تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸
Volume 15, No.3, Fall 2019 (IR-WRR)
۱-۱۶

مدیریت آب زیرزمینی دشت اردبیل با استفاده از مدل-سازی عامل‌بنیان

سعید نجارقابل[۱*]، مهدی ضرغامی[۲]، مسیح اخباری[۳] و عطاالله ندیری[۴]

چکیده

تعاملات اجتماعی-هیدرولوژیکی یکی از الزامات مهم برای مدیریت منابع آب در مناطق تحت تنش آبی است. آبخوان اردبیل یکی از آبخوان‌های ممنوعه تحت فعالیت‌های شدید رو به رشد است. سطح آب زیرزمینی در این آبخوان به طور چشمگیری کاهش یافته است و این منطقه را به سوی یک فاجعه‌ی محیط زیستی هدایت می‌کند. در این مطالعه، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای حل مشکل آب زیرزمینی اردبیل توسعه داده شده است که تغییرات تراز آب زیرزمینی را شبیه‌سازی و مقادیر بهینه برای استخراج آب را تعیین می‌کند. این مدل‌ها به وسیله‌ی یک روش جدید توسعه داده شده در MATLAB به هم متصل شده‌اند که امکان دسترسی به بسته‌های مختلف MODFLOW را فراهم کرده و برای اجرای مکرر مدل‌ها حافظه کمتری را اشغال می‌کند. مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به منظور شبیه‌سازی رفتار و تعامل ذینفعان به یک مدل عامل‌بنیان متصل شده است. به همین منظور ابتدا ذینفعان کلیدی و مطلوبیت هر یک از آن‌ها تعیین شده است. سپس الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به منظور برآورد مقادیر برداشت آب، استفاده و در مرحله بعد با استفاده از روش برنامه‌ریزی سازشی بهترین گزینه از میان مجموعه جواب‌ها با لحاظ دید کارشناسی انتخاب شده است. در نهایت، مدل عامل‌بنیان با در نظر گرفتن تنش‌های اجتماعی و قوانین مدیریتی (تشویقی و جریمه‌ای) مقادیر برداشت نهایی را فراهم کرده است. نتایج نشان می‌دهد که تقاضای آب زیرزمینی در مقایسه با مقدار اولیه به میزان ۲۲ درصد کاهش یافته است. این میزان کاهش تقاضا باعث افزایش ۹۰ سانتی‌متری سطح آب زیرزمینی به طور متوسط برای کل دشت شده است.

کلمات کلیدی: مدل عامل‌بنیان، مدل‌سازی آب زیرزمینی، بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی سازشی، آبخوان دشت اردبیل.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۱۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۲۱

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی آب دانشکده مهندسی عمران و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۳- همکار علمی، انستیتو آب کلرادو، فورت کالینز، کلرادو، آمریکا.
۴- دانشیار گروه علوم زمین دانشکده علوم طبیعی و پژوهشکده محیط زیست، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Groundwater Management in Ardabil Plain Using Agent-Based Modeling

S. Najjar Ghabel[1], M. Zarghami[2], M. Akhbari[3], and A. Nadiri[4]*

Abstract

Modeling socio-hydrological interactions are one of the essential requirements for water resources management in water-stressed areas. The Ardabil aquifer (Northwestern Iran) is one of the restricted aquifers under intense development activities. The water table is dramatically declining leading the area to an upcoming environmental disaster. To address this problem, a simulation-optimization model has been developed in this study, which simulates groundwater level changes and determines the optimal water exploitation values. The simulation and optimization models have been linked by a new method in MATLAB which provides access to various MODFLOW packages and takes up less memory for iterative runs. The simulation-optimization model has been then linked to an agent-based model, which simulates agents' behavior and their interactions. For the purpose of this modeling, firstly the key agents and their desirability have been determined. Then, the particle swarm optimization algorithm was used to estimate the agents' desired groundwater exploitation values. In the next step, the best solution was selected according to the experts' point of view using the compromised programming method. Finally, the agent-based model provided the final exploitation values, taking into account social pressure and management rules (incentives and penalties). The results showed that groundwater demand can be reduced up to 22% in comparison to the initial value. This demand reduction resulted in 90 cm increase in the groundwater level for the entire plain.

Keywords: Agent-Based Modeling, Groundwater Modeling, Optimization, Compromising Programming, Ardabil Plain Aquifer.

Received: February 8, 2018
Accepted: January 11, 2019

1- M.Sc. Graduated of Water Engineering, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
2- Professor, Department of Civil Engineering and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
3- Visiting Scholar, Colorado Water Institute, Fort Collins, Colorado, USA.
4- Associate Professor, Department of Earth Science and Institute of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: nadiri@tabrizu.ac.ir
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

اصولاً برای مدیریت کارآمد یک سیستم آبی نیاز است که ابتدا برآورد صحیحی از میزان منابع آبی قابل عرضه و میزان تقاضای هر یک از عامل‌ها داشته باشیم. در واقع در این مرحله با در نظر گرفتن معادلات حاکم بر سیستم و همچنین در نظر گرفتن ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم می‌توان به درک صحیحی از فیزیک مسأله رسید. در مرحله بعد نیز می‌توان با در نظر گرفتن تعامل هر یک از عامل‌ها و همچنین بازخوردهای گرفته شده از سیستم به ازای سناریوهای مدیریتی مختلف، راهکار اجرایی ارائه نمود. در مدیریت منابع آب زیرزمینی نیز توجه به این مراحل ضروری است. مطالعات انجام گرفته در بخش مدیریت منابع آب زیرزمینی توسط محققین را در حالت کلی می‌توان به دو دسته تقسیم نمود: مطالعاتی که فقط به شرایط هیدرولیکی توجه کرده‌اند و مطالعاتی که علاوه بر شرایط هیدرولیکی، سیاست‌های تخصیص و همچنین بازخوردهای گرفته شده از هر یک را مورد بررسی قرار داده‌اند.

مدل‌های مدیریت هیدرولیکی به صورت‌های مختلفی توسعه داده شده است. روش‌های مدل‌سازی درونی و ماتریس پاسخ (Gorelick, 1983) از جمله روش‌هایی هستند که از مدل شبیه‌سازی در داخل مدل‌های مدیریتی استفاده می‌کنند. روش مدل‌سازی درونی، جهت حل، از معادلات مدل شبیه‌سازی به طور مستقیم در درون مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌کند. این روش کاربرد محدودی داشته و اغلب برای مدیریت هیدرولیک آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ماتریس پاسخ نیز بر اساس اصل برهم‌نهی بوده و بیشتر برای آبخوان‌های محصور استفاده شده است. بیشتر مطالعاتی که اخیراً در زمینه‌ی مدیریت هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی انجام شده است به صورت مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی متصل شده است. Ayvaz and Karahan (2008) یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای شناسایی مکان چاه‌های زیرزمینی شناخته نشده به همراه نرخ پمپاژ برای سیستم دو بعدی آبخوان پیشنهاد کرده‌اند. تعیین محل چاه‌ها با یک روش تکراری و بر مبنای جابجایی یک زیر دامنه است که این محل‌ها بر اساس نتایج بهینه‌سازی نرخ پمپاژ برای چاه‌های مختلف از پیش تعریف شده در داخل زیر دامنه، به صورت ضمنی تعیین شده‌اند. Liu et al. (2008) با ترکیب مدل جریان آب زیرزمینی با یک کد بهینه‌سازی به تعیین یک نرخ پمپاژ بهینه به منظور بهبود مدیریت آب زیرزمینی پرداخته‌اند. در نهایت، تأثیر دو نوع سناریوی مدیریتی (شهرنشینی و طرح انتقال آب از جنوب به شمال) را بر روی منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار داده‌اند. Singh et al. (2013) یک نرخ پمپاژ پایدار و اجرایی بر اساس مدل‌سازی عددی آبخوان ارائه کرده‌اند. در این مطالعه برای رسیدن به یک مقدار پایدار در برداشت از یک مدل بهینه‌سازی با برنامه‌نویسی خطی استفاده شده است. در این تحقیق، هدف بیشینه ساختن کل برداشت آب زیرزمینی با در نظر گرفتن قیدهای زیست‌محیطی و اجتماعی برای دستیابی به یک الگوی برداشت خاص است. Zekri et al. (2015) طی تحقیقی برای یک آبخوان ساحلی، یک چارچوب کلی برای تخمین مقدار بهینه استخراج آب زیرزمینی پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق از مدل MODFLOW برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله چندهدفه استفاده شده است. نتایج، افزایش سود حاصل از کشاورزی با کنترل میانگین ماکزیمم افت سالانه در یک محدوده خاص را نشان می‌دهد.

مدل‌سازی اندرکنش بین انسان و محیط به طور کلی در ادبیات مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب نادیده گرفته شده است (Sivapalan et al., 2012). به گونه‌ای که تا چند سال پیش بیشتر مطالعات فقط بر روی مدل‌های محیطی متمرکز بود که بر روی یک یا چند سناریو از فعالیت‌های انسانی که به عنوان شرایط مرزی ثابت تعریف شده‌اند، محدود می‌شد (Sivakumar et al., 2005; Cooper et al., 2008). امروزه این دیدگاه یک طرفه ممکن است درست نباشد و نیازمند تغییری در جهت قرار دادن انسان در حلقه مدل‌سازی باشد. به منظور پاسخ به این نیاز اخیراً مدل‌های ترکیبی انسانی-اکولوژیکی مختلفی برای مدیریت سیستم‌های پیچیده توسعه داده شده است. از این روش‌ها می‌توان به سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی-زیست‌محیطی (Akhbari, 2012)، اجتماعی-هیدرولوژیکی (Sivapalan et al., 2012) و اجتماعی-زیست‌محیطی (Filatova et al., 2016) اشاره کرد. هدف این روش‌ها فراهم کردن یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای مدیریت بهتر منابع است.

مدل عامل‌بنیان[1] از جمله روش‌هایی است که امروزه برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده به طور گسترده‌ای مورد توجه محققین قرار گرفته است. این مدل، ارتباط مستقیمی با سیستم‌های انطباقی پیچیده[2] دارد که مفهوم ذاتی آن تعریف سیستم‌ها از جزء به کل است و این امکان را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌سازد تا یک مدل انطباقی پیچیده برای تخصیص منابع آب ایجاد کنند (Dietz, 2003). از جمله مطالعات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

Becu et al. (2003) یک مدل عامل‌بنیان برای بررسی اثر مدیریت آب در بالادست رودخانه بر کشاورزی پایین‌دست، توسعه داده‌اند. در همین راستا، از یک مدل فیزیکی برای شبیه‌سازی سیستم هیدرولوژیکی و از مدل چندعاملی برای شبیه‌سازی تصمیمات

کشاورزان استفاده کرده‌اند. در نهایت، نتایج از دیدگاه‌های مختلف اقتصادی و مدیریت آب، تحت سناریوهای مختلف بررسی شده است. Zellner (2008) پتانسیل 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. Giuliani and Castelletti (2013) به منظور مدل‌سازی و تحلیل سطوح مختلف همکاری و همچنین تغییر اطلاعات مابین تصمیم‌گیرندگان مختلف برای اجازه به عامل‌های پایین‌دست برای وفق بهتر خود با رفتارهای بالادست در حوضه رودخانه‌ی مورد مطالعه در این تحقیق، از شبیه‌سازی عامل‌بنیان استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد هماهنگی عامل‌ها که با استفاده از تبادل اطلاعات کامل به دست می‌آید باعث شده تا عامل‌های پایین‌دست بتوانند خود را با رفتار عامل‌های بالادست بهتر وفق دهند و سود کل سیستم را حداکثر کنند. Akhbari and Grigg (2013) یک رویکرد جدیدی از مدل عامل‌بنیان به منظور شبیه‌سازی رفتار و تعامل ذینفعان پیشنهاد کرده‌اند که به عنوان یک بازی مدل شده است و در آن ذینفعان در جهت همکاری در بازی به حل مشکل تشویق می‌شوند. این مدل، تصمیم‌گیرندگان را به ارزیابی سناریوهای مدیریتی و همچنین درک پیامدهای ناشی تصمیمات آن‌ها بر روی تغییر رفتار ذینفعان مختلف، قادر می‌سازد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر Akhbari and Grigg (2015) علاوه بر ارائه پیشنهادهایی برای شناسایی و طبقه‌بندی ذینفعان چارچوبی برای مدیریت مناقشات توسعه داده‌اند. Reeves and Zellner (2010) مدل عددی (MODFLOW) را با مدل عامل‌بنیان به صورت یکپارچه شده بیان نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که مدل یکپارچه شده توانایی مدل کردن تنش‌های وارد شده به سیستم آب زیرزمینی را دارد. در حالی که در روش‌های سنتی نیاز است که کاربر تنش‌های ایجاد شده را در طول زمان وارد کند. Schreinemachers and Berger (2011) یک پکیج نرم‌افزاری عامل‌بنیان با برنامه‌ریزی ریاضی بر اساس سیستم‌های چندعامله معرفی کرده‌اند که به صورت بهینه‌سازی مقید شده به منظور شبیه‌سازی تصمیمات کشاورزان در سیستم‌های کشاورزی ایجاد شده است. مزیت این نرم‌افزار نسبت به نرم‌افزارهای مشابه دیگر در ترکیب رویکرد مدل‌سازی اقتصادی و بیوفیزیکی مختلف است. Mulligan et al. (2014) سیاست‌های مختلف مدیریت آب زیرزمینی را بر روی یک آبخوان بررسی کرده‌اند. در این تحقیق، سیاست‌ها با استفاده از دو رویکرد مدل‌سازی کنترل بهینه و چند عامله با هم مقایسه شده‌اند. مدل تصمیم‌گیری اقتصادی با یک مدل فیزیکی نشان‌دهنده آبخوان که با استفاده از مدل MODFLOW تهیه گردیده، متصل شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی عملکرد ضعیف سیاست‌های یکنواخت اعمال شده به عامل‌های مختلف است. Al-Amin et al. (2015) یک مدل عامل بنیان به منظور تحلیل تعاملات پویای میان تغییرات تقاضای آب و منابع محدود آب زیرزمینی تحت سناریوهای تغییر اقلیم و تنش‌های افزایش جمعیت توسعه داده‌اند. 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. Farhadi et al. (2016) یک ساختار عامل‌بنیان را به منظور دستیابی به راه حلی پایدار برای مدیریت آب زیرزمینی پیشنهاد کرده‌اند. در این مطالعه، ضرایب تأثیر اجتماعی در مطالعات محیط زیست و مکانیسم سیاست‌گذاری به گونه‌ای که ذینفعان را به همکاری با تصمیم‌گیرندگان تشویق کند، در مدل عامل‌بنیان گنجانده شده است. استفاده از این ساختار برای یک مطالعه‌ی موردی باعث کاهش چشمگیر در مقدار تقاضای آب و افزایش سطح آب زیرزمینی شده است. Darbandsari et al. (2017) یک ساختار جدید بر مبنای مدل‌سازی عامل‌بنیان برای شبیه‌سازی مشخصات رفتاری مصرف‌کنندگان آب خانگی و تعاملات رفتاریشان معرفی کرده‌اند. ساختار پیشنهاد شده در این تحقیق می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم‌گیری برای ارزیابی پاسخ‌های مصرف‌کنندگان آب به فاکتورهای مختلف مانند قیمت آب و سیاست‌های تبلیغاتی استفاده شود. Bakaji et al. (2017) یک ساختار مدل‌سازی تصمیم‌گیری اجتماعی–هیدرولوژیکی عامل‌بنیان پیشنهاد کرده‌اند. این ساختار یک تعامل دینامیکی بین آلودگی آب زیرزمینی و رفتار اجتماعی فراهم کرده است. این مطالعه نشان داده است که استفاده از ریسک سلامت اجتماعی، به جای غلظت آلاینده‌ها به عنوان یک متغیر بهینه‌سازی، تصمیمات مدیریت آب را با هدف به حداکثر رساندن سلامت اجتماعی بهبود می‌بخشد. Lotfi and Araghinejad (2017) ضمن معرفی روش مدل‌سازی عامل‌بنیان چالش‌های اساسی این روش در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب را مورد بررسی قرار داده‌اند. طراحی رفتار عامل‌ها، برقراری ارتباط بین بخش اجتماعی و بخش اکولوژیکی، مکانی کردن مدل و کالیبراسیون از جمله چالش‌هایی است که در این تحقیق مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. Ohab-Yazdi and Ahmadi (2018) از یک مدل عامل‌بنیان جهت ارزیابی پارامترهای مؤثر در رفتار عامل‌های محدوده‌ی لنجانات حوضه زاینده‌رود استفاده کرده‌اند. عکس‌العمل سه عامل کشاورزان، آب منطقه‌ای و استان تحت سیاست‌های مختلف آبی شبیه‌سازی شده است. همچنین جهت ارزیابی اثر پارامترهای مختلف در کنترل تخلفات در حفر چاه‌های غیرمجاز و بهره‌برداری غیرمجاز از دو سناریوی کارآمد و ناکارآمد استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داده است که نحوه تعامل شرکت آب منطقه‌ای با دیگر ارگان‌ها تأثیر زیادی بر کنترل تخلفات دارد. Ghazali et al. (2018) یک مدل ترکیبی بر مبنای

مدل عامل‌بنیان و روش TOPSIS، با هدف کاهش تقاضای آب کشاورزان توسعه داده‌اند. برای تعیین ضرایب مورد نیاز مدل عامل‌بنیان از روش TOPSIS استفاده شده است. در نهایت، بر اساس یک مدل بهینه‌سازی، الگوی کشت بهینه برای نواحی مدیریتی مختلف ارائه شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش نسبت تقاضای آب کشاورزان به مقدار آب قابل تخصیص برای هر سه شرایط آب و هوایی تر، معمولی و خشک است. Xiao et al. (2018) یک روش مدل‌سازی عامل‌بنیان به منظور ارزیابی رفتار مصرف‌کنندگان آب برای مدیریت تقاضای آب حوضه یک رودخانه توسعه داده‌اند. مدل عامل‌بنیان استفاده شده در این تحقیق برای یک مطالعه موردی نشان داده است که کشاورزان مشارکت کنندگان اصلی حفاظت از آب هستند. همچنین نتایج نشان داده است که استفاده از استراتژی مدیریت تقاضای آب هم از دید اقتصادی و هم از دید اکولوژیکی برای کل سیستم مفید است.

استفاده گسترده از مدل‌های ترکیبی برای مدیریت منابع آبی مختلف به خصوص در سال‌های اخیر نشان‌دهنده‌ی کارایی مؤثر این نوع مدل‌ها در مدیریت سیستم‌های پیچیده است. در این مقاله، اتصال مدل‌ها با استفاده از یک روش جدید بر مبنای تولید پایگاه داده‌ی سلسله مراتبی و توسعه کد در MATLAB صورت گرفته است. مزیت این روش نسبت به روش‌های استفاده شده در مطالعات قبلی که اکثراً به صورت استفاده از کد استاندارد MODFLOW است، دسترسی به داده‌های هر یک از بسته‌های MODFLOW است که امکان مشاهده و ویرایش آن‌ها نیز فراهم بوده و برای اجرای مکرر مدل‌های بزرگ حافظه کمتری را اشغال می‌کند. از طرف دیگر، با بررسی مطالعات انجام گرفته در مورد آبخوان دشت اردبیل تاکنون مطالعه‌ای که علاوه بر در نظر گرفتن اهداف مختلف ذینفعان کلیدی و پاسخ آبخوان، اختلافات میان ذینفعان را در نظر گرفته باشد، انجام نشده است. در این تحقیق، سعی شده تا با استفاده از ابزارهای مختلف شبیه‌سازی آب زیرزمینی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی رفتاری راهکاری قابل اجرا برای مدیریت آبخوان اردبیل ارائه گردد. در همین راستا ابتدا با جمع‌آوری داده‌های هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی اقدام به تهیه مدل مفهومی و سپس مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل MODFLOW شده است. سپس به منظور یافتن مقادیر بهینه برای تخصیص از منابع آب زیرزمینی برای هر یک از نواحی مدیریتی با در نظر گرفتن مطلوبیت‌های هر یک از ذینفعان کلیدی، از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات[3] استفاده شده است. در جهت یافتن عکس‌العمل آبخوان نسبت به میزان تخصیص‌های مختلف، مدل شبیه‌سازی به مدل بهینه‌سازی متصل شده است. در نهایت، با استفاده از مدل عامل‌بنیان و در نظر گرفتن تنش‌های اجتماعی و تعامل عامل‌ها با یکدیگر سناریوهای مدیریتی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، برای ارزیابی ساختار ارائه شده، آبخوان ممنوعه دشت اردبیل که نمونه بارزی از وجود ذینفعان مختلف با مطلوبیت متضاد است به عنوان مطالعه موردی در این تحقیق استفاده شده است.

۲- روش شناسی

ساختار کلی استفاده شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق این شکل ساختار پیشنهادی شامل سه مدل اصلی است: مدل بهینه‌سازی، مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی و مدل شبیه‌سازی رفتاری عامل‌بنیان. در مدل بهینه‌سازی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. این مدل، با کنترل قیدهای هر یک از توابع هدف و فراخوانی مدل شبیه‌سازی (که کالیبره و صحت‌سنجی شده است) به منظور کنترل افت، مقدار آب قابل تخصیص را برای هر یک از نواحی تعیین می‌کند. سپس این مقدار به عنوان ورودی مدل شبیه‌سازی رفتاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، این مدل با ارزیابی سناریوهای مدیریتی مختلف و اجرای دوباره مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی و در نظر گرفتن تعامل عوامل با یکدیگر نتیجه‌ی نهایی را مشخص می‌کند. لینک مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بر اساس روشی جدید بر مبنای تولید پایگاه داده سلسله مراتبی و توسعه کد در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است.

۲-۱- مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی از مدل MODFLOW، تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا[4]، استفاده شده است. نسخه اصلی ایـــن مدل اولین بار توسط McDonald و Harbaugh در سـال ۱۹۸۸ تهیه گردیده است (McDonald and Harbaugh, 2003). این مدل، جریان را به صورت سه بعدی و به روش تفاضل محدود مدل می‌نماید. همچنین از نرم‌افزار GMS[5] به عنوان رابط گرافیکی به منظور پیش پردازش و پس پردازش مدل آب زیرزمینی استفاده شده است. در واقع نرم‌افزار GMS به کمک ماژول‌های مختلف، ورودی‌های مدل را به فرمت مناسب تهیه می‌کند، سپس هسته اصلی مدل مورد نظر (در اینجا، MODFLOW) را فراخوانی، برنامه را اجرا و مجدداً خروجی مدل را ساماندهی و به فرمت مناسب و دلخواه کاربر درمی‌آورد. تعریف شرایط موجود برای مدل‌سازی در نرم‌افزار MODFLOW از طریق بسته‌های مربوطه صورت می‌گیرد. معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل که توسط MODFLOW به کار می‌رود به صورت رابطه‌ی (۱) است:

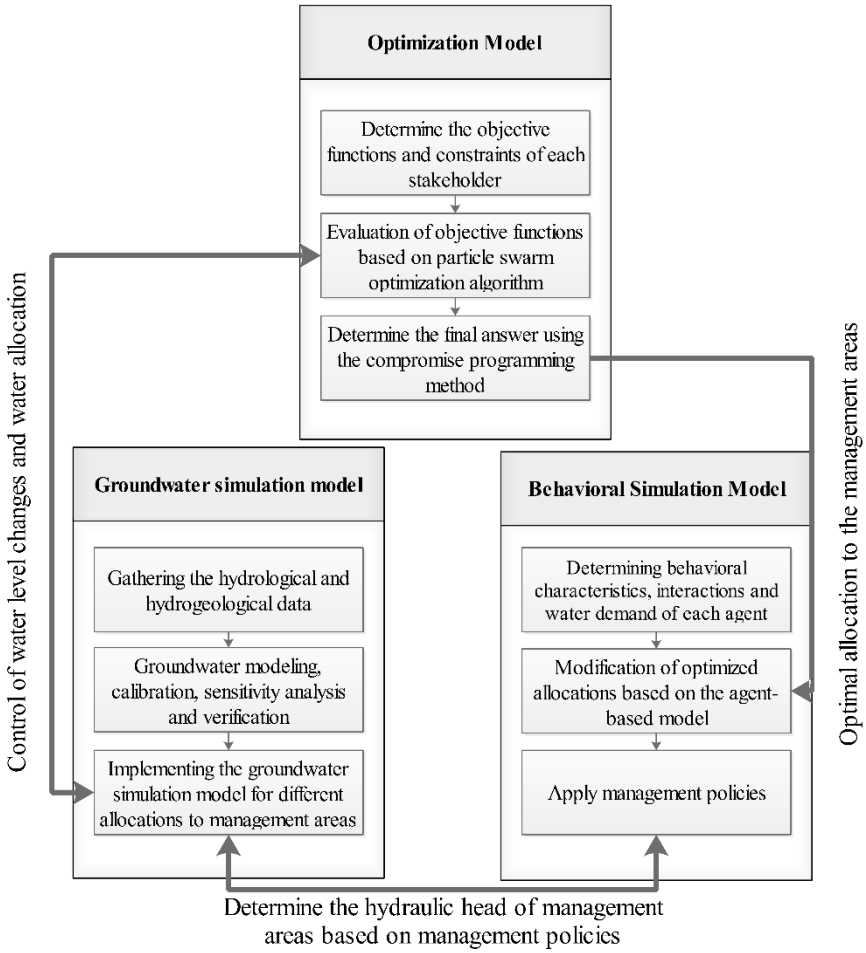

Fig. 1- The proposed method and the relationship between models

شکل ۱- ساختار پیشنهاد شده و نحوه ارتباط هر یک از مدل‌ها

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (۱)$$

K_{xx}، K_{yy} و K_{zz} مقادیر هدایت هیدرولیکی در جهات x، y و z می‌باشند. h بار هیدرولیکی، W مقدار تغذیه (در این حالت W منفی است) یا تخلیه (در این حالت W مثبت است)، $S_s = S_y/b$ ضریب ذخیره‌ی ویژه که در آن S_y ضریب آبدهی ویژه و b ضخامت آبخوان است. همچنین t نیز نشان دهنده‌ی زمان می‌باشد. به طور کلی S_s، K_{xx}، K_{yy} و K_{zz} تابعی از مکان هستند و W می‌تواند تابعی از مکان و زمان باشد (Todd and Mays, 2005).

رابط گرافیکی GMS هنگامی که مدل MODFLOW را اجرا می‌کند، فایل‌هایی با فرمت HDF5[6] ذخیره می‌کند. این فرمت، داده‌ها را به صورت باینری ذخیره می‌کند و معمولاً برای مدیریت و طبقه‌بندی داده‌های انبوه استفاده می‌شود. توسعه این فرمت توسط مرکز ملی برنامه‌های ابر رایانشی[7] انجام گرفته است. یک نمونه فایل با فرمت HDF5 در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل، داده‌ها در ساختارهای سلسله‌ای به نام گروه‌ها قرار می‌گیرند. هر یک از این گروه‌ها می‌تواند شامل دیگر گروه‌ها، مجموعه‌ی داده‌ها، ویژگی‌ها، لینک‌ها و نوع داده‌ها باشد. یک مجموعه داده در واقع متشکل از داده‌هایی است که می‌تواند به صورت آرایه‌ی چند بعدی یا رشته باشد. ویژگی‌ها به هر نوع داده‌ای که همراه با دیگر بخش‌ها (مانند مجموعه داده‌ها) می‌تواند باشد، اطلاق می‌شود. لینک‌ها نیز روشی برای ارجاع داده‌ها هستند تا نیازی برای کپی کردن داده‌ها نباشد. همچنین قسمت نوع داده‌ها، توصیفی از مجموعه داده‌ها و یا ویژگی‌ها را ارائه می‌دهد. به منظور مدیریت و درک بهتر قسمت‌های مختلف می‌توان از نرم‌افزار HDFView استفاده کرد.

به منظور نوشتن و خواندن اطلاعات از HDF فایل‌ها، نیاز است که این فایل‌ها به صورت ضمنی توسط یک نرم‌افزار مناسب که قابلیت دسترسی به این‌گونه فایل‌ها را دارد، اجرا شوند و در انتها بعد از اتمام کار در هر مرحله این فایل‌ها به صورت ضمنی بسته شود.

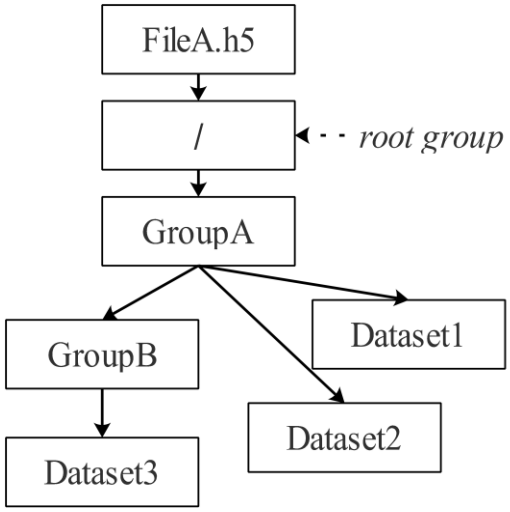

Fig. 2- An HDF5 file with hierarchical structure (National Center for Supercomputing Applications, 2016)

شکل ۲- یک فایل HDF5 با ساختار سلسله مراتب گروهی (مرکز ملی برنامه‌های ابر رایانشی، ۲۰۱۶)

توابع سطح بالا و یا سطح پایین MATLAB برای دسترسی به این‌گونه فایل‌ها و نوشتن و خواندن اطلاعات به آن‌ها می‌توانند استفاده شوند. در این تحقیق با استفاده از ساختارهای تولید شده توسط HDF5 فایل‌ها و توسعه کد در MATLAB، مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی به هم متصل شده‌اند. این روش امکان دسترسی به بسته‌های مختلف مدل MODFLOW را فراهم کرده و برای اجرای مکرر مدل‌های بزرگ، حافظه‌ی کمتری را اشغال می‌کند.

۲-۲- مدل بهینه‌سازی تخصیص آب

دشت اردبیل نمونه‌ی بارزی از وجود ذینفعان مختلف با مطلوبیت‌های متضاد است. در منطقه‌ی مطالعاتی سه ذینفع کلیدی می‌توان تعریف کرد: شرکت آب منطقه‌ای (به عنوان بخش تصمیم‌گیرنده)، کشاورزان (به عنوان بخش متقاضی آب) و محیط زیست (به عنوان بخش متقاضی آب در جهت کنترل افت). مطابق رابطه (۲) مطلوبیت شرکت آب منطقه‌ای به صورت تخصیص عادلانه آب به نواحی مختلف تعریف شده است. به همین منظور در جهت تخصیص عادلانه آب از ضریب جینی (Gini, 1921) استفاده شده است. ضریب جینی شاخصی برای بیان نابرابری اقتصادی است. در سال‌های اخیر از این ضریب به منظور بیان استفاده عادلانه از منابع آبی استفاده شده است (Hu et al., 2016). این ضریب عددی بین صفر و یک است. عدد صفر نشان دهنده برابری کامل و بالا رفتن این عدد به معنای نابرابری بیشتر است. ضریب جینی از مفهوم "میانگین اختلاف نسبی" استفاده می‌کند. همچنین رابطه (۳) نشان‌دهنده مطلوبیت بخش کشاورزان است. این بخش سعی در افزایش برداشت تا رسیدن به ماکزیمم تقاضای خود دارد. از آنجایی که شرایط فعلی آبخوان بحرانی بوده و بیشترین بهره‌برداری از منابع آبی صورت می‌گیرد، میزان برداشت فعلی هر یک از کشاورزان به عنوان ماکزیمم تقاضای هر یک تعریف شده است. به منظور جلوگیری از مشکلات ناشی از برداشت بی‌رویه، کنترل سطح آب زیرزمینی در یک حد معین ضروری است. بنابراین تابع مطلوبیت بخش محیط زیست نیز مطابق رابطه‌ی (۴) به صورت کمینه کردن افت سطح آب زیرزمینی در یک حد مجاز در نظر گرفته می‌شود. همچنین محدودیت‌های حاکم بر مسأله مطابق روابط (۵) و (۶) است که به ترتیب قید مربوط به کنترل میزان برداشت از هر چاه و کنترل میزان افت در نواحی مدیریتی را نشان می‌دهد.

$$\text{Min } G = \frac{1}{2\,N^2\overline{Q}} \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\left|Q_i - Q_j\right| \qquad (۲)$$

$$\text{Min } D = \sum_{i=1}^{N}(Q_{max,i} - Q_i) \qquad (۳)$$

$$\text{Min } Dr = \sum_{i=1}^{N} dr_i \qquad (۴)$$

Subject to:

$$Q_{min,i} \le Q_i \le Q_{max,i} \qquad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{n} Sr_i \le D_{r_{(allowable)}} \qquad (۶)$$

در روابط بالا G تابع مربوط به توزیع عادلانه، D مجموع کمبود آب کشاورزان، Dr مجموع افت چاه‌های بهره‌برداری، Q_i، Q_j، $Q_{max,i}$، $Q_{min,i}$ و $\overline{Q}$ به ترتیب نشان‌دهنده میزان آب تعیین شده برای چاه i ام و j ام، ماکزیمم، مینیمم و میانگین آب تعیین شده برای هر یک از چاه‌ها، dr_i و Sr_i به ترتیب میزان افت چاه بهره‌برداری i ام و میزان افت چاه مشاهداتی ناحیه‌ی مدیریتی i ام (مقادیر dr_i و Sr_i، از طریق مدل لینک شده‌ی شبیه‌سازی-بهینه‌سازی تعیین می‌شود و تابعی از مقدار Q_i است)، $D_{r_{(allowable)}}$ مجموع افت مجاز چاه‌های مشاهداتی در نواحی مدیریتی، N و n نیز به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد چاه‌های بهره‌برداری و تعداد چاه‌های مشاهداتی در نواحی مدیریتی است.

در ادامه برای حل مسأله چندهدفه از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Eberhart and Kennedy, 1995) استفاده شده است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم جستجوی اجتماعی است که از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. این الگوریتم به عنوان یک روش جستجوی غیر قطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح شد.

همچنین برای رسیدن به یک جواب نهایی از میان مجموعه جواب‌ها، روش برنامه‌ریزی سازشی[۸] به کار گرفته شده است. ایده اولیه این روش نیز توسط Zeleny (1973) ارائه شده است. مطابق رابطه (۷)، این روش با کم کردن فاصله بین عملکرد یک گزینه تا عملکرد یک نقطه آرمانی از دید معیارهای مختلف، باعث بهبود مطلوبیت تصمیم‌گیر می‌شود. مزیت این روش ساده بودن درک آن است (Zarghami and Szidarovszky, 2011).

$$\text{Min } L = \left[\sum_{i=1}^{n} w_i^P \left(\frac{f_i^{best} - f_i}{f_i^{best} - f_i^{worst}}\right)^P\right]^{1/P} \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، L فاصله هر گزینه از نقطه آرمانی، f_i^{best} و f_i^{worst} به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بدترین و بهترین مقدار معیار i ام، f_i عملکرد گزینه از دید معیار i ام، w، n و p نیز به ترتیب وزن نسبی معیار i ام، تعداد معیارها و پارامتر بیان کننده اهمیت فاصله است.

۲-۳- مدل شبیه‌سازی رفتاری

در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی رفتاری از مدل عامل‌بنیان استفاده شده است. این مدل رویکردی نسبتاً جدید برای مدل‌سازی سامانه‌هایی است که از عوامل مستقل ولی در تعامل با هم تشکیل شده‌اند. به عبارت دیگر، مدل عامل‌بنیان با در نظر گرفتن منافع هر یک از عوامل درگیر با سیستم به جای در نظر گرفتن منافع کل سیستم رویکردی جزء به کل دارد. ساختار کلی مدل عامل‌بنیان در شکل ۴ آمده است. مطابق این شکل، ابتدا به منظور تشخیص نوع رفتار عامل‌ها مقادیر بهینه تخصیص آب به دست آمده از مدل بهینه‌سازی برای هر ناحیه‌ی مدیریتی با ماکزیمم تقاضای هر یک از نواحی مقایسه می‌شود. در حالتی که مقدار ماکزیمم تقاضای یک ناحیه بیش از مقدار بهینه‌ی آن باشد رفتار آن عامل غیر همکارانه و در غیر این صورت رفتار عامل همکارانه در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد با در نظر گرفتن ویژگی‌های اجتماعی ($V_{i,C}$ و $V_{i,NC}$) و تنش‌های وارده از طرف دیگر عامل‌ها و محیط (F_m)، میزان تمایل هر یک از عامل‌ها به تغییر رفتار فعلی خود با استفاده از روابط (۸) و (۹) سنجیده می‌شود. این روابط توسط Akhbari and Grigg (2015) توسعه داده شده‌اند و برگرفته شده از مطالعه Edwards et al. (2005) (که مطابق با مدل اشاعه‌ی جامعه‌شناختی[۹] Young (1999) است) درباره‌ی محدوده آب مسکونی می‌باشند. میزان تمایل به همکاری عامل همکارانه با استفاده از رابطه (۸) و برای عامل غیرهمکارانه از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. در واقع ترم‌های اول سمت راست این معادلات نشان‌دهنده‌ی تنش‌های اجتماعی است. مطابق شکل ۳ این تنش‌ها به گونه‌ای است که هر یک از عامل‌ها تمایل دارند تا رفتار خود را با رفتار غالب عامل‌های همسایه خود همسو کنند.

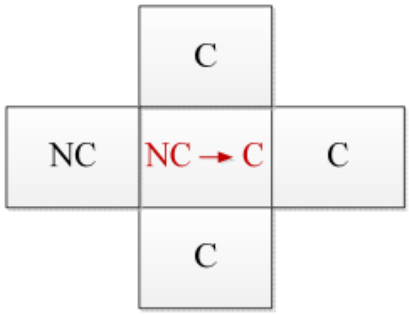

Fig. 3- The effect of social pressure on each agent (Akhbari, 2012)

شکل ۳- تأثیر تنش‌های اجتماعی روی عامل (Akhbari, 2012)

در این شکل رویکرد همکارانه و غیرهمکارانه به ترتیب به صورت "C" و "NC" نشان داده شده است. همچنین ترم دوم در سمت راست این معادلات (F_m) برای اعمال تنش‌های وارده از طرف دیگر عامل‌ها و قوانین مدیریتی (تشویق‌ها، جریمه‌ها و آموزش‌ها) است. در این تحقیق، برای محاسبه ضریب تصحیح F_m از روابط (۱۰) و (۱۱) که توسط Farhadi et al. (2016) پیشنهاد گردیده، استفاده شده است. مطابق رابطه (۱۰) اگر رفتار عامل همکارانه باشد دولت می‌تواند برای ادامه‌ی روند همکارانه عامل‌ها در آینده تشویق‌ها و آموزش‌هایی فراهم سازد که این دو ترم در این رابطه در نظر گرفته شده است. همچنین اگر رفتار عامل غیرهمکارانه باشد یا به عبارتی برداشتی بیش از مقدار بهینه داشته باشد مطابق رابطه (۱۱) جریمه‌ها و آموزش‌های می‌تواند از طرف عامل دولتی اعمال گردد.

$$U_i = \max\begin{cases} U_{i,C\to C} = a \times V_{i,C} + F_m \\ U_{i,C\to NC} = b \times V_{i,NC} \end{cases} \quad (۸)$$

$$U_i = \max\begin{cases} U_{i,NC\to C} = b \times V_{i,C} + F_m \\ U_{i,NC\to NC} = a \times V_{i,NC} \end{cases} \quad (۹)$$

در روابط (۸) و (۹)، U_i نشان دهنده میزان تمایل عامل‌ها به همکاری با تصمیم‌های مدیریتی را نشان می‌دهد. همچنین اندیس $C \to NC$ ($NC \to C$) در این روابط نشان دهنده تمایل عامل‌ها به تغییر رفتار از حالت همکارانه به حالت غیر همکارانه (یا غیرهمکارانه به همکارانه) است (اندیس C، نشان دهنده‌ی حالت همکارانه و اندیس NC، نشان دهنده‌ی حالت غیرهمکارانه است)، a=۰/۷ و b=۰/۳ (که توسط Edwards et al. (2005)، پیشنهاد شده است)، $V_{i,C}$ و $V_{i,NC}$ بیان کننده درصد همسایه‌های عامل i ام که به ترتیب رفتار همکارانه و غیر همکارانه دارند، است. F_m، ضریب تصحیح مربوط به قانون‌هایی است (تشویق‌ها، جریمه‌ها و غیره) که از طرف قانون‌گذار و محیط تعیین می‌شود. $D_{max,i}$ و $Q_{opt,i}$ به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار ماکزیمم تقاضای فعلی و مقدار بهینه‌ی تخصیص یافته برای هر یک از عامل‌ها است. مطابق روابط (۸) تا (۱۱) در صورتی که ماکزیمم تقاضای آب

عامل‌ها با مقدار بهینه تخصیص یافته برابر شود عامل‌ها تنها تحت تأثیر آموزش و تنش‌های اجتماعی قرار گرفته و در این حالت بیشترین تمایل به همکاری عامل‌ها (U_i) اتفاق می‌افتد. همچنین ممکن است عامل‌ها فقط تحت تأثیر تنش‌های اجتماعی قرار گیرند. در این صورت مقدار ضریب تصحیح (F_m) برابر صفر خواهد شد.

$$F_m = (1-a) \times \left[\{\alpha \times i_{train}\} + \left\{(1-\alpha) \times \left[\frac{Q_{opt,i} - D_{max,i}}{Q_{opt,i}}\right]^2\right\}\right] \quad (10)$$

تأثیر آموزش — تأثیر تشویق‌ها

$$F_m = (1-b) \times \left[\{\beta \times i_{train}\} + \left\{(1-\beta) \times \left[\frac{Q_{opt,i} - D_{max,i}}{Q_{opt,i}}\right]^2\right\}\right] \quad (11)$$

تأثیر آموزش — تأثیر جریمه‌ها

رابطه‌ی (۱۰)، ضریب تصحیح مربوط به رویکرد همکارانه و رابطه‌ی (۱۱)، ضریب تصحیح مربوط به رویکرد غیرهمکارانه است. در این روابط a=۰/۷ و b=۰/۳ (که توسط Edwards et al. (2005)، پیشنهاد شده است)، i_{train} ضریب تأثیر آموزش بر روی عامل i ام می‌باشد که نشان دهنده‌ی میزان دانش و سطح اطلاعات در تمایل به همکاری هر یک از عامل‌ها است. در این مقاله، مقدار این ضریب به صورت تصادفی برای نواحی مختلف انتخاب شده است. α و β به ترتیب ضرایب مربوط به تشویق‌ها و جریمه‌هایی است که تعیین مقادیر آن‌ها نیاز به مطالعات اجتماعی دارد (در این تحقیق α و β به ترتیب ۰/۷ و ۰/۶ فرض شده است). $D_{max,i}$ و $Q_{opt,i}$ نیز به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار ماکزیمم تقاضای فعلی، مقدار بهینه‌ی تخصیص یافته برای هر یک از عامل‌ها است.

در مرحله نهایی، مطابق شکل ۴ در صورتی که تخصیص مقادیر بهینه به هر عامل منجر به رفتار همکارانه آن عامل گردد، این مقدار تخصیص برای عامل مربوطه نهایی می‌گردد. در غیر این صورت، مقادیر جدید تقاضای آب برای هر عامل ($ND_{max,i}$) با استفاده از رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌گردد.

$$ND_{max,i} = Q_{opt,i} + [(D_{max,i} - Q_{opt,i}) \times (1 - U_i)] \quad (12)$$

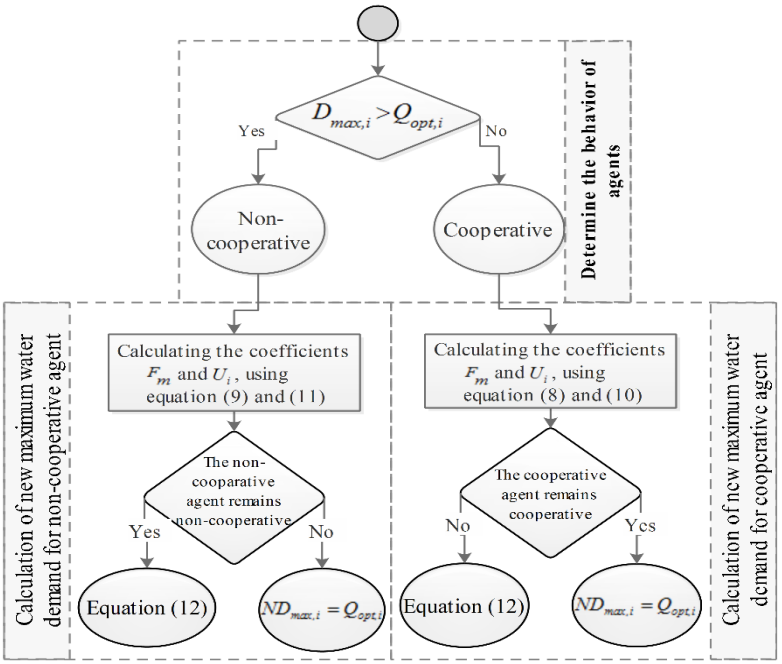

Fig. 4- Agent-based modeling algorithm

شکل ۴- الگوریتم مدل عامل‌بنیان

۳- مشخصات منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه آبریز دشت اردبیل در محدوده طول شرقی ´۴۰ °۴۸ – ´۰۰ °۴۸ و عرض شمالی ´۳۰ °۳۸ – ´۰۰ °۳۸ قرار گرفته است. دشت اردبیل با مساحت حدود ۱۰۷۴ کیلومتر مربع، با داشتن منابع آب زیرزمینی غنی و خاک مرغوب، در نیم قرن اخیر، همواره مورد توجه بوده و محل مناسبی جهت تأمین آب شرب و کشاورزی بوده است. از نظر توپوگرافی بخش پیرامونی منطقه، کوهستانی بوده و بخش مرکزی آن دشت آبرفتی است. شکل ۵ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بیشترین ارتفاع مربوط به قله سبلان با ارتفاع ۴۸۱۰ متر از سطح دریا و کمترین ارتفاع مربوط به ناحیه خروجی در شمال غربی دشت با ارتفاع ۱۱۷۰ متر از سطح دریا است. این دشت دارای سه رودخانه اصلی قره‌سو، بالیخلی‌چای و قوری چای می‌باشد. نوران چای، هیرچای و شهریورچای نیز از دیگر رودهای این دشت می‌باشند. در محدوده مورد پژوهش، ۱۵۰۰ چاه بهره‌برداری مجاز و فعال، ۲ چشمه، ۱۳ رشته قنات وجود دارد. با توجه به تنوع لایه‌ها و تغییرات نوع آن در نواحی مختلف، آبخوان دشت اردبیل، یک آبخوان آزاد محسوب شده چرا که ارتباط جانبی کامل بخش‌های مختلف آن در سراسر دشت وجود دارد و تنها مرز بالای آن در برخی نواحی محصور شـــده است. ضخامت رسوبـــات آبخوان دشت اردبیل از ۱۰ متر تا ۱۸۰ متر متغیر می‌بـــاشـــد (Aban Pajouh Consulting Engineers, 2010). به منظور ارائه راهکار اجرایی، دشت اردبیل به ۳۶ ناحیه‌ی مدیریتی تقسیم‌بندی شده است. هر یک از این نواحی به همراه چاه‌های داخل محدوده‌ی خود به عنوان یک عامل در نظر گرفته شده است. تقسیم‌بندی نواحی مدیریتی بر اساس پلی‌گون‌بندی تیسن چاه‌های مشاهداتی صورت گرفته است.

دشت اردبیل با داشتن منابع غنی آب زیرزمینی به عنوان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی کشور محسوب می‌شود. از طرفی افزایش جمعیت و تمرکز آن در محدوده‌ی مطالعاتی باعث افزایش تقاضای آب بخصوص در بخش کشاورزی که منبع اصلی درآمد در بخش‌های وسیع منطقه می‌باشد، شده است. همین امر موجب حفر تعداد زیادی از چاه‌های مجاز و غیر مجاز گردیده است. برداشت بی‌رویه و کنترل نشده موجب گردیده تا تراز آب زیرزمینی در سال‌های اخیر با افت شدیدی مواجه شود و باعث کاهش کیفیت آب و کف شکنی چاه‌ها گردد. با استناد به نتایج به دست آمده از هیدروگراف ۴۴ ساله دشت (۱۳۹۴-۱۳۵۰) در مجموع ۱۱/۲۹ متر یعنی به طور متوسط سالیانه ۰/۲۶ متر در سطح آب زیرزمینی دشت افت ایجاد شده که منجر به ممنوعه شدن این دشت شده است. ادامه این روند می‌تواند موجب ایجاد مشکلاتی از قبیل فرونشست زمین، کاهش حاصل خیزی خاک و غیره شود.

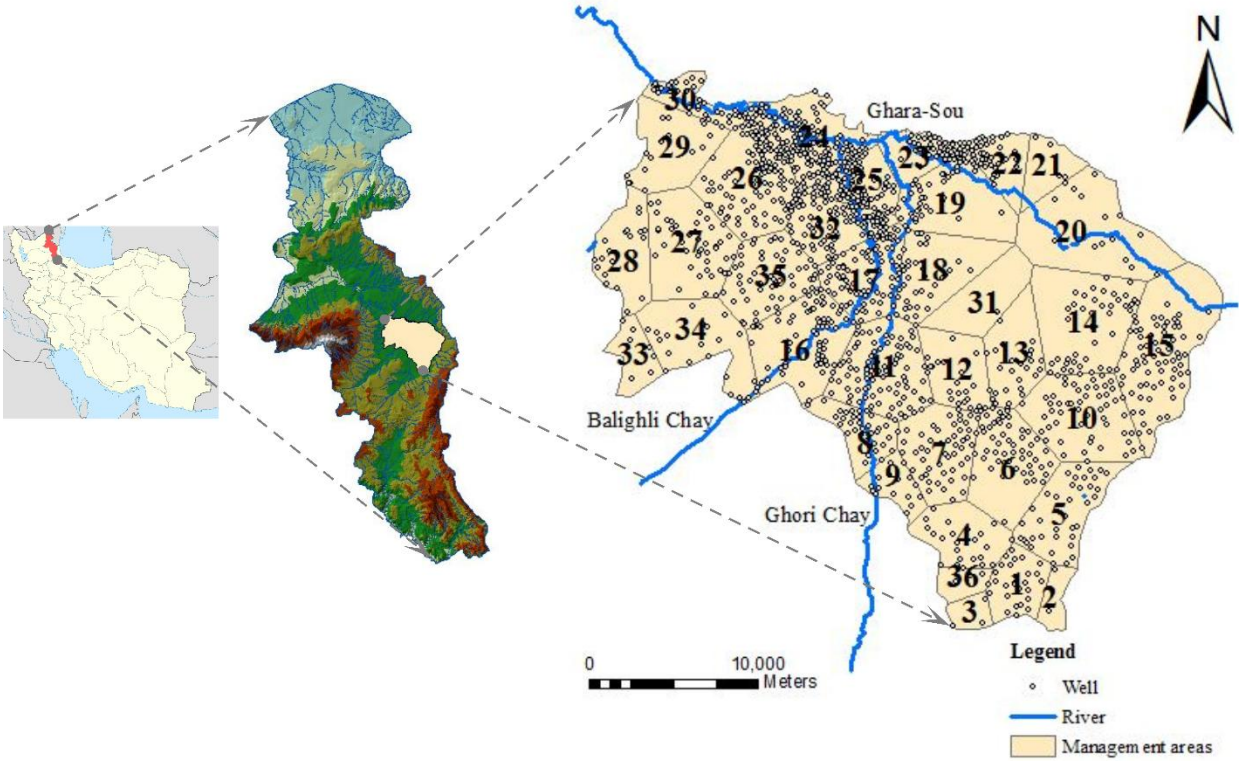

Fig. 5- Management areas along with wells in each area in Ardabil Plain

شکل ۵- نواحی مدیریتی به همراه چاه‌های هر ناحیه در دشت اردبیل

از طرف دیگر آب منطقه‌ای اردبیل به عنوان عامل دولتی سعی در تأمین نیاز بخش‌های مختلف به صورت عادلانه و کنترل شده دارد.

۴- نتایج و بحث

با توجه به وجود چاه‌های غیر مجاز در منطقه و همچنین آگاهی از این که در اسفند ماه کمترین بهره‌برداری از چاه‌ها صورت می‌گیرد و اختلاف نتایج بیلان و ذخیره آبخوان در این ماه کمتر است، در این تحقیق، کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی برای اسفند ماه انجام شده است. با بررسی داده‌های طولانی‌مدت سطح آب زیرزمینی در دشت اردبیل و حتی کوتاه‌مدت آن شواهدی مبنی بر شرایط ماندگار جریان آب زیرزمینی در آبخوان دشت اردبیل دیده نمی‌شود. به همین جهت کالیبراسیون برای شرایط ناماندگار اجرا شده است. همچنین کالیبراسیون مدل بر اساس تحلیل حساسیت صورت گرفته برای دو پارامتر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه انجام شده است. به همین منظور ابتدا برای دو برابر و نصف مقادیر این پارامترها مدل اجرا شده، سپس با تحلیل نتایج به دست آمده و تغییر در مقادیر این پارامترها برای نواحی مختلف، کالیبراسیون به صورت دستی صورت گرفته است. شکل ۶، مقادیر هد مشاهداتی و محاسباتی را بعد از کالیبراسیون برای نواحی مدیریتی مختلف نشان می‌دهد. مطابق مقادیر این نمودار مقدار مجذور میانگین مربعات خطا RMSE[۱۰] برای این حالت برابر ۰/۶۲ متر به دست آمده است. همچنین، صحت‌سنجی مدل برای فصل تابستان انجام شده است. مقادیر هد مشاهداتی و محاسباتی بعد از صحت‌سنجی در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق مقادیر استخراج شده از این نمودار، مقدار RMSE برای این حالت برابر ۰/۸۶ متر به دست آمده است.

وزن اهداف در نظر گرفته شده در روش برنامه‌ریزی سازشی برای مسأله بهینه‌سازی این تحقیق بر اساس مصاحبه‌ها و نظرات کارشناسی صورت گرفته از سازمان آب منطقه‌ای می‌باشد. وزن هر یک از اهداف در جدول ۱ آمده است. مطابق این جدول و با توجه به شرایط فعلی آبخوان، اهمیت توابع به ترتیب به صورت: کنترل افت، توزیع عادلانه و جبران کمبود آب خواهد بود. دو تابع توزیع عادلانه و جبران کمبود آب اهمیت یکسانی دارند. همچنین مقادیر نرمال شده‌ی هر یک از معیارها در این جدول آمده است. بهترین مقدار هر یک از توابع برابر با یک بوده و عدد صفر نشان‌دهنده بدترین مقدار می‌باشد.

Table 1- The normal values and weight of each function

جدول ۱- مقادیر نرمال شده و وزن هر تابع

Function	Weight	Normal Value
Drawdown	0.4	0.54
Equity	0.3	0.49
Deficit	0.3	0.75

در شکل ۸، مقادیر ماکزیمم تقاضای جدید آب، مقادیر ماکزیمم تقاضای اولیه و مقادیر تخصیص بهینه نشان داده شده است. مطابق این شکل، میانگین ماکزیمم تقاضای اولیه نواحی مدیریتی، ۳۳ درصد بیشتر از مقدار بهینه‌ی قابل برداشت از آبخوان است. با توجه به این شکل به جز نواحی ۲۱، ۲۲ و ۳۱ بقیه نواحی رفتار غیرهمکارانه دارند.

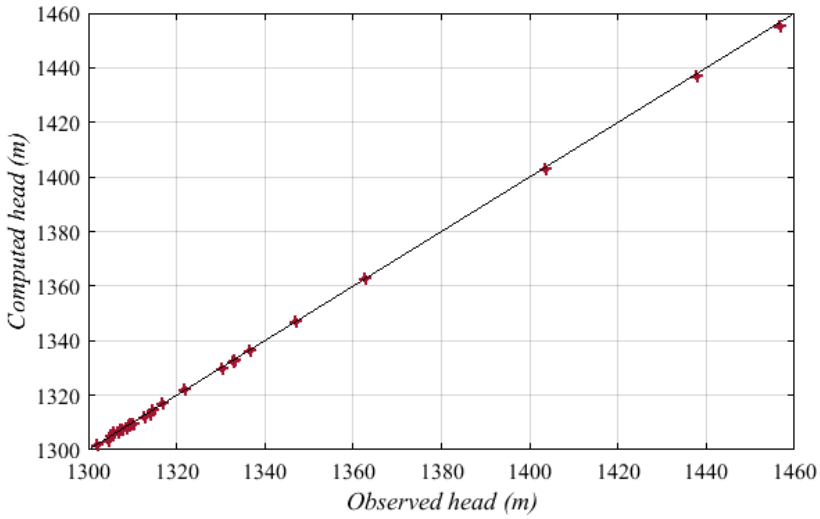

Fig. 6- Observational and computational head values after model calibration for March in the unsteady condition (2007-2008)

شکل ۶- مقادیر تراز مشاهداتی و محاسباتی بعد از کالیبراسیون مدل برای اسفند ماه در شرایط ناماندگار (۱۳۸۷-۱۳۸۶)

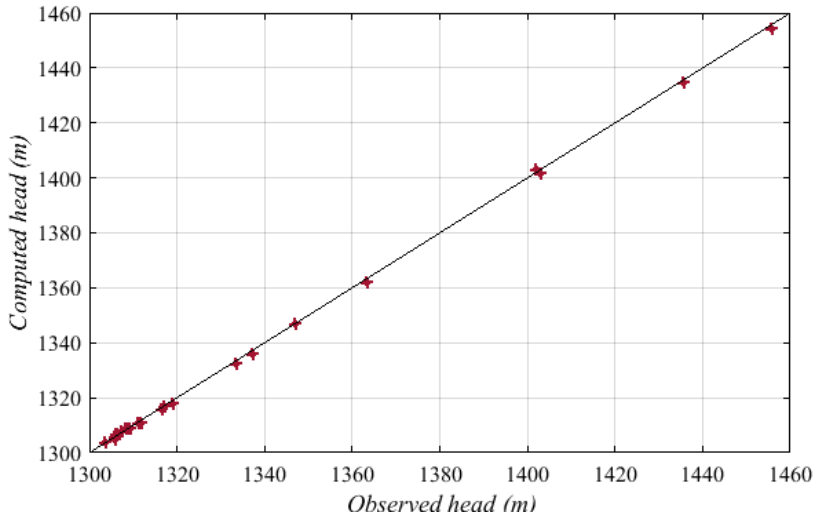

Fig. 7- Observational and computational head values after verification for the summer season in the unsteady condition (2007-2008)

شکل ۷- مقادیر تراز مشاهداتی و محاسباتی بعد از صحت‌سنجی برای فصل تابستان در شرایط ناماندگار (۱۳۸۷-۱۳۸۶)

به عبارت دیگر اکثر نواحی مدیریتی برداشتی بیش از مقادیر بهینه خود دارند. بر همین اساس با استفاده نوع رفتار هر ناحیه ضرایب $V_{i,C}$ و $V_{i,NC}$ محاسبه شده است. همچنین به منظور اعمال قوانین مدیریتی مقادیر ضریب F_m نیز مطابق روابط (۱۰) و (۱۱) ذکر شده در بخش ۲-۳ تعیین شده است. به کارگیری مدل عامل‌بنیان باعث شده تا با اعمال قوانین مدیریتی و تنش‌های اجتماعی میانگین ماکزیمم تقاضای جدید نواحی مدیریتی ۲۲ درصد کمتر از میانگین مقدار تقاضای اولیه گردد.

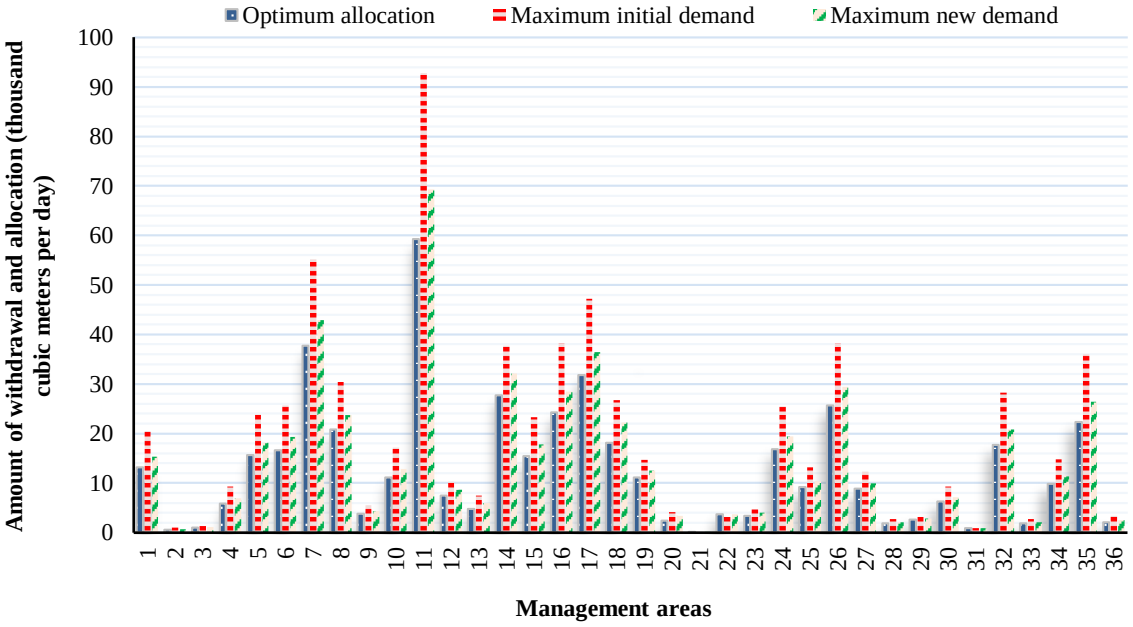

Fig. 8- Comparing the maximum initial demand with the optimal allocation and the maximum new demand for management areas (Spring 2007-2008)

شکل ۸- مقایسه‌ی میزان ماکزیمم تقاضا اولیه با میزان تخصیص بهینه و ماکزیمم تقاضای جدید برای نواحی مدیریتی (بهار سال ۸۷-۸۶)

شکل ۹، میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی به ازای برداشت در حالت‌های مختلف در هر یک از نواحی مدیریتی را نشان می‌دهد. در این شکل، مقادیر منفی تغییرات سطح آب، نشان‌دهنده‌ی افت سطح آب زیرزمینی و مقادیر مثبت، نشان‌دهنده بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی است. استفاده از قوانین مدیریتی و تنش‌های اجتماعی در قالب مدل عامل‌بنیان موجب بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی نسبت به حالت اولیه در نواحی مدیریتی شده است. اعمال سیاست‌های مدیریتی به صورت قوانین تشویقی، جریمه‌ای و آموزشی کمک نموده تا به طور متوسط سطح آب زیرزمینی به اندازه‌ی ۰/۹ متر افزایش یابد. همچنین با توجه به این که نقاط مشاهده‌ای تراز آب زیرزمینی برای هر یک از نواحی مدیریتی متفاوت با چاه‌های بهره‌برداری بوده، اعمال مدل عامل‌بنیان موجب افزایش یا کاهش تغییرات سطح آب نسبت به حالت بهینه شده است. مطابق شکل ۹، اختلاف قابل ملاحظه‌ای در تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقایسه‌ی دو حالت بهینه و عامل‌بنیان مشاهده نشده است. بنابراین، قوانین مدیریتی عامل دولتی، باعث کاهش اختلاف تغییرات سطح آب زیرزمینی میان حالت‌های مدل عامل‌بنیان و بهینه شده است. شکل ۱۰ و شکل ۱۱ تراز سطح آب زیرزمینی را در حالت‌های قبل از اعمال مدل عامل‌بنیان (در حالت ماکزیمم تقاضا اولیه) و بعد از مدل عامل‌بنیان نشان می‌دهد. مطابق این شکل‌ها جهت حرکت جریان آب زیرزمینی از سمت جنوب به شمال و از سمت غرب به شرق است و در نهایت به سمت شمال غربی منتهی می‌شود که این نتایج با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد. همچنین با اعمال مدل عامل‌بنیان تراز آب زیرزمینی در بیشتر قسمت‌ها و به خصوص در نواحی شرقی و شمالی افزایش یافته است.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به منظور مدیریت پایدار آبخوان دشت اردبیل و حل اختلاف میان ذینفعان از ترکیب سه مدل: بهینه‌سازی، شبیه‌سازی آب زیرزمینی و مدل شبیه‌سازی رفتاری عامل‌بنیان استفاده شد. مدل بهینه‌سازی با ارزیابی توابع هدف به ازای مقادیر مختلف تخصیص آب به کشاورزان و همچنین کنترل میزان افت به وسیله لینک شدن به مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، میزان تخصیص بهینه را برای هر یک از نواحی مدیریتی مشخص کرد. سپس، این مقادیر به منظور اعمال فشارهای اجتماعی (فشارهای وارده از طرف دیگر عامل‌ها)، به عنوان ورودی مدل شبیه‌سازی رفتاری مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مدل عامل‌بنیان با اعمال قوانین مدیریتی میزان تقاضای جدید را برای هر یک از نواحی مدیریتی مشخص نمود. مهم‌ترین نتایج حاصل شده عبارت‌اند از:

۱- بر اساس تحلیل حساسیت انجام گرفته برای مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه در برخی نقاط تصحیح گردید که منجر به کاهش میزان اختلاف تراز هیدرولیکی محاسباتی در برابر مشاهداتی شد. به طور کلی با توجه به وسعت آبخوان و همچنین وجود چاه‌های غیر مجاز در محدوده‌ی مطالعاتی میزان خطای به دست آمده برای مدل کالیبره و صحت‌سنجی شده قابل قبول به نظر می‌رسد.

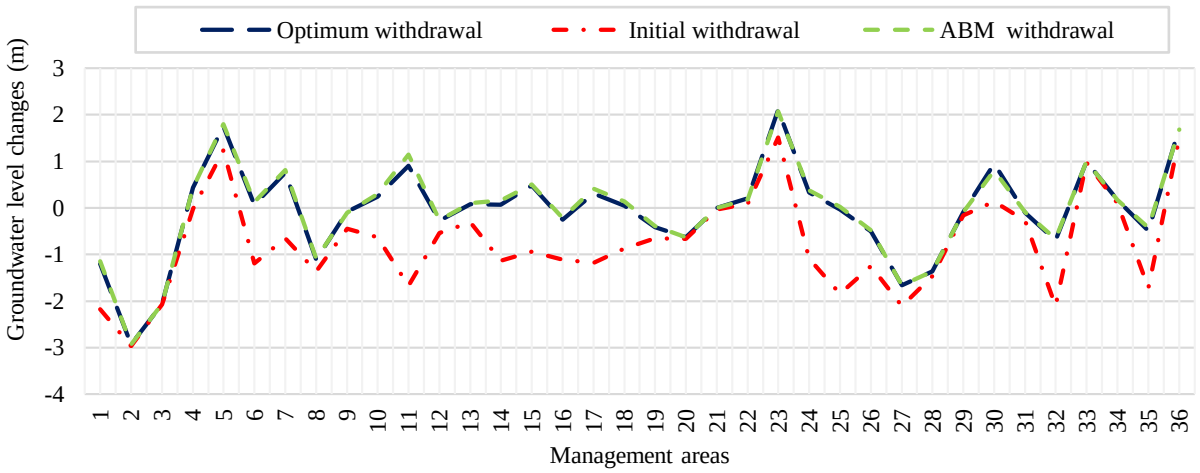

Fig. 9- Groundwater level changes in initial, optimal and ABM withdrawal for Ardabil Aquifer management areas (Spring 2007-2008)

شکل ۹- تغییرات سطح آب زیرزمینی در شرایط برداشت بهینه، برداشت اولیه و برداشت بعد از اعمال مدل عامل‌بنیان برای نواحی مدیریتی آبخوان اردبیل (بهار سال ۸۷-۱۳۸۶)

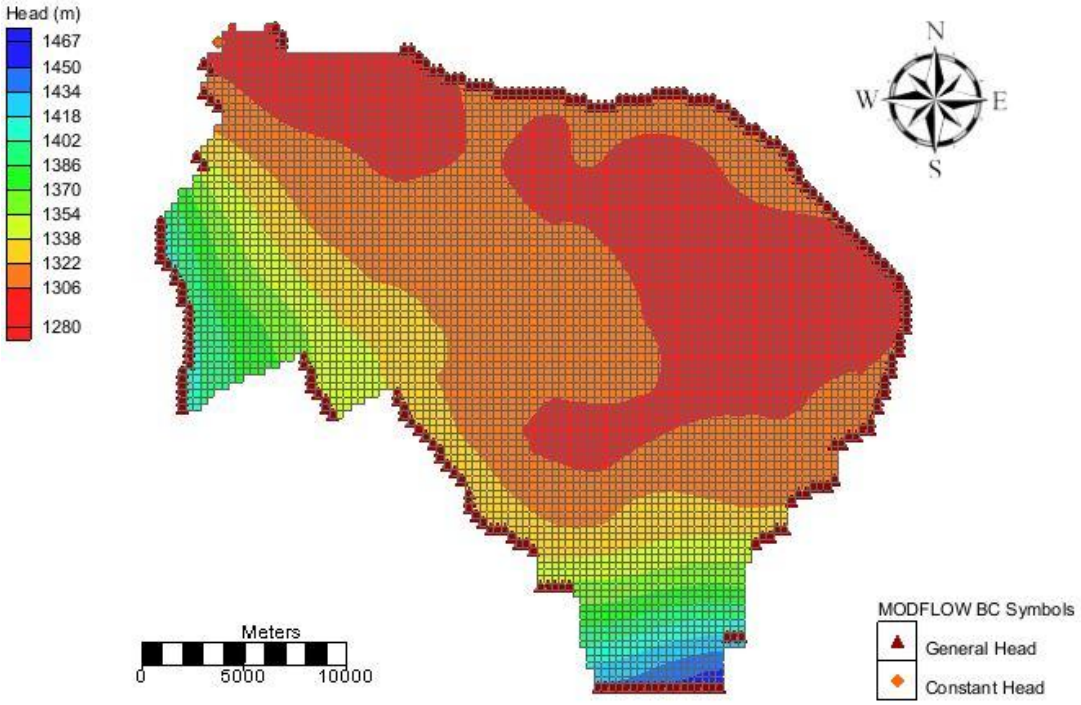

Fig. 10- Ardabil plain groundwater level in initial withdrawal (Spring 2007-2008)

شکل ۱۰- تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل در حالت برداشت اولیه (بهار ۱۳۸۷-۱۳۸۶)

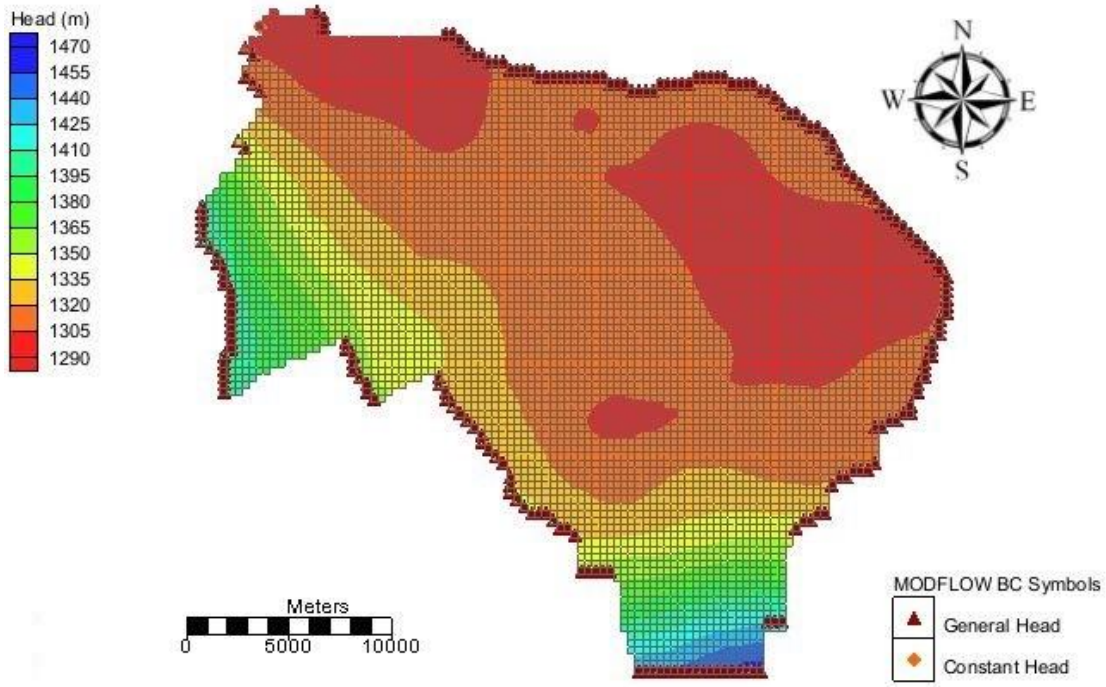

Fig. 11- Ardabil plain groundwater level after applying agent-based model (Spring 2007-2008)

شکل ۱۱- تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل بعد از اعمال مدل عامل‌بنیان (بهار ۱۳۸۷-۱۳۸۶)

۲- بر اساس جواب نهایی انتخاب شده از مدل بهینه‌سازی، متوسط مقدار ماکزیمم تقاضای فعلی ۳۳ درصد بیشتر از مقدار بهینه است. همچنین بر اساس نتایج جدول ۱ کمترین مقدار نرمال شده برای تابع توزیع عادلانه به دست آمده است. این موضوع با توجه به پتانسیل محدود برداشت در نواحی مختلف قابل توجیه است. به عبارت دیگر، با توجه به محدودیت برداشت از نواحی مختلف، امکان تخصیص عادلانه از منابع آب زیرزمینی تا حدی محدود قابل ارائه است. به همین دلیل،

ایجاد عدالت بیشتر نیازمند یک مطالعه یکپارچه از منابع سطحی و زیرزمینی در محدوده‌ی مطالعاتی است.

۳- نتایج حاصل از مدل عامل‌بنیان نشان دهنده‌ی کاهش ۲۲ درصدی ماکزیمم تقاضای عامل‌ها و همچنین بهبود تراز آب زیرزمینی به میزان ۹۰ سانتی متر به طور متوسط برای کل محدوده می‌باشد.

۴- مدل عامل‌بنیان استفاده شده در این تحقیق با در نظر گرفتن قوانین مدیریتی و تأثیرات اجتماعی عملکرد مطلوبی را در یافتن سیاست‌های قابل اجرا برای بهبود تراز آب نشان داد. توابع مدیریتی استفاده شده در این تحقیق نیاز به مطالعات جامعه‌شناسی دقیقی دارد. در همین راستا، به منظور تعیین دقیق‌تر ضرایب پارامترهای مدل عامل‌بنیان نیاز به مصاحبه‌های بیشتر با هر یک از عامل‌ها است. که در ادامه کار این تحقیق می‌تواند در نظر گرفته شود.

۵- با بررسی هیدروگراف دشت اردبیل، بیشترین بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در ماه‌های فروردین تا خرداد صورت می‌گیرد. به همین دلیل در این تحقیق مدل بهینه‌سازی برای فصل بهار اجرا شده است.

۶- معمولاً داده‌های هیدروژئولوژیکی در مطالعات صحرایی محدود است. عدم قطعیت ناشی از کمبود این نوع داده‌ها باعث توزیع غیر منطقی پارامترهای هیدرولیکی از لحاظ زمانی و مکانی می‌شود و از اصلی‌ترین عوامل ایجاد کننده‌ی عدم قطعیت در مدل است. اعمال عدم قطعیت‌های ناشی از این پارامترها مانند: آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی در مدل می‌تواند به عنوان یکی از کارهای آتی مهم این تحقیق در نظر گرفته شود.

۷- در صورت دسترسی به داده‌های به روز، توسعه هر یک از مدل‌ها در مقیاس سالانه برای ادامه کار این مقاله می‌تواند در نظر گرفته شود.

۸- از قابلیت‌های مدل‌سازی عامل‌بنیان می‌توان برای در نظر گرفتن مسائل مختلف اقتصادی، سیاسی، فرهنگی و ارتباط بخش‌های مختلف با هم استفاده کرد. به همین منظور می‌توان از پروتکل استاندارد ODD[11] (Grimm et al., 2006; Grimm et al., 2010) برای توسعه مدل استفاده کرد. این پروتکل یک روش عمومی برای تعریف اجزای مختلف یک مدل عامل‌بنیان به حساب می‌آید.

۹- مدل‌های عامل‌بنیان معمولاً پدیده‌ها را با استفاده از ترکیب پارامترهای مختلف و شرایط اولیه توصیف می‌کنند و توانایی پیش‌بینی رفتارهای آینده سیستم را ندارند. این محدودیت به عنوان یکی از چالش‌های اساسی مدل‌های عامل‌بنیان در کارهای آتی می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان از شرکت آب منطقه‌ای اردبیل، به خصوص از مهندس بابک خیاط رستمی و مهندس ابراهیم مکلف بابت فراهم کردن داده‌های مورد نیاز برای انجام این پژوهش، نهایت سپاس و قدردانی را دارند.

پی‌نوشت‌ها

1- Agent-Based Model (ABM)
2- Complex Adaptive Systems
3- Particle Swarm Optimization (PSO)
4- United States Geological Survey (USGS)
5- Groundwater Modeling System (GMS)
6- Hierarchical Data Format 5 (HDF5)
7- National Center for Supercomputing Applications (NCSA)
8- Compromise Programing (CP)
9- Sociologic Diffusion
10- Root Mean Square Error (RMSE)
11- Overview, Design, and Details (ODD)

۷- مراجع

Aban Pajouh Consulting Engineers (2010) Comprehensive studies and balancing and artificial recharge in Ardabil plain. Technical report, Tehran, 219p (In Persian)

Akhbari M (2012) Models for management of water conflicts: a case study of the San-Joaquin watershed. PhD Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University

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(15):5201-5216

Al-Amin S, Berglund EZ, Larson KL (2015) Agent-based modeling to simulate demand management strategies for shared groundwater resources. World Environmental and Water Resources Congress 2015: Floods, Droughts, and Ecosystems 2067-2072

Ayvaz MT, Karahan H (2008) A simulation/ optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates. Journal of Hydrology 357(1):76-92

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

Becu N, Perez P, Walker A, Barreteau O, Page C.Le (2003) Agent-based simulation of a small catchment water management in northern Thailand. Ecological Modelling 170(2):319-331

DeAngelis DL (2006) A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Ecological Modelling 198(1-2):115-126

Grimm V, Berger U, DeAngelis D, Polhill J, Giske J, Railsback S (2010) The ODD protocol: A review and first update. Ecological Modelling 221(23):2760-2768

Hu Z, Chen Y, Yao L, Wei C, Li C (2016) Optimal allocation of regional water resources: From a perspective of equity–efficiency tradeoff. Resources, Conservation and Recycling 109:102-113

Liu J, Zheng C, Zheng L, Lei Y (2008) Ground water sustainability: Methodology and application to the North China Plain. Ground Water 46(6):897-909

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

McDonald MG, Harbaugh AW (2003) The history of MODFLOW. Journal of Ground Water 41(2):280-283

Mulligan KB, Brown C, Yang Y-CE, Ahlfeld DP (2014) Assessing groundwater policy with coupled economic-groundwater hydrologic modeling. Water Resources Research 50(3):2257-2275

National Center for Supercomputing Applications (access data: September, 2 2016), Available: <https://support.hdfgroup.org>

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

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

Schreinemachers P, Berger T (2011) An agent-based simulation model of human–environment interactions in agricultural systems. Environmental Modelling & Software 26(7):845-859

Singh A, Bürger CM, Cirpka OA (2013) Optimized sustainable groundwater extraction management: general approach and application to the city of Lucknow, India. Water Resources Management 27(12):4349-4368

Sivakumar MVK, Das HP, Brunini O (2005) Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. Climatic Change 70(1):31-72

Cooper PJ, Dimes J, Rao KP, Shapiro B, Shiferaw B, Twomlow S (2008) Coping better with current climatic variability in the rain-fed farming systems of sub-Saharan Africa: An essential first step in adapting to future climate change?. Agriculture, Ecosystems & Environment 126(1):24-35

Darbandsari P, Kerachian R, Malakpour-Estalaki S (2017) An agent-based behavioral simulation model for residential water demand management: The case-study of Tehran, Iran. Simulation Modelling Practice and Theory 78:51-72

Dietz T (2003) The struggle to govern the commons. Science 302(5652):1907-1912

Eberhart R, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, 39-43

Edwards M, Ferrand N, Goreaud F, Huet S (2005) The relevance of aggregating a water consumption model cannot be disconnected from the choice of information available on the resource. Simulation Modelling Practice and Theory 13(4):287-307

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 177:348-358

Filatova T, Polhill JG, van Ewijk S (2016) Regime shifts in coupled socio-environmental systems: review of modelling challenges and approaches. Environmental Modelling & Software 75:333-347

Ghazali M, Honar T, Nikoo M (2018) A hybrid TOPSIS-agent-based framework for reducing the water demand requested by stakeholders with considering the agents' characteristics and optimization of cropping pattern. Agricultural Water Management 199:71-85

Gini C (1921) Measurement of inequality of incomes. The Economic Journal 31(121):124-126

Giuliani M, Castelletti A (2013) Assessing the value of cooperation and information exchange in large water resources systems by agent-based optimization. Water Resources Research 49(7):3912-3926

Gorelick SM (1983) A review of distributed parameter groundwater management modeling methods. Water Resources Research 19(2):305-319

Grimm V, Berger U, Bastiansen F, Eliassen S, Ginot V, Giske J, Goss-Custard J, Grand T, Heinz SK, Huse G, Huth A, Jepsen JU, Jørgensen C, Mooij WM, Müller B, Pe'er G, Piou C, Railsback SF, Robbins AM, Robbins MM, Rossmanith E, Rüger N, Strand E, Souissi S, Stillman RA, Vabø R, Visser U,

Zekri S, Triki C, Al-Maktoumi A, Bazargan-Lari MR (2015) An optimization-simulation approach for groundwater abstraction under recharge uncertainty. Water Resources Management 29(10):3681-3695

Zeleny M (1973) Compromise programming. In: multicriteria decision making. University of South Carolina Press, Columbia, 262-301

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

Sivapalan M, Savenije HHG, Blöschl G (2012) Socio-hydrology: A new science of people and water. Hydrological Processes 26(8):1270-1276

Todd DK, Mays LW (2005) Groundwater hydrology. Third edition, John Wiley & Sons, New York, 656p

Xiao Y, Fang L, Hipel K, Wre H, Asce F (2018) Agent-based modeling approach to investigating the impact of water demand management. Journal of Water Resources Planning and Management 144(3):1-12

Young HP (1999) Diffusion in social networks. Working Paper No 2, Brookings Institution, Washington DC

Zarghami M, Szidarovszky F (2011) Multicriteria analysis: applications to water and environment management. Springer, Berlin, 159p