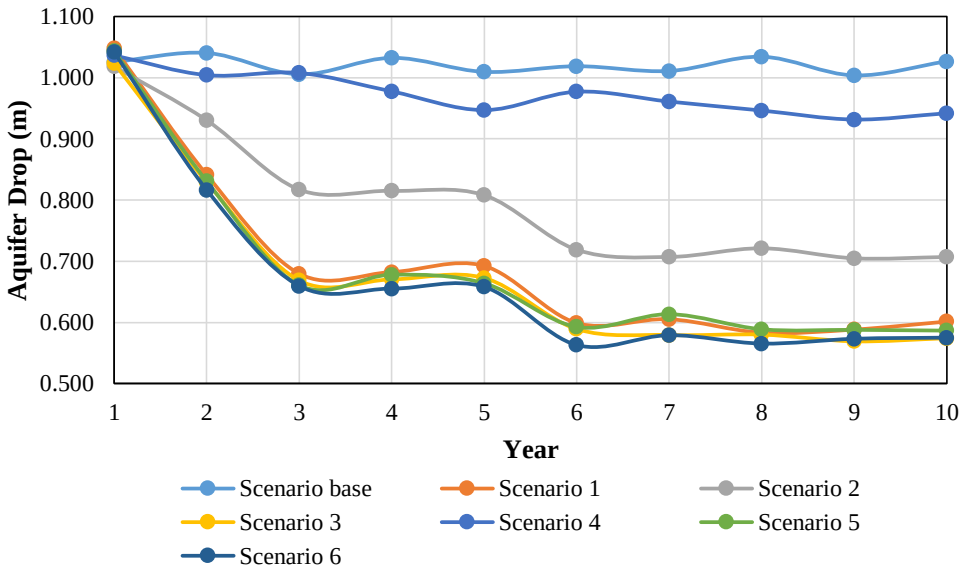

Fig. 9- Average graph of aquifer drop in the region according to the amount of withdrawals under model scenarios for 10 years from 1397

شکل ۹- نمودار متوسط افت آبخوان منطقه با توجه به میزان برداشت‌ها تحت سناریوهای مدل به مدت ۱۰ سال از سال ۱۳۹۷

در اثر اجرای طرح‌های نصب کنتورهای هوشمند و تعدیل پروانه چاه‌ها نسبت به سناریو پایه (سناریو ۱ نسبت به سناریو پایه) میزان افت سطح آب زیرزمینی در حدود ۴۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. همچنین به موجب نصب کنتورهای هوشمند و ترویج سیستم‌های نوین آبیاری نسبت به سناریو پایه (سناریو ۲ نسبت به سناریو پایه) میزان افت سطح آب زیرزمینی در حدود ۳۰ سانتی‌متر کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش تقاضا در دهه‌های اخیر، مدیریت منابع آب زیرزمینی به ویژه در مناطق دارای اقلیم خشک مانند دشت دامغان از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به الگوی رفتاری کشاورزان که بزرگترین مصرف‌کننده منابع آب زیرزمینی در منطقه دامغان هستند، ادامه روند موجود، موجب کاهش روزافزون منابع آب زیرزمینی، خشک شدن چاه‌ها و فرونشست دشت می‌گردد.

در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عامل‌بنیان خصوصیات و نحوه تعامل ذینفعان کلیدی آبخوان دامغان شناسایی شده و با توجه به الگوی کشت، شرایط اقتصادی و وجود خرده‌مالکی در این منطقه، سناریوهای مدیریتی جهت جلوگیری از افت بیش از حد تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. نظارت و تعدیل پروانه چاه‌ها و در نتیجه کاهش برداشت منابع آب زیرزمینی، موجب کاهش قابل توجه درآمد کشاورزان می‌شود. اجرای طرح تشکیل شرکت‌های تعاونی علاوه بر کمک به حل مشکل خرده‌مالکی و تسهیل نمودن تغییر روش‌های آبیاری در منطقه، سبب بهبود درآمد کشاورزان می‌گردد. با وجود اجرای طرح‌های نصب کنتورهای هوشمند و تعدیل پروانه چاه‌ها که موجب کاهش درآمد کشاورزان می‌گردند، در صورت تغییر هم‌زمان تکنولوژی آبیاری در اراضی کشاورزی، میزان درآمد خالص کشاورزان در حدود ۱۸ درصد نسبت به وضعیتی که هیچ کدام از طرح‌ها اجرا نشوند، کاهش می‌یابد. همچنین، میزان برداشت آب و کمبود آب به ترتیب با کاهش ۴۴ و ۳۰ درصدی مواجه می‌گردد.

در اثر ایجاد شرکت‌های تعاونی تولید علاوه بر سه طرح نصب کنتورهای هوشمند، تعدیل پروانه چاه‌ها و ترویج روش‌های آبیاری نوین نسبت به وضعیتی که هیچ کدام از طرح‌ها اجرا نشوند، درآمد خالص کشاورزان حفظ می‌گردد و میزان برداشت آب و کمبود آب به ترتیب ۴۴ و ۱۲ درصد کاهش می‌یابد. جهت پایداری سیستم و کاهش بیشتر برداشت منابع آب زیرزمینی صنعت می‌تواند جایگزین کشاورزی گردد. همچنین، جایگزینی محصولات کم آب‌طلب مثل زیره، کینوآ، ارزن و گونه‌های گیاهان دارویی همچون گل گاوزبان، اسطوخدوس و غیره به جای محصولات با مصرف زیاد آب در زراعت می‌تواند به عنوان یک سناریو مورد بررسی قرار گیرد.

علاوه بر این می‌توان تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آبخوان منطقه را هم به عنوان یکی از سناریوها بررسی نمود. توجه به این نکته حائز اهمیت است که اجرای طرح‌های مدیریت منابع آب، تنها در صورت مشارکت فعال تمامی ذینفعان محقق خواهد شد و در این خصوص، علاوه بر هماهنگی نهادهای ذیربط در اجرای طرح‌ها، همکاری و مشارکت کشاورزان اصل کلیدی جهت بهبود وضعیت منابع خواهد بود. لذا با توجه به کشاورزی معیشتی موجود در منطقه، هرگونه سیاستی که منجر به فشارهای اقتصادی به کشاورزان گردد، به دلیل ایجاد چالش‌های اجتماعی پایدار نبوده و در بلندمدت محکوم به شکست خواهد بود.

۶- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از شرکت آب منطقه‌ای سمنان به جهت ارائه حمایت مالی و کمک به انجام پژوهش حاضر تقدیر می‌شود. همچنین، از اداره امور منابع آب دامغان، اداره جهاد کشاورزی دامغان، اساتید محترم دکتر سعید فرزین، دکتر مجید طاهریان، دکتر نیر محمدپور، همکاران گرامی دکتر مریم قره‌خانی و مهندس علیرضا محقق و نیز تمامی کشاورزان عزیز منطقه که در پیشبرد پژوهش حاضر صمیمانه همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1- Agent-Based Modeling
2- Individual Agent
3- Group Agent
4- Institutional Agent
5- Java Agent Development Framework
6- Water Stress

۷- مراجع

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

Anbari MJ, Zarghami M (2019) An agent-based model to improve groundwater resources conditions with a participatory approach in the Shabestar-Sofian Plain, Iran. Iran-Water Resources Research 15(2):73-87 (In Persian)

Anbari MJ, Zarghami M, Nadiri AA (2021) An uncertain agent-based model for socio-ecological simulation of groundwater use in irrigation: A case study of Lake Urmia Basin, Iran. Agricultural Water Management 249

Castilla-Rho J C, Mariethoz G, Rojas R, Andersen M S, and Kelly B F J (2015) An agent-based platform for simulating complex human-aquifer interactions in managed groundwater systems. Environmental Modelling and Software 73:305–323

Castilla-Rho JC, Rojas R, Andersen MS, Holley C, Mariethoz G (2017) Social tipping points in global groundwater management. Nature Human Behaviour 1(9):640–649

Darbandsari P, Kerachian R, Malakpour-Estalaki S, Khorasani H (2020) An agent-based conflict resolution model for urban water resources management. Sustainable Cities and Society 57

Farhadi S, Nikoo MR, Rakhshandehroo GR, Akhbari M, Alizadeh MR (2016) An agent-based-nash modeling framework for sustainable groundwater management: A case study. Agricultural Water Management 177(C):348–358

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

Hu Y, Beattie S (2019) Role of heterogeneous behavioral factors in an agent-based model of crop choice and groundwater irrigation. Water Resources Planning and Management 145(2):1–11

Jabbari R, Zarghami M, Anbari MJ (2021) Development of agent-based model for evaluating groundwater resources management policies in the socio-hydrological system of Damghan plain. In: 8th National Conference on Water Resources Management of Iran, Mashhad (In Persian)

Janssen S, van Ittersum MK (2007) Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. Agricultural Systems 94(3):622–636

Macal CM, North MJ (2010) Tutorial on agent-based modelling and simulation. Journal of Simulation. Palgrave Macmillan 4(3):151–162

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

Semnan Regional Water Company (2018) Raw data received from the company.

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

Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (2012) Crop yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper, 66

Zarghami M, Nadiri AA, Anbari MJ, Farzin S, Mohammadpor N, Taherian M, Garekhani M, Jabbari R, Mohaggegh AR (2020) Providing a decision-making system with an integrated water resources management approach to implement a plan to rehabilitate and balance groundwater resources in the study area of Damghan. Semnan Regional Water Company (In Persian)

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