تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوازدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۴
Volume 12, No. 2, Summer 2016 (IR-WRR)
۱۰۴-۱۱۹

مدیریت تلفیقی منابع آب در محدوده حوضه آبریز دشت یزد-اردکان با تاکید بر پایداری زیست‌محیطی

فاطمه برزگری بنادکوکی[۱*]، حسین ملکی‌نژاد[۲] و سید محمد مهدی حسینی[۳]

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آبی، افزایش روزافزون نیاز به این منابع در همه زمینه‌ها و نیز تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آبی، مدیریت بهینه منابع آب و استفاده کارآمد از آن‌ها امری ضروری است. لازمه دست‌یابی به مدیریت بهینه، استفاده از روش‌های مناسب بهینه‌سازی می‌باشد. در تحقیق حاضر که در محدوده حوضه آبریز دشت یزد-اردکان انجام گرفت، روش‌های مختلف بهینه‌سازی، شامل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک چندهدفه مبتنی بر جواب غیرپست (NSGAII)، مورد استفاده قرار گرفتند. منابع آب، شامل آبخوان زیرزمینی و آب انتقالی به‌صورت تلفیقی در نظر گرفته شد. اهداف مورد نظر عبارت بودند از: حداکثر نمودن سود اقتصادی حاصل از برداشت آب با توجه به حداقل نمودن خسارت کاربران به آبخوان، حداقل نمودن عدم تأمین نیاز کاربران و تعادل بخشی آبخوان. به منظور دسترسی به مقدار ذخیره قابل برداشت آبخوان زیرزمینی از مدل Modflow برای شبیه‌سازی آبخوان استفاده شد و بیلان آب در گام‌های زمانی ماهانه به‌دست آمد. نتایج نشان داد الگوریتم ژنتیک NSGAII، توانایی بیشتری در تخصیص بهینه منابع آب منطقه دارد. در ضمن چنانچه به جای استفاده از ذخیره قابل برداشت هر ماه، از مجموع ذخایر قابل برداشت سالانه سفره استفاده شود، نتایج بهتری به‌دست می‌آید.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، مدیریت منابع آب، Modflow ، پایداری زیست محیطی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۱۲/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۴/۱۱

۱- دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد و مربی دانشکده کشاورزی دانشگاه پیام نور
۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد
۳- استاد دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، بخش ریاضی کاربردی
*- نویسنده مسئول

Conjunctive Water Resources Management with Emphasis on Environmental Sustainability in Yazd-Ardakan Basin

F.Barzegari Banadkooki [1] , H.Malekinezhad[2] and M.M. Hosseini [3]*

Abstract

Due to limitations in water resources, increasing needs in these resources in all aspects as well as the impact of climate changes on these resources, the optimal management of water resources and efficient use of them is an essential task. To achieve this optimal management, appropriate optimization techniques should be utilized. In this paper, a multi objective model is developed for Yazd-Ardakan basin for conjunctive use of ground water and water transferred from outside of the basin. To attain this, optimization approaches including Genetic algorithm (GA) based on penalty function and non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA II) were used. Three objective functions were developed including maximizing economic income obtained from water resources considering qualitative aspects of the aquifer sustainability, minimizing failure in water supply, and balancing aquifer storage. 3-D analysis MODFLOW model served to simulate ground water aquifer. The monthly water budget was extracted using 3-D analysis MODFLOW model. The findings indicated that NSGA II is superior to GA in optimizing water allocation model. On the other hand, using annual renewable ground water storage instead of monthly data resulted in better allocation model performance.

Keywords: Optimization, Genetic Algorithm, Water resources management, MODFLOW, Environmental sustainability.

Received: March 3, 2016
Accepted: July 1, 2016

1- Ph.D. Candidate of Watershed Management, Department of Watershed and Rangeland Engineering, Faculty of Natural Resources, Yazd University and Faculty Member, Department of Agriculture, Payamnoor University, Yazd, Iran. Email: Fa_barzegar@yahoo.com
2- Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran.
3- Professor, Department of Applied Mathematics, Faculty of Mathematics and Computer, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

محدودیت منابع آب در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تهدیدی جدی برای رفاه و توسعه پایدار ناحیه‌ای است. چنین مناطقی با یک موازنه بسیار نامتعادل در زمینه عرضه و تقاضای آب مواجه‌اند. نیاز روز افزون به منابع آب، برنامه‌ریزان را با چالش‌های جدیدی مواجه نموده است. کشاورزی، صنعت و توسعه شهری از جمله گروه‌هایی هستند که به دلیل توسعه رو به رشد باعث افزایش فشار بر این منابع گردیده‌اند (Dogrul et al. 2016).

ادامه روند موجود در بهره‌برداری از منابع آب در بسیاری از مناطق، منجر به نابودی اکوسیستم‌هایی می‌گردد که حاصل قرن‌ها تکامل طبیعی و اجتماعی است. به منظور جلوگیری از چنین بحرانی و نیز ارائه راه‌کارهای مناسب جهت پاسخ‌گویی به نیاز کاربران، مدیریت کارآمد منابع آب ضروری به نظر می‌رسد. مدیریت منابع آب تا قبل از دهه ۱۹۶۰ بیشتر، منحصر به مدیریت مخازن سدها و آب‌های سطحی بوده است. حال آن‌که توجه به منابع آب زیرزمینی به‌عنوان مهمترین رکن تأمین‌کننده نیاز بهره‌بردارن، حائز اهمیت فراوان می‌باشد. به عنوان مثال در محدوده دشت یزد–اردکان، بالغ بر ۸۵٪ نیازها از طریق آبخوان زیرزمینی مرتفع می‌گردد (Yazd Regional Water Organization, 2015). در حالی‌که مساحت فعلی کاربری‌ها، با توجه به آب مصرفی در آنها بهینه نیستند و چنانچه راندمان‌های فعلی مصرف آب در مقادیر آب تخصیصی به کاربری‌ها –به‌خصوص راندمان فعلی آبیاری– لحاظ گردد، مساحت بعضی از کاربری‌ها به‌خصوص بخش کشاورزی تا ۴۰ ٪ کمتر از مساحت‌های موجود این کاربری‌ها کاهش خواهد یافت (Asadi, et al., 2015). آبخوان‌ها به‌عنوان "بانک آب"، دارای قابلیت ذخیره آب در ماه‌های مرطوب و آزادسازی آن در مواقع نیاز می‌باشند (Grachev et al., 2009; Scherberg, et al., 2014). لذا مدیریت تلفیقی منابع آب جهت برآوردن نیاز کاربران با توجه به حفظ توان آبدهی آبخوان می‌تواند گام مهمی در راستای مدیریت بهینه منابع آب باشد. نقطه شروع تفکر مدیریت تلفیقی منابع آب به مطالعه براس در سال ۱۹۶۳ برمی‌گردد. در این مطالعه، به‌منظور تأمین نیاز اراضی کشاورزی، ذخیره آب سطحی (سد) و منبع آب زیرزمینی به‌صورت توأمان، مورد بررسی قرارگرفته است و مدل برنامه‌ریزی پویایی احتمالاتی با گام زمانی سالانه، جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری به‌کار رفته است. افرادی نظیر Aziez (2002); Pulido-Velázquez et al.(2006); Dale et al. (2008); Karamouz et al.(2004); Mohammad Rezapour Tabari et al. (2009, 2012); Latif (1991); Coe (1990); Barlow et al. (2003); Shourian et al. (2008); Chang et al. (2009); Kim and Channg (2008) در مطالعات خود از مدیریت تلفیقی منابع آب زیرزمینی و سطحی بهره برده‌اند. بررسی منابع مذکور، بیان‌گر این واقعیت است که در اغلب این مطالعات، بیشتر به بخش آب‌های سطحی پرداخته شده و دینامیک و نوسانات آب‌های زیرزمینی، با فرضیاتی ساده‌تر درنظرگرفته شده است. به عنوان مثال بیلان یک ساله آب‌های زیرزمینی به‌عنوان پایه محاسبات مورد بررسی قرار گرفته و برای سال‌های مختلف، بیلان مذکور، منظور شده است. دو دلیل عمده برای اعمال این ساده‌سازی در مقوله آب‌های زیرزمینی قابل ذکر می‌باشد.

۱) شرایط ناهمگن لایه‌های آبخوان که باعث می‌شود فعالیت حاکم بر جریان فقط با تکنیک‌های عددی نظیر اجزاء محدود قابل بیان باشد.
۲) بررسی نوسانات آب‌های زیرزمینی و تأثیر آن بر روی مخازن سدها و آب‌های سطحی بار محاسباتی زیادی در بردارد.

در مطالعاتی نظیر آنچه در ادامه ذکر می‌شود، به‌طور مناسب‌تری به این مقوله پرداخته شده است.

Emch and Yeh (1998)، جهت مدیریت تلفیقی آبخوان زیرزمینی و آب‌های سطحی ساحلی، یک مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی با روش اختلاف محدود را با اعمال تکنیک‌های غیرخطی بهینه‌سازی را به‌کارگرفتند. گرچه این مدل‌سازی با موفقیت انجام شد، ولی محققین، بار محاسباتی زیاد، زمان‌بر بودن و مشکل مینیمم‌های محلی را به‌عنوان دشواری‌های این تحقیق گزارش نمودند. Valerio et al. (2010)، در مطالعه‌ای در یکی از حوضه‌های نیومکزیکو، مدل River ware را با مدل Modflow تلفیق نمودند. در مطالعه ایشان، در هرگام زمانی، از تراز آب گام زمانی قبلی برای محاسبه کنش‌های متقابل رودخانه و آب زیرزمینی استفاده گردید. در این مطالعه از تکنیک‌های بهینه‌سازی متداول استفاده نشده و به جای آن از روش سعی و خطای دستی، به منظور دست‌یابی به اهداف مدیریتی بهره گرفتند. Dogrul et al. (2016) ، از برنامه‌ریزی خطی برای حل مسأله مدیریت تلفیقی منابع آب در منطقه‌ای در کالیفرنیا استفاده نمودند. در این تحقیق از یک مدل عددی سه بعدی اجزاء محدود برای شبیه‌سازی آبخوان زیرزمینی استفاده شد. به دلیل این‌که ذخیره سد منطقه از سرریز آب زیرزمینی تأمین می‌شد، آب ورودی سد نیز با مدل سه بعدی مذکور، شبیه‌سازی گردید. محققین استفاده از تکنیک خطی و مدل سه بعدی را رضایت‌بخش گزارش نمودند. Karimi et al. (2014) مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و

زیرزمینی را با تاکید بر کیفیت آب در حوضه آبریز زاینده‌رود مورد بررسی قرار دادند. در پژوهش مذکور، از یک مدل بهینه‌سازی بلند مدت با هدف حداکثرسازی قابلیت اطمینان بهره‌برداری از سیستم استفاده گردید و غلظت املاح محلول به‌عنوان شاخص کیفی منابع آب مورد بررسی قرار گرفت. کاربرد مدل طراحی شده، منجر به بهبود معنی‌دار تأمین آب با کیفیت مطلوب برای کاربری‌های کشاورزی و محیط زیست گردید. Parsapour-Moghaddam et al. (2015) مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی را با استفاده از نظریه بازی‌های تکاملی، جهت تخصیص آب آبیاری مزارع پسته رفسنجان انجام دادند. تخصیص منابع آب در این تحقیق با استفاده از تلفیق الگوریتم ژنتیک و شبیه‌ساز عددی Modflow انجام شد. تابع هدف مورد نظر، حداقل نمودن اختلاف بین بهره‌برداران، در نظر گرفته شد. جهت کاستن بار محاسباتی مدل نیز از روش‌های کاهش هزینه بار محاسباتی استفاده گردید. نتایج کاربرد این روش، رضایت‌بخش گزارش شده است. نوآوری کار حاضر در مقایسه با سایر تحقیقات، دخالت دادن خسارت زیست محیطی حاصل از برداشت منابع آب توسط بهره‌برداران مختلف می‌باشد و علاوه‌بر آن، در شبیه‌سازی سه بعدی آبخوان نیز از مدل عددی Modflow استفاده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل وسعت زیاد منطقه و زیاد بودن تعداد پیزومترهای مطالعاتی (۵۹ پیزومتر)، بار محاسباتی مدل Modflow زیاد بوده و اجرای این مدل زمان‌بر بوده است، لذا از مدل مذکور، به‌صورت جداگانه جهت شبیه‌سازی ذخیره آب زیرزمینی استفاده گردید و نتایج حاصل از این مرحله، جهت فرایند بهینه‌سازی مورد استفاده واقع شد. در تحقیقات قبلی غالباً از مدل‌سازی آب زیرزمینی صرف‌نظر گردیده است. البته در مواردی نیز نظیر تحقیق Dogrul et al. (2016); Parsapour-Moghaddam et al. (2015) و Valerio et al. (2010)، از مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی استفاده گردیده است، منتهی یا اجرای مدل دشوار و زمان‌بر بوده است و یا به‌دلیل کوچک بودن محدوده مطالعاتی، با استفاده از روش‌های کاهش بار محاسباتی، امکان تلفیق مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز فراهم گردیده است. متأسفانه علی‌رغم تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب، در مطالعات پیشین انجام شده در زمینه مدیریت تلفیقی منابع آب، استفاده از رویکرد زیست‌محیطی در مطالعات مدیریت این منابع ، در حد رها سازی آب پایه در رودخانه‌ها یا نگهداشت حداقل ذخیره آب در مخازن سدها به کار رفته است. البته در مواردی نیز به بررسی آلودگی ناشی از پساب بخش کشاورزی به آب‌های سطحی یا زهکش‌های حوضه پرداخته شده است. در واقع، کاربرد عملی این واژه در مدیریت تلفیقی منابع آب، با نگرش همه جانبه به آلودگی‌های منابع آب ناشی از فعالیت بخش‌های مختلف بهره‌برداری شامل صنعت، کشاورزی و شهری، در کمتر مطالعه‌ای دیده شده است. تنها در مطالعه Xuan et al. (2012)، مفهوم مذکور تا حدی وارد تصمیم‌گیری مدیریتی گردیده است. در مطالعه مذکور، خسارت زیست‌محیطی بخش صنعت به‌صورت تابعی از رشد ناخالص این بخش در نظر گرفته شده و به مباحث تعیین میزان پساب و بار آلودگی به تفکیک گروه‌های مختلف صنعتی پرداخته نشده است. در مطالعه انجام شده توسط این محققین، اولویت‌بندی صنایع مختلف در تخصیص منابع آب مشخص نگردیده است. تحقیق حاضر سعی دارد تا از طریق تاکید بر پایداری زیست‌محیطی آبخوان و با درنظرگرفتن خسارت ناشی از پساب گروه‌های مختلف بهره‌بردار از منابع آب، به رویکردی نوین در امر تخصیص منابع آب بپردازد.

۲- مواد و روش‌ها

به منظور انجام این تحقیق، از برنامه‌ریزی تلفیقی در جهت مدیریت منابع آب استفاده شد. لازمه ارائه یک مدیریت مناسب در زمینه منابع آب، کسب اطلاعاتی جامع در مورد وضعیت این منابع و عوامل مؤثر بر تغذیه و تخلیه آن می‌باشد. مواردی نظیر چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های تغذیه، وضعیت سدها، زهکشی، رودخانه‌ها، تیپ و میزان بارش، گروه‌های بهره‌برداری، منافع اقتصادی و اجتماعی حاصل از بهره‌برداری، وضعیت اکولوژیکی منطقه، ضخامت لایه آبده و.. از جمله عوامل مؤثر در شبیه‌سازی وضعیت منابع آب و راه‌گشای مدیران در بهره‌برداری بهینه از این منابع می‌باشد. از آنجایی‌که مهمترین منبع آب موجود در منطقه مورد مطالعه، آبخوان زیرزمینی می‌باشد، لذا شبیه‌سازی مناسب آن و بررسی بیلان آب در گام‌های زمانی ماهانه، لازمه انجام فرآیند تخصیص مناسب منابع آب در این منطقه می‌باشد.

هر مساله بهینه‌سازی، شامل دو بخش مدل‌سازی و برنامه‌ریزی می‌باشد. بخش مدل‌سازی شامل تشکیل تابع هدف و قیودات مربوط، براساس روابط بین متغیرها به‌صورت معادلات و یا نامعادلات است. در بخش برنامه‌ریزی، به منظور تعیین شرایط بهینه در رسیدن به مقدار مطلوب تابع هدف روش جستجو تعیین می‌گردد (Moghadasi et al. 2008).

۲-۱- مدل‌سازی مساله

لازم است ابتدا توابع هدف مسأله بهینه‌سازی و قیود مرتبط با آن تعریف شوند تا مسأله مورد نظر مدل‌سازی گردد.

۲-۱-۱- توابع هدف مساله بهینه‌سازی

مجموعه توابع هدف انتخابی برای مدل‌سازی به ترتیب به شرح زیر می‌باشند.

۱- حداکثر نمودن منفعت اقتصادی حاصل از برداشت آب با توجه به لحاظ نمودن خسارت زیست‌محیطی ناشی از تزریق پساب بهره‌برداران به آبخوان

۲- حداقل نمودن هزینه‌های ناشی از عدم تعیین نیاز کاربران.

۳- موازنه متعادل بین تغذیه و تخلیه آبخوان و به عبارتی احیای آبخوان.

موارد اول و دوم به‌صورت تابع هدف و مورد سوم به‌صورت اعمال محدودیت در قالب قیود به مدل اضافه شدند. در اغلب مطالعات صورت گرفته در زمینه مدیریت بهینه منابع آب، ذخیره منابع آب در گام‌های زمانی ماهانه محاسبه و تخصیص براساس آن انجام شده است. در مواردی که منبع آب سطحی و یا سدهای ذخیره‌ای مدنظر باشند، چنین تفکری به‌جا و مناسب است. ولی مواردی که هدف، بررسی ذخیره آبخوان زیرزمینی می‌باشد، به‌منظور تعادل‌بخشی آبخوان، مجموع نوسانات سطح سفره یا تغییر حجم سفره در طول سال، باید حداقل برابر صفر باشد.لذا می‌توان در مورد این منابع آب، ذخیره سالانه را مدنظر قرار داد و تخصیص‌های ماهانه را براساس مجموع ذخیره سالانه برآورد نمود. اعمال چنین تفکری در مدل برنامه‌ریزی، باعث می‌گردد تا در ماه‌هایی که نیاز آبی زیاد و آورد ماهانه سفره کم است، بتوان استفاده بیشتری از آب نمود و افت حاصل از این برداشت، در ماه‌هایی که آب ورودی به سفره زیاد و مصرف کم است، جبران‌پذیر خواهد بود. در مطالعه حاضر، هر دو حالت یعنی تخصیص ذخیره آبخوان براساس حجم قابل برداشت ماهانه و تخصیص ذخیره آبخوان به‌صورت سالانه مورد بررسی قرارگرفت که به‌ترتیب مدل ماهانه و سالانه نام‌گذاری شده است. به‌منظور برقراری ارتباط بین مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، نتایج بیلان آب ماهانه به‌دست آمده از مدل شبیه‌سازی مادفلو به‌عنوان محدودیت برداشت منابع آب زیرزمینی از طریق معادلات ۳ و ۵ وارد الگوریتم بهینه‌سازی گردید. ساختار مدل بهینه‌سازی ماهانه ارائه شده به شرح زیر می‌باشد:

$$Max\ Z = [\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{n}\beta_{ik}\left(\alpha_{ik}\sum_{j=1}^{J}(S_{ijk} + G_{ijk})\right)^{x_{ik}} + C_{ik}] - \gamma\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=1}^{n}\left|(D_{ijk} - T_{ijk})\right| \quad (۱)$$

$$Min\ F = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K}\left|(D_{ijk} - (S_{ijk} + G_{ijk}))\right| \quad (۲)$$

S.t.:

$$V_{jk1} \le \sum_{i=1}^{n} G_{ijk} \le V_{jk2}\ ,\quad G_{ijk}, S_{ijk} \ge 0,\quad 1 \le j \le J\ , 1 \le k \le K \quad (۳)$$

$$\delta_1 \le \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=1}^{n} S_{ijk} \le \delta_2 \quad (۴)$$

در مدل سالانه، معادله۳ به‌صورت حجم سالانه تغییر یافته و در معادله ۵ ارائه گردیده است، سایر معادلات بدون تغییر می‌باشند.

$$V_{k1} \le \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{J} G_{ijk} \le V_{k2},\quad 1 \le k \le K \quad (۵)$$

در روابط فوق، واحد حجم‌ها میلیون متر مکعب است و متغیرهای ارائه شده در معادلات فوق به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$\gamma\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J}\sum_{i=1}^{n}\left|(D_{ijk} - T_{ijk})\right|$، مقدار جریمه اختصاص داده شده به دلیل عدم برآوردن نیاز کاربران یا تخصیص بیش از اندازه نیاز به میلیارد ریال، i: کاربری مورد نظر، n : تعداد کاربری موجود در منطقه، j: ماه مورد نظر، J: تعداد ماه‌های هر سال J=12، k: منطقه مورد نظر، K: تعداد مناطق موجود در محدوده آبخوان، γ : ضریب جریمه، β ، α ، C_{ik} و x_{ik} ، ضرایب مربوط به معادلات اقتصادی به‌دست آمده، W_{ijk}: مقدار مصرف آب در ماه j در منطقه k توسط بخش i، D_{ijk} :مقدار نیاز بخش i در ماه j در منطقه k، S_{ijk} : مقدار آب انتقالی تخصیص یافته به بخش i در ماه j در منطقه k، G_{ijk} : مقدار آب زیرزمینی تخصیص یافته به بخش i در ماه j در منطقه k، V_{jk1} : حداقل مقدار ذخیره در دسترس آبخوان در ماه j در منطقه k که از مدل مادفلو به دست آمده است. V_{jk2} : حداکثر مقدار ذخیره در دسترس آبخوان در ماه j در منطقه k به دست آمده از مدل Modflow ، δ_1 : حداقل مقدار ذخیره آب انتقالی به حوضه. δ_2 : حداکثر مقدار ذخیره آب انتقالی به حوضه. V_{k1} : حداقل مقدار ذخیره سالانه در دسترس آبخوان در منطقه k به دست آمده از مدل Modflow ، V_{k2} : حداکثر مقدار ذخیره سالانه در دسترس آبخوان در منطقه k که از مدل Modflow به دست آمده است.

در مدل تدوین شده، ابتدا تخصیص‌ها از آب انتقالی شروع می‌شود. در مدل قیدهایی تعریف شده است که تخصیص آب شرب را از آب انتقالی در نظر می‌گیرد و در صورت تأمین آب شرب و مازاد بودن ذخیره آب انتقالی، تخصیص آب انتقالی به صنعت صورت خواهد گرفت. سهم بخش کشاورزی و فضای سبز شهری از آب انتقالی صفر در نظر گرفته شده است.

در مرحله بعد با توجه به تابع سود، نیازها و ذخیره قابل برداشت آبخوان، تخصیص از منابع آب زیرزمینی صورت می‌گیرد.

۲-۱-۲- آماده‌سازی اطلاعات برای مدل‌سازی

به منظور آماده‌سازی اطلاعات لازم برای مدل بهینه‌سازی، ابتدا اطلاعات به سه دسته تقسیم شد.

الف) اطلاعات مربوط به وضعیت آبخوان و آب انتقالی

ب) اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی به تفکیک گروه‌های مختلف مصرف کننده

ج) اطلاعات مربوط به منافع اقتصادی بهره‌برداران مختلف و استخراج تابع اقتصادی با توجه به خسارت پساب تزریقی بهره‌بردارن

الف) اطلاعات مربوط به وضعیت آبخوان و آب انتقالی

اطلاعات مربوط به آب انتقالی

اطلاعات مربوط به این بخش، از داده‌های شرکت سهامی آب منطقه‌ای یزد به‌دست آمد. اطلاعات مربوط به این بخش به‌صورت ماهانه از اولین سال شروع بهره‌برداری از آب انتقالی، مرتب گردید.

مدل‌سازی آبخوان زیرزمینی

در این مطالعه به منظور بررسی وضعیت بیلان آب و توان آبدهی آبخوان، از مدل Modflow در قالب نرم‌افزار GMS 8.3 استفاده گردید. گام اول در شبیه‌سازی سه بعدی آبخوان، تفکیک مرز مدل می‌باشد. جهت انجام این تفکیک، عوامل و معیارهای هیدرولوژیکی زیادی در نظر گرفته شد. به این صورت که ابتدا حدود کوه و دشت نقشه‌های توپوگرافی، واحدهای سازنده نقشه‌های زمین شناسی، حفاری‌های اکتشافی، موقعیت چاه‌های بهره‌برداری، موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای، عامل شیب سطح زمین و شیب سنگ کف، مشخص گردید. سپس با استفاده از عوامل یاد شده، مرزهای متعددی تشکیل و هر بار هندسه آبخوان و رفتار هیدروژئولوژیکی آن مورد بررسی قرار گرفت تا در نهایت مرز مدلی که پاسخ‌گوی نیاز اصلی مدل و منطبق بر آبخوان اصلی باشد تفکیک شد. سپس با استفاده از لایه‌های مرز آبخوان، چاه‌های بهره‌برداری، چاه‌های مشاهده‌ای، قنات‌ها، چاه‌های شرب، چاه‌های جذبی، ضریب هدایت هیدرولیکی و تغذیه سطحی، مدل مفهومی آبخوان زیرزمینی در محیط GMS 8.3 ساخته شد. براساس بررسی‌های انجام شده، ۵۹ حلقه چاه مشاهده‌ای در محدوده مدل قرار گرفت که بعد از صحت‌سنجی آماری، از داده‌های آن‌ها در مدل‌سازی استفاده شد. شرایط مرزی نیز پس از آزمون شرایط مختلف، به صورت شرایط مرزی با حجم‌مشخص به مدل معرفی گردید. پس از ساخت مدل مفهومی و تعیین شرایط مرزی، ساخت شبکه انجام شد. بدین منظور، ابتدا شبکه‌های مختلف مورد آزمون قرار گرفت و در نهایت شبکه‌ای با تعداد سلول‌های ۱۰۰*۱۰۰ انتخاب گردید. سپس مدل برای حالت پایدار که براساس وضعیت داده‌های موجود، مهرماه ۱۳۸۸ در نظر گرفته شد، اجرا گردید. پس از اجرای مدل در حالت پایدار، جهت مینیمم کردن اختلاف تراز آب محاسباتی و مشاهده‌ای نیاز به واسنجی پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی می‌باشد. در این پروژه ابتدا شرایط مرزی مدل با بار ثابت و مشخص یا حجم مشخص و با بسته Well به‌صورت دستی و آزمون خطا واسنجی شد و در ادامه پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی، تغذیه سطحی به‌صورت اتومات و به کمک نرم‌افزار PEST که به مدل GMS اضافه شده است، واسنجی گردید. جهت انجام واسنجی از روش اتوماتیک PEST مبتنی بر روابط ریاضی (Gauss-Marquardt-Levenberg) به‌صورت پلیگونی و نقاط آزمایشی استفاده شد و در نهایت نتایج حاصل از واسنجی مدل با معیار خطای RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. برای اطمینان از صحت واسنجی، مدل برای یک دوره‌ای غیر از دوره واسنجی اجرا شد. به این‌منظور، دوره مهرماه ۱۳۹۱ جهت صحت‌سنجی استفاده شده است و اختلاف کم ترازهای محاسباتی و مشاهداتی صحت مدل را تأیید می‌نماید.

پس از اجرا و واسنجی و صحت‌سنجی مدل پایدار، جهت سنجش وضعیت آبخوان و بررسی نوسانات تراز آب زیرزمینی در حالت ناپایدار، یک دوره ۱۰ ساله از ابتدای سال آبی ۱۳۸۰ (مهرماه) تا شهریور سال ۱۳۹۰ انتخاب گردید و برای هر سال ۱۲ گام زمانی (ماهانه) تعریف گردید.

داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای دشت در طول این بازه زمانی، تهیه و وارد مدل گردید. سپس با تنظیم دوره تنش و ورود داده‌های سری زمانی تراز چاه‌های مشاهده‌ای، چاه‌های بهره‌برداری و سایر داده‌های مورد نیاز مانند آبدهی ویژه و تغذیه سطحی مدل اجرا گردید. نتایج اجرای مدل در حالت ناپایدار مناسب و قابل قبول بود. پارامترهای تغذیه سطحی و مقدار آبدهی ویژه در حالت ناپایدار به روش PEST پلیگونی مورد واسنجی واقع شدند. بعد از واسنجی مدل، بیلان آب در گام‌های زمانی ماهانه برای منطقه مورد نظر و دوره تعریف شده، استخراج گردید. پس از اطمینان از عملکرد مناسب مدل، بیلان آب در گام‌های زمانی مربوط به دهه ۱۳۸۰ استخراج گردید و مجموع مقادیر مربوط به ورودی‌های آبخوان به‌عنوان ذخیره قابل برداشت در نظر گرفته شد.

ب) اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی به تفکیک گروه‌های مختلف مصرف کننده

برای محاسبه میزان آب برداشت شده توسط گروه‌های مختلف، ابتدا چهار کاربری کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت و فضای سبز، تفکیک و سپس برای هرکدام از گروه‌های مذکور، میزان آب مصرفی محاسبه گردید. برای بخش‌های کشاورزی و صنعت، میزان آب مصرفی بر اساس میزان تولید و آب مورد نیاز برای هر واحد تولید به‌دست آمد. برای شرب و بهداشت نیز از آمار ارائه شده توسط سازمان آب و فاضلاب استان یزد استفاده گردید. برای محاسبه آب مورد نیاز فضای سبز از ترکیب کشت، تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع و روش آبیاری، نیاز آبی این بخش استخراج شد و مبنای محاسبات قرار گرفت.

ج) اطلاعات مربوط به منافع اقتصادی بهره‌برداران مختلف و استخراج تابع اقتصادی با توجه به خسارت پساب تزریقی بهره‌برداران

در این مرحله، ارزش افزوده گزارش شده از بخش‌های مختلف، برای دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۸۰ با استفاده از آمارنامه‌های استانی استخراج گردید. سپس با در نظر گرفتن مقدار خسارت حاصل از پساب تولیدی هر بخش به آبخوان این ارقام تعدیل شد. در نهایت، مقدار آب مصرفی و مقدار ارزش‌افزوده تعدیل شده هر بخش به صورت منطقه‌ای به تفکیک شهرستان‌ها بررسی شد و مدل اقتصادی مناسب استخراج گردید. سپس با احتساب گروه‌های مختلف بهره‌بردار و زیرگروه‌های مهم صنعتی، مقدار پساب تزریقی به آبخوان محاسبه و با توجه به بار آلایندگی پساب، هزینه لازم برای تصفیه آن، به‌عنوان خسارت گروه بهره‌بردار به آبخوان در نظر گرفته شد. با کسر نمودن خسارت پساب تزریقی به آبخوان از منفعت اقتصادی گروه بهره‌بردار، تابع اقتصادی تعدیل شده، به‌عنوان اولین تابع هدف مسأله بهینه‌سازی، به‌دست آمد.

۲-۲- انتخاب روش بهینه‌سازی

به منظور مدیریت بهره‌برداری تلفیقی، محدوده مورد تحقیق به چهار منطقه (شهرستان) تقسیم شد و با استفاده از اطلاعات مربوط به آب انتقالی، نیازهای کشاورزی، شرب و بهداشت، صنعت و فضای سبز هر شهرستان، اقدام به مدل‌سازی منطقه و بهینه‌سازی مدیریت منابع آب گردید. در این تحقیق با توجه به تعداد زیاد متغیرها و زمان‌بر بودن اجرای مدل‌سازی بهینه‌سازی و نیز با توجه به توابع هدف غیرهموار، از الگوریتم ژنتیک به منظور تعیین مقادیر بهینه تخصیص استفاده گردید.

روش الگوریتم ژنتیک (GA)

روش الگوریتم ژنتیک (GA) در زمره روش‌های برنامه‌ریزی کاوشی به‌شمار می‌آید. روش‌های برنامه‌ریزی کاوشی اغلب الهام گرفته از طبیعت هستند که برای حل مسائل رشته‌های مختلف علوم، از اواسط دهه ۱۹۷۰ مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند (Goldberg, 1989; Holland, 1975; Regulwar and Anand Raj, 2008; Saber Chenari et al., 2013). الگوریتم ژنتیک از طریق فرایندی شبیه به "روش‌های انتخاب طبیعی" به حل مسائل بهینه‌سازی می‌پردازد (Goldberg, 1989).

الگوریتم مذکور در دهه ۱۹۹۰، به‌عنوان یکی از مهمترین ابزارهای جستجو و بهینه‌سازی در زمینه علوم بازرگانی، مهندسی و علوم طبیعی به‌کار گرفته شده است (Deb et al. 2001). روش کار این الگوریتم به این ترتیب است که ابتدا یک نسل تصادفی تولید می‌گردد، سپس با اعمال عملگر انتخاب، نسل انتخاب می‌شود. در ادامه با مشخص بودن پارامترهایی نظیر احتمال ترویج و جهش، تولید نسل‌ها ادامه می‌یابد. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد سعی‌ها به پایان برسد یا این‌که تابع هدف برای چندین نسل متوالی تغییری نداشته باشد.

در تحقیق حاضر تابع هدف اقتصادی به‌عنوان تابع هدف الگوریتم ژنتیک معمولی برگزیده شده است. تابع هدف دوم یعنی حداقل نمودن هزینه‌های ناشی از عدم تعیین نیاز کاربران، به عنوان جریمه به تابع هدف اصلی اضافه گردید و هدف سوم یعنی تعادل‌بخشی (احیای) آبخوان در قالب اعمال محدودیت تعریف شد. سپس به منظور انتخاب جمعیت نسل اولیه و تعداد تکرار مناسب، آنالیز حساسیت بر روی مدل‌های مختلف انجام شد و در نهایت پارامترهای مذکور استخراج گردید.

الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست (NASGAII)

روش‌های مختلفی به منظور حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های محدودیت، وزن‌دهی، روش‌های آرمانی و الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه اشاره نمود. از بین مدل‌های نام برده شده، الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه، توانایی بالایی در حل مسائل پیچیده دارند. الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست جزء الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه می‌باشد که در سال ۲۰۰۰ توسط دب و همکاران پیشنهاد گردید. در تحقیق حاضر اهداف

اقتصادی و برآوردن نیاز کاربران به‌عنوان هدف‌های برگزیده به الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست معرفی گردید و هدف سوم یعنی تعادل‌بخشی آبخوان در قالب محدودیت مدل‌سازی شد. مانند روش GA، در این روش نیز، به منظور دست‌یابی به الگوریتم بهینه، جمعیت نسل اولیه و تعداد تکرار مناسب، از طریق آنالیز حساسیت به‌دست آمد.

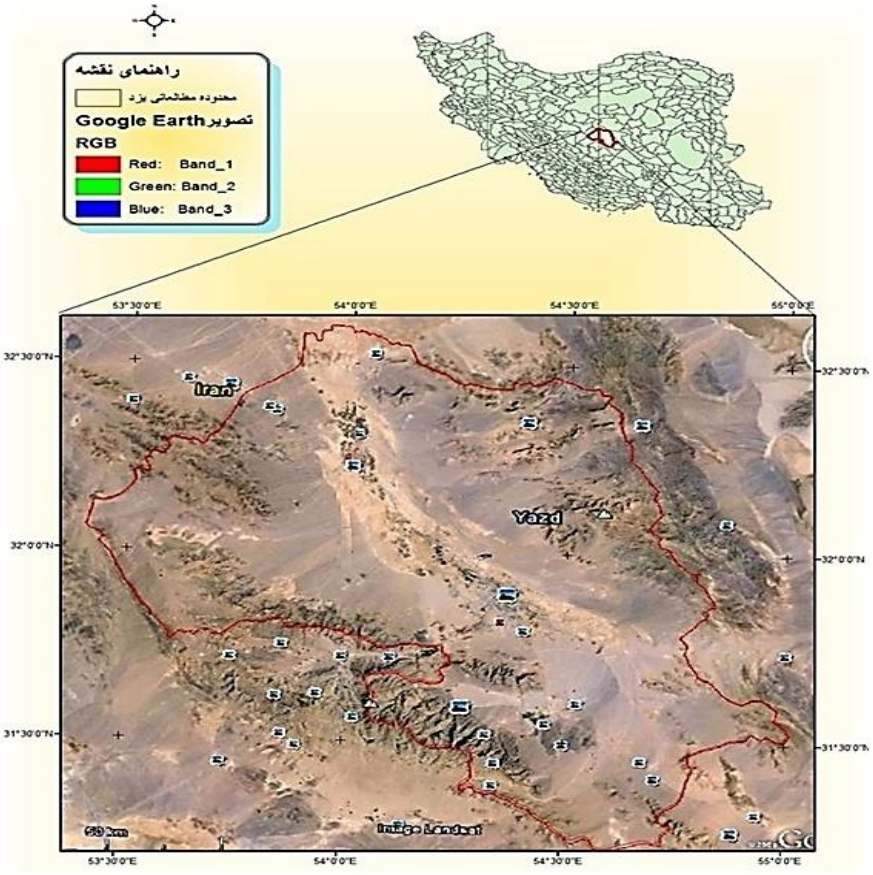
متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده در مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری تلفیقی عبارتند از: میزان آب تخصیص یافته از منابع آب زیرزمینی و آب انتقالی به مصارف چهارگانه شرب و بهداشت، صنعت، کشاورزی و فضای سبز. در مجموع تعداد متغیرهای تصمیم برای هرماه از سال برابر با ۳۲ متغیر است که مربوط به چهار شهرستان می‌باشد. به عبارتی در هر منطقه ۸ متغیر تصمیم داریم که چهار متغیر آن مربوط به تخصیص از آبهای سطحی و چهار متغیر مربوط به تخصیص از آب زیرزمینی می‌باشد. برای یک دوره ده ساله، تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر با 32*12*10=3840 خواهد بود. مقادیر آب قابل بهره‌برداری (ذخایر قابل برداشت سفره به‌طوری‌که آبخوان، بیلان منفی نداشته باشد)، از مدل Modflow در گام‌های زمانی ماهانه و سالانه استخراج گردید. این مقادیر در قالب محدودیت وارد مدل بهینه‌سازی گردیدند. به‌این ترتیب مدل شبیه‌ساری و بهینه‌سازی به صورت تلفیقی مورد کاربرد قرار گرفتند.

۲-۳- محدوده مورد مطالعه

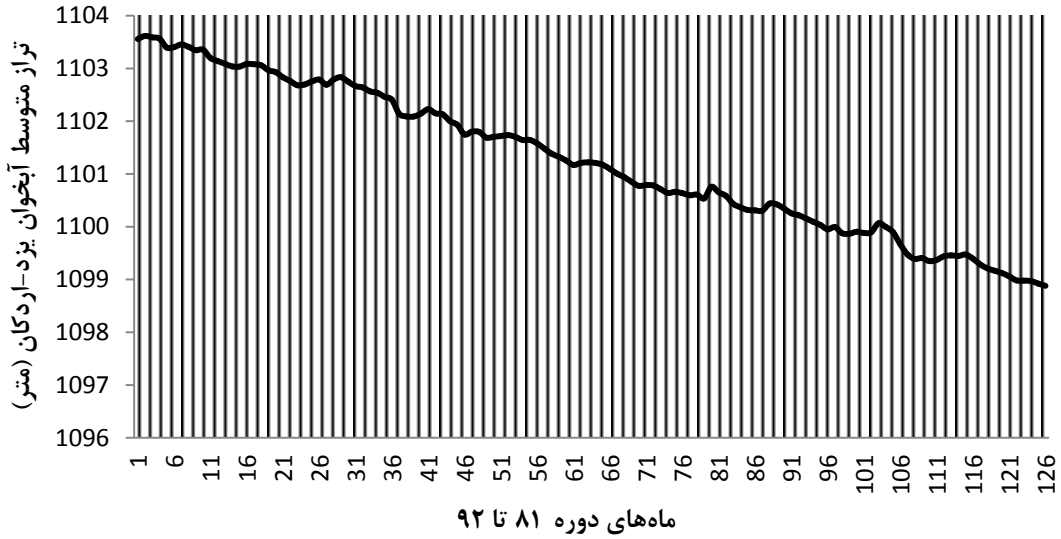
در تحقیق حاضر محدوده حوضه آبریز دشت یزد-اردکان با توجه به وضعیت بحرانی منابع آب و وجود حساسیت‌های اجتماعی، سیاسی و منطقه‌ای به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل۱). افزایش جمعیت چه از نظر موالید و چه از نظر مهاجران، توسعه صنعتی چشمگیر و اقلیم خشک از جمله عواملی است که باعث افت قابل توجه آبخوان این محدوده گردیده است به طوری‌که بررسی هیدروگراف واحد آبخوان بیانگر برداشت بیش از توان از آبهای زیرزمینی افت سالانه ۰/۵۸ متر می‌باشد (شکل ۲).

۳- نتایج و تحلیل نتایج

آماده‌سازی اطلاعات لازم برای مدل بهینه‌سازی، در چند مرحله انجام شد و نتایج مربوط به آن به همین ترتیب ارائه می‌گردد.



شکل۱- منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- هیدروگراف واحد آبخوان یزد-اردکان

۳-۱- مدل‌سازی آبخوان زیرزمینی

در این تحقیق، به منظور بررسی وضعیت بیلان آب و توان آبدهی آبخوان، از مدل Modflow در قالب نرم‌افزار GMS 8.3 استفاده گردید. گام اول در شبیه‌سازی سه بعدی آبخوان، تفکیک مرز مدل می‌باشد که براساس‌عوامل و معیارهای هیدرولوژیکی مختلف، مرزهای متعددی تشکیل و مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت مرز مدلی که منطبق بر آبخوان اصلی باشد تفکیک گردید. سپس مدل مفهومی ساخته شد و با تعیین شرایط مرزی، ساخت شبکه مدل نیز انجام پذیرفت. در این مرحله نیز، ابتدا شبکه‌های مختلف مورد آزمون قرارگرفت و در نهایت شبکه‌ای با تعداد سلول‌های ۱۰۰*۱۰۰ انتخاب گردید.

سپس مدل برای حالت پایدار اجرا گردید. پس از اجرای مدل در حالت پایدار، اقدام به واسنجی مدل پایدار گردید. در این قسمت روش اتوماتیک PEST به صورت پلیگونی و نقاط آزمایشی در کنار روش دستی آزمون و خطا استفاده شد. در نهایت روش برتر با استفاده از آماره RMSE برگزیده گردید. نتایج حاصل از این مرحله در جدول ۱ آمده است.

براساس نتایج جدول ۱، بهترین روش در واسنجی مدل پایدار آبخوان زیرزمینی، روش واسنجی دستی با روش آزمون و خطا (دستی) می‌باشد، که از نظر آماره RMSE، نسبت به سایر روش‌ها دارای مقدار خطای کمتری است، ولی با توجه به سرعت مناسب روش پلیگونی و دقت قابل قبول آن، از این روش برای واسنجی مدل عددی آبخوان، استفاده گردید.

جدول ۱- گزینش مدل مناسب برای واسنجی مدل پایدار

نام روش	RMSE
PEST همرا با نقاط آزمایشی	۸/۰۲۸
PEST پلیگونی	۴/۶۶۴
روش دستی	۳/۶۵۷

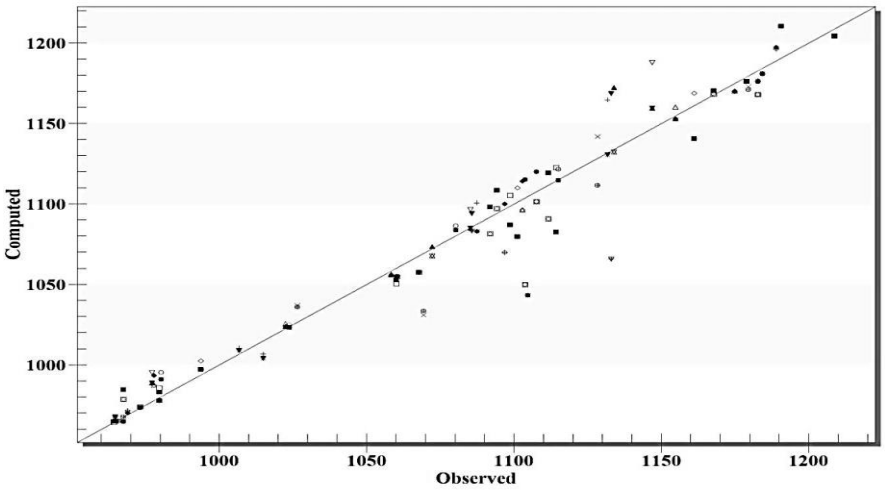
پس از انتخاب روش مناسب جهت واسنجی مدل پایدار، مدل مذکور مورد واسنجی قرار گرفت. برای اطمینان از صحت واسنجی، با استفاده از داده‌های مهرماه ۱۳۹۱ مدل پایدار واسنجی شده، صحت‌سنجی شد. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل پایدار آبخوان، در شکل‌های۳ و ۴ ارائه گردیده است.

شکل ۳ بیانگر توانایی مدل پایدار واسنجی شده در شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی می‌باشد. در شکل مذکور، ترازهای اندازه‌گیری شده مربوط به چاه‌های مشاهداتی در مقابل ترازهای برآورد شده توسط مدل پایدار Modflow قرارگرفته است. با توجه به این‌که پراکنش داده‌های پلات شده، اطراف خط نیم‌ساز صفحه تقاطع محورها می‌باشد، لذا داده‌های محاسباتی مدل و داده‌های مشاهداتی دارای هم‌پوشانی مناسبی می‌باشند.

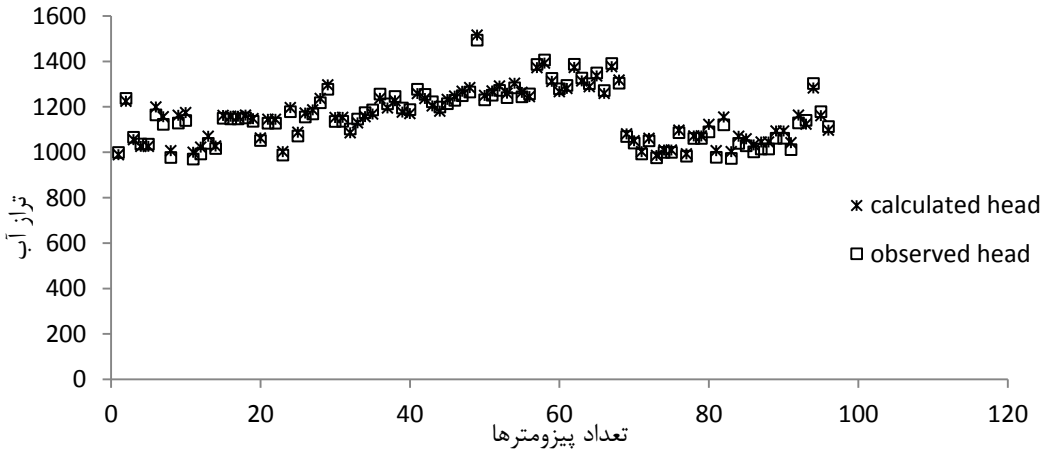
براساس شکل ۴ که دربرگیرنده نتایج صحت‌سنجی مدل پایدار واسنجی شده می‌باشد، صحت نتایج شبیه‌سازی آبخوان زیرزمینی یزد–اردکان توسط مدل مذکور تأیید می‌گردد.

مانند آنچه در روند شبیه‌سازی حالت پایدار آبخوان گفته شد، در شبیه‌سازی حالت ناپایدار هم نیاز به واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد. به‌دلیل نتایج مناسب حاصل از کاربرد روش پلیگونی در واسنجی مدل پایدار، در مورد حالت ناپایدار نیز از روش مذکور، جهت واسنجی استفاده گردید. مدل ناپایدار ساخته شده، ابتدا برای یک دوره ۵ ساله (۱۳۸۵ تا ۱۳۹۰) با استفاده از روش پلیگونی، واسنجی گردید. نتایج حاصل از کاربرد مدل ناپایدار واسنجی شده در پیش‌بینی تراز ارتفاعی سطح هیدرولیکی آبخوان، در شکل ۵ ارائه گردیده است.

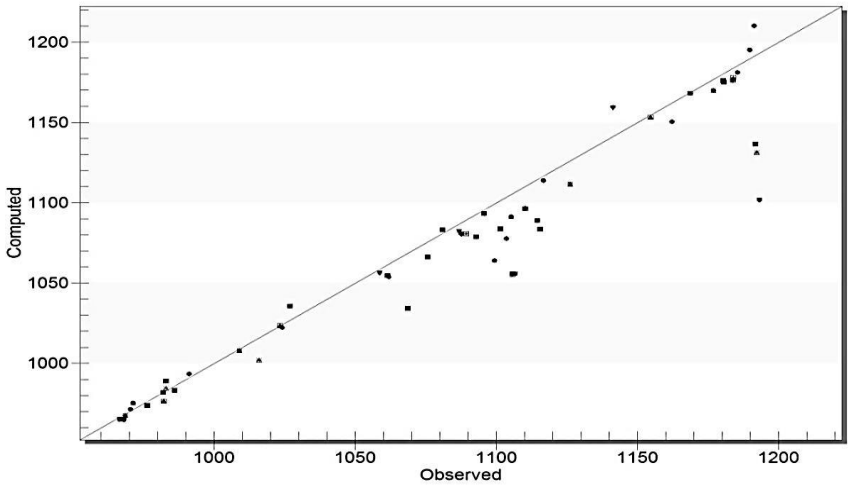
پس از ساخت مدل و واسنجی مدل در حالت ناپایدار، مدل مذکور برای یک دوره ۵ ساله دیگر (۱۳۸۰ تا ۱۳۸۵) مورد صحت‌سنجی قرارگرفت. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل ناپایدار در شکل۶ آمده است. چنانچه از شکل ۶ مشخص است، بین تراز آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل ناپایدار واسنجی شده اختلاف ناچیزی وجود دارد و لذا مدل ناپایدار در شبیه‌سازی آبخوان زیرزمینی یزد–اردکان موفق بوده و نتایج حاصل از آن در سطح ۹۵٪ قابل اعتماد می‌باشند. توانایی این مدل قبلا در مطالعات افرادی نظیر Jyrkama et al., 2002; Scibek and Allen, 2006; Kim et al., 2008; Chang et al., 2009; Zhang and Hiscock, 2010; Wang et al., 2015 تأیید گردیده است.



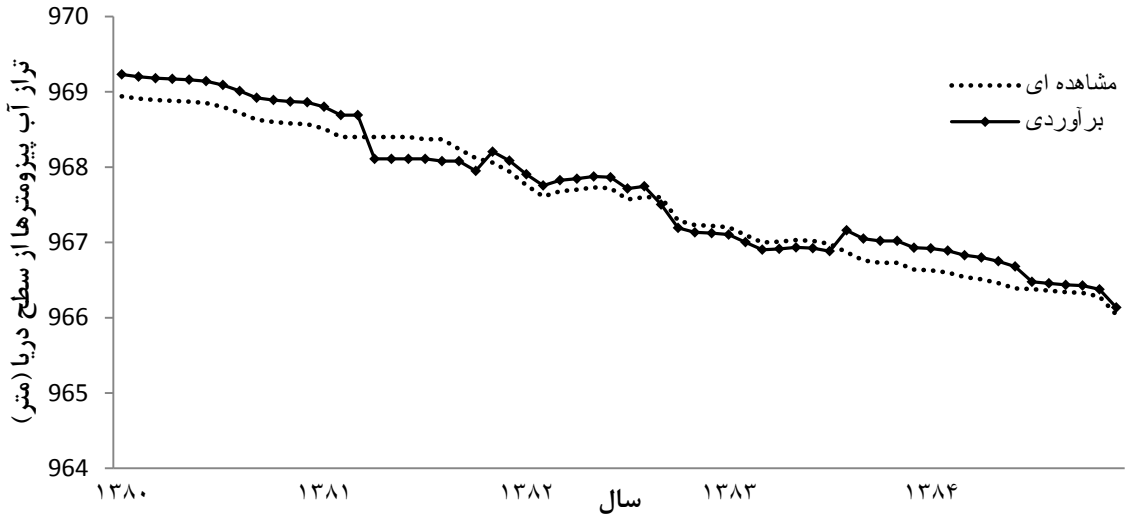
شکل ۳- نتایج حاصل از واسنجی مدل پایدار



شکل ۴- نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل پایدار واسنجی شده مربوط به مهرماه ۱۳۹۱



شکل ۵- نتایج حاصل از واسنجی مدل ناپایدار برای دوره مطالعاتی (۱۳۹۰-۱۳۸۵)



شکل۶- نتایج صحت‌سنجی مدل ناپایدار آبخوان یزد- اردکان

لذا از مدل مذکور در محاسبه ذخیره قابل برداشت آبخوان در گام‌های زمانی ماهانه در دوره ۱۳۹۰-۱۳۸۰ استفاده گردید. مرحله بعد، بیلان آب برای گام‌های زمانی سالانه و ماهانه در مناطق‌مختلف به دست آمد. نمونه‌ای از این اطلاعات به‌صورت سالانه در جدول ۲ ارائه گردیده است.

۳-۲- اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی به تفکیک گروه‌های مختلف مصرف کننده

برای محاسبه میزان آب برداشت شده توسط گروه‌های مختلف، ابتدا چهار کاربری کشاورزی، صنعت، شرب و بهداشت و فضای سبز تفکیک و سپس برای هرکدام از گروه‌های مذکور، میزان آب مصرفی محاسبه گردید. جدول ۳ در برگیرنده اطلاعات سهم آب مصرفی کاربری‌های مختلف هر شهرستان از منابع آب انتقالی و زیرزمینی براساس اطلاعات سال ۱۳۹۰ می‌باشد.

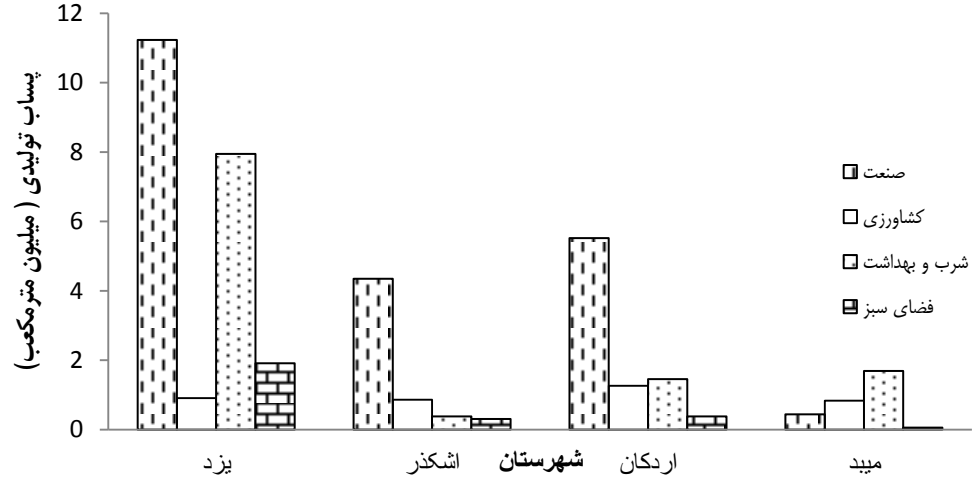
براساس اطلاعات مندرج در جدول ۳، بخش‌های کشاورزی و صنعت به‌ترتیب مهمترین برداشت‌کنندگان آب آبخوان می‌باشند. در مورد آب انتقالی نیز، صنعت سهم مهمی در استفاده از این منبع دارد (در حالی‌که با توجه به وضعیت پساب‌های جذبی صنعت و شرب شهری و احتمال ورود مواد آلاینده به آبخوان، کل نیاز شرب منطقه باید از منبع آب انتقالی، تأمین گردد. از مقایسه آب مصرفی بخش صنعت در شهرستان‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت شهرستان‌های یزد و اردکان دارای صنایع پرآب‌خواه می‌باشند.

جدول ۲- بیلان آبخوان دشت یزد- اردکان در سال آبی ۱۳۹۲-۱۳۹۱

ورودی‌ها		خروجی‌ها	
مؤلفه‌های بیلان	میلیون متر مکعب	مؤلفه‌های بیلان	میلیون متر مکعب
ورودی زیر زمینی به آبخوان	۱۹۹/۶۹۶	خروجی زیر زمینی از آبخوان	۱۵/۷۴۲
نفوذ حاصل از بارندگی	۰/۰	برداشت چاه‌های بهره‌برداری کشاورزی	۲۳۹/۶۳۷
آب برگشتی کشاورزی به آبخوان	۲۰/۸۹۸	تخلیه از قنوات در محدوده آبخوان	۷/۰۰
آب برگشتی مصارف غیرکشاورزی به آبخوان	۳۸/۴۴۷	برداشت از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق (برای مصارف غیر کشاورزی)	۵۱/۹۲
تغییر حجم ذخیره	۵۶/۸۵۴	تبخیر و تعرق تاغ	۱/۶۱۴
مجموع ورودی‌ها با احتساب تغییرات حجم مخزن	۳۱۵/۸۹۵	مجموع خروجی‌ها	۳۱۵/۹۱۳

جدول ۳- نتایج حاصل از برآورد نیاز و سهم گروه‌های مختلف بهره‌برداری به تفکیک شهرستان، از منابع آب انتقالی و زیرزمینی در سال ۱۳۹۰

نام شهرستان	آب زیرزمینی (٪)				آب انتقالی(٪)			
	کشاورزی	صنعت	شرب	فضای سبز	کشاورزی	صنعت	شرب	فضای سبز
اردکان	۲۲/۴۴	۶/۵	۰/۲	۰/۷۳۵	–	۵/۷۷۱	۲/۹۰۴	–
میبد	۱۴/۸	۰/۸۱۶	۰/۵۶	۰/۱۱	–	۲/۴۰۵	۲/۲۸	–
یزد	۱۶/۱۱	۱۳/۳۵	۲/۳۲۶	۳/۶۷۶	–	۱۵/۲۹	۲۱/۷۹	–
اشکذر	۱۵/۲۹	۲/۱	۰/۲۷	۰/۵۸۸	–	۵/۱	۰/۲۶	–



شکل ۷- نتایج حاصل از بررسی پساب بخش‌های مختلف مصرف کننده آب به تفکیک شهرستان

۳-۳- پساب گروه‌های مختلف مصرف کننده

اطلاعات حاصل از پساب بخش‌های مختلف مصرف کننده آب، براساس اطلاعات آب منطقه‌ای و نظرات کارشناسان کشاورزی، صنایع و معادن، به تفکیک مناطق مورد بررسی در شکل۷ ارائه شده است.

براساس شکل ۷ می‌توان گفت، بخش صنعت و شرب و بهداشت شهرستان یزد در رتبه‌های نخست تولید پساب قرار دارند و بعد از آنها، بخش صنعتی اردکان قرار می‌گیرد. باتوجه به این نکته که علی‌رغم تجهیز شهرک‌های صنعتی به شبکه فاضلاب، عمده کارخانجات موجود از سیستم چاه جذبی استفاده می‌نمایند

(Hamshahri newspaper, 2012)، مشکل پساب تولیدی قابل توجه در شهرک‌های صنعتی پرمصرف از نظر آب (اردکان و یزد)، مسأله‌ای دور از انتظار نمی‌باشد. در مورد بخش شرب و بهداشت نیز، به‌دلیل عدم وجود سیستم جمع‌آوری فاضلاب توسعه یافته، عمده پساب بخش مذکور نیز از طریق سیستم جذبی وارد آبخوان می‌گردد.

۳-۴- تابع اقتصادی مصرف آب

نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین مصرف آب و میزان ارزش افزوده مربوط به دهه ۱۳۸۰، به تفکیک شهرستان و گروه‌های مختلف مصرف در جدول ۴ آمده است. اطلاعات مربوط به این بخش از سازمان جهاد کشاورزی، صنایع و معادن، شرکت سهامی آب منطقه‌ای و شرکت آب و فاضلاب استان یزد، به دست آمده است. لازم به ذکر است که سود بخش فضای سبز و شرب و بهداشت صفر در نظر گرفته شده است.

بررسی نتایج حاصل از برآورد تابع اقتصادی مصرف آب (جدول ۴) نشان می‌دهد، صنایع مستقر در یزد، اردکان و اشکذر) به دلیل مصرف زیاد آب و نیز تولید پساب قابل توجه و خسارت به سلامت آبخوان، دارای سود اقتصادی چندانی نمی‌باشد. در حالی‌که سایر صنایع (صنایع مستقر در میبد) و نیز بخش کشاورزی دارای سوددهی مناسبی هستند.

اطلاعات مربوط به مقایسه ارزش نسبی آب مصرفی به ارزش افزوده بخش صنعت و کشاورزی به تفکیک شهرستان در جدول ۵ آمده است. بر اساس نتایج جدول ۵ نیز واضح است که در حالت عادی (بدون در نظر گرفتن خسارت پساب صنعت به آبخوان) صنایع دارای سوددهی بیشتری نسبت به کشاورزی می‌باشند ولی درصورت در نظر گرفتن خسارت‌های زیست‌محیطی، بخش کشاورزی نسبت به صنعت برتری دارد. در مورد صنایع، صنایع متمرکز در میبد دارای سوددهی بیشتر و خسارت زیست‌محیطی کمتری می‌باشند.

۳-۵- آنالیز حساسیت الگوریتم بهینه‌سازی

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت الگوریتم ژنتیک معمولی و الگوریتم ژنتیک چند هدفه مبتنی بر جواب غیرپست NSGAII، برای انتخاب جمعیت اولیه و تکرار مناسب در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه گردیده است.

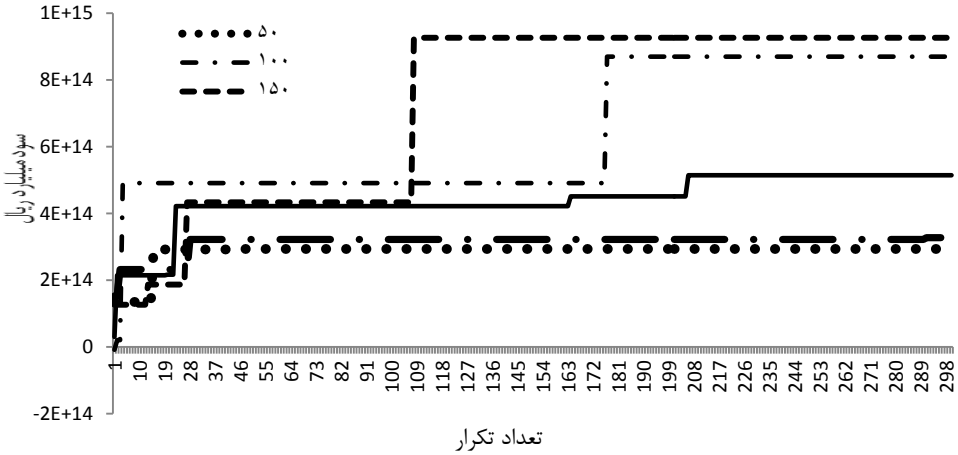
براساس نتایج حاصل از آنالیز حساسیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک مبتنی بر تابع جریمه، با جمعیت اولیه ۲۵۰ و تکرار ۳۰۰ انتخاب گردید. پارامترهای مذکور (جمعیت اولیه و تکرار مناسب)، برای الگوریتم NSGAII، به‌ترتیب ۲۵۰ و ۳۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از اجرای مدل با الگوریتم‌های مذکور در جدول ۶ آمده است.

جدول ۴- نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین مصرف آب و میزان ارزش‌افزوده به تفکیک شهرستان و گروه‌های مختلف مصرف

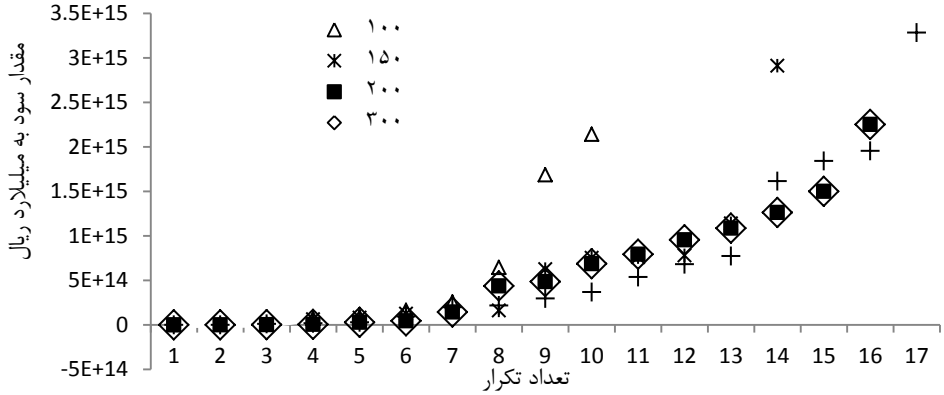
نام شهرستان	بخش مصرف کننده			
	کشاورزی	R^2	صنعت	R^2
اردکان	$Y=2720.9x^{1.1331}$	۰/۸۲	$Y=440356x-7*10^6$	۰/۷۹
میبد	$Y=5654.4x^{0.9364}$	۰/۹۱	$Y=8*10^{10}\ x^{11.758}$	۰/۹۸
یزد	$Y=1404.3x^{1.6415}$	۰/۸۶	$Y=451369x-605773$	۰/۹۴
اشکذر	$Y=4515.9x^{1.0503}$	۰/۷۸	$Y = 320095x - 10^7$	۰/۹۷

جدول ۵- نتایج حاصل از بررسی نسبت ارزش افزوده تعدیل شده به آب مصرفی (میلیون ریال به ازاء متر مکعب) به تفکیک شهرستان و گروه‌های مختلف مصرف در حوضه آبریز دشت یزد- اردکان

نام شهرستان	بخش مصرف کننده		
	کشاورزی	صنعت بدون احتساب خسارت پساب	صنعت با احتساب خسارت پساب
اردکان	۰/۰۰۵۴	۰/۱۱	−۰/۰۲۵۷
میبد	۰/۰۰۵۹	۰/۲۸	۰/۱۳۴
اشکذر	۰/۰۰۵۷	۰/۰۶	−۰/۰۵۸
یزد	۰/۰۰۴۲	۰/۱۶۷	−۰/۰۲۱۶



شکل ۸- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت الگوریتم ژنتیک معمولی جهت انتخاب جمعیت اولیه



شکل ۹- نتایج حاصل از آنالیز حساسیت الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست جهت انتخاب جمعیت اولیه

از اطلاعات موجود در جدول ۶ سه نکته قابل برداشت می‌باشد. نخست این‌که، چنان‌چه هنگام تخصیص از آب زیرزمینی به نیاز کاربران، نیازها و تخصیص در گام‌های زمانی ماهانه تعریف شود ولی ذخیره قابل برداشت آبخوان، به صورت مجموع آب قابل برداشت سالیانه (مدل سالانه) درنظر گرفته شود، باعث بهبود عملکرد مدل نسبت به وضعیتی است که تخصیص آبخوان براساس ذخیره هر ماه آبخوان (مدل ماهانه) انجام شود.

در مطالعات قبلی (Mohammad Rezapour Tabari et al., 2009, 2012; Pulido-Velázquez et al., 2006; Dale et al., 2008; Karamouz et al., 2004)، ذخیره قابل برداشت آبخوان به‌صورت ماهانه درنظر گرفته شده است. از آنجایی‌که به‌علت قوانین حاکم بر فضاهای متخلخل، آب ورودی به آبخوان، نسبت به حرکت جریان‌های سطحی متفاوت است و با تاخیر وارد آبخوان می‌گردد، ممکن است در مواقع افزایش نیاز، آب ورودی به سفره زیرزمینی جواب‌گوی نیازها نباشد. حالت دیگری نیز وجود دارد و آن این‌که در بعضی ماه‌ها، نیاز کم و آب ورودی به سفره زیاد است. به دلیل موارد ذکر شده چنان‌چه تغییرات ذخیره آبخوان را به‌صورت سالانه در نظر بگیریم و تعادل‌بخشی آبخوان را در این حالت به مدل اعمال کنیم، تخصیص بهتری صورت خواهد گرفت.

نکته دوم که در مورد جدول ۵ قابل ذکر می‌باشد، توانایی بهتر الگوریتم NSGAII، در دست‌یابی به سود بیشتر در مقایسه با الگوریتم ژنتیک معمولی می‌باشد. توانایی مناسب این الگوریتم در حل مسائل بهینه‌سازی مرتبط با منابع آب در مطالعات (Mohammad Rezapour Tabari et al., 2012) تأیید شده است.

نکته سوم این‌که، الگوریتم برگزیده در تحقیق حاضر (NSGAII سالانه) در مبحث تخصیص آب به صنعت، آب کمتری به صنایع یزد، اردکان و اشکذر تخصیص داده است، در حالی‌که صنعت میبد، تخصیص قابل ملاحظه‌ای داشته است.

جدول ۶- نتایج حاصل از اعمال الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی در تخصیص منابع آب حوضه آبریز دشت یزد-اردکان

نام مدل	نام شاخص	واحد	شهرستان اردکان	شهرستان میبد	شهرستان یزد	شهرستان اشکذر	مقدار تابع هدف اقتصادی (ریال)
الگوریتم ژنتیک معمولی به‌صورت ماهانه	صنعت	٪	۸۷	۱۳۴/۲	۹۳/۷	۶۰/۰۶۹	$-۰/۴۵*۱۰^{۱۴}$
	کشاورزی	٪	۸۸/۲	۸۵/۴	۹۰/۸۳	۸۵/۹۷	
	شرب و بهداشت	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
	فضای سبز	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
الگوریتم ژنتیک معمولی به‌صورت سالانه	صنعت	٪	۵۱/۲۸	۳۸۰/۸۵	۴۲/۵۲	۵۶/۲۵	$۶/۱۲*۱۰^{۱۴}$
	کشاورزی	٪	۵۳/۸۵	۴۴/۴۵	۶۲/۴۱	۴۳/۶۵	
	شرب و بهداشت	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
	فضای سبز	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
الگوریتم ژنتیک NSGAII به‌صورت ماهانه	صنعت	٪	۹۰/۳۴	۲۰۲/۷۸	۸۵/۲۵	۷۶/۹۲	$-۰/۴۲*۱۰^{۱۴}$
	کشاورزی	٪	۸۷/۳۸	۸۵/۴۴	۸۰/۴۴	۷۹/۳۴	
	شرب و بهداشت	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
	فضای سبز	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
الگوریتم ژنتیک NSGAII به‌صورت سالانه	صنعت	٪	۵۲/۴	۴۷۷/۵	۳۹/۴۴	۴۸	$۶/۴۷*۱۰^{۱۴}$
	کشاورزی	٪	۵۳/۵۷	۶۰/۷۴	۷۱/۳۵	۴۸	
	شرب و بهداشت	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
	فضای سبز	٪	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	

دلیل این امر، تمرکز صنایع پرآب‌خواه با تولید پساب زیاد در این مناطق (یزد، اردکان و اشکذر) می‌باشد که به دلیل خسارت به سلامت آبخوان باعث کاهش منافع اقتصادی می‌گردد. در حالی‌که میبد، دارای صنایع کم‌آب‌خواه با تجهیزات بازگردانی آب (صنعت سرامیک) می‌باشد. در مورد سایر بخش‌ها (کشاورزی، شرب و بهداشت و فضای سبز)، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در عملکرد الگوریتم‌ها دیده نمی‌شود.

۴- جمع‌بندی

تحقیق حاضر به منظور بهینه‌سازی مدیریت تلفیقی منابع آب در حوضه آبریز دشت یزد-اردکان انجام شد. تأکید بر رویکرد زیست‌محیطی در تخصیص منابع آب از طریق تعادل‌بخشی آبخوان و کاهش سهم بهره‌برداران پر خسارت، از جمله مباحث اصلی این تحقیق می‌باشد. عدم قطعیت‌های مهم مربوط به شبیه‌سازی آبخوان زیرزمینی می‌باشد که بیشتر متعلق به داده‌های ورودی نظیر مقدار تغذیه آبخوان، ضرایب هیدرودینامیکی، آب برگشتی و اعداد اندازه‌گیری شده پیزومترها می‌باشد. لذا نتایج شبیه‌سازی دارای نوساناتی بوده و صد در صد با واقعیت، تطابق نداشت ولی در محدوده قابل قبول قرار گرفت. بر روی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، مدل بهینه‌سازی به‌کار گرفته شد که نتایج حاصل از آن به شرح زیر می‌باشند:

۱- الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست در مقایسه با الگوریتم ژنتیک مبتنی بر تابع جریمه، دارای توانایی بیشتری در تخصیص منابع آب می‌باشد.

۲- چنانچه به‌جای ذخیره قابل برداشت ماهانه سفره، تخصیص آب زیرزمینی از مجموع تغذیه سالانه سفره صورت بگیرد، نتیجه مناسب‌تری به دست می‌آید.

لحاظ نمودن ذخیره قابل برداشت آبخوان به‌صورت سالانه، به جای تغذیه ماهانه، از نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد و در مطالعات قبلی دیده نشده است. اعمال این تفکر باعث می‌شود، در ماه‌هایی که نیاز کاربران، افزایش و ذخیره قابل برداشت آبخوان جواب‌گوی نیازها نمی‌باشد، بتوان برداشتی بیش از ذخیره ماهانه آبخوان نمود و این برداشت بیش از حد، به‌وسیله ماه‌هایی کم‌نیاز و پر آب جبران می‌گردد. لذا ضمن این‌که تعادل‌بخشی آبخوان در مقیاس سالانه در نظر گرفته شده است، نیاز کاربران نیز بهتر برآورده می‌گردد.

۳- گروه‌های صنعتی پر آب‌خواه و دارای پساب سنگین و خسارت‌زا، نظیر صنعت فولاد، جزء گروه‌های پرخسارت محسوب شده و پایداری اکولوژیکی منطقه را با تهدید مواجه می‌سازد.

مورد ذکر شده در بند ۳ نیز از نوآوری‌های این تحقیق می‌باشد، به‌طوری‌که در مطالعات پیشین انجام شده در زمینه بهره‌برداری تلفیقی منابع آب، غالباً به تأمین نیاز کاربران و تعادل‌بخشی کمی منابع آب پرداخته شده است. در مواردی نیز آلودگی ناشی از پساب بخش کشاورزی به آب‌های سطحی و یا مدیریت کیفی مخازن از نظر املاح محلول در نظر گرفته شده است. در واقع مدیریت تلفیقی منابع آب، با نگرش همه جانبه به آلودگی‌های ناشی از فعالیت بخش‌های مختلف بهره‌برداری شامل صنعت، کشاورزی و شهری در کمتر مطالعه‌ای دیده شده است. در این تحقیق، ضمن در نظر گرفتن گروه‌های مختلف بهره‌بردار و محاسبه خسارت ناشی از پساب تزریقی این گروه‌ها به آبخوان، گروه‌های مختلف صنعتی نیز از نظر مقدار پساب تولیدی و خسارت کیفی به آبخوان، مجزا گردیدند.

در نهایت براساس نتایج این پژوهش و با توجه به قرارگیری دشت یزد–اردکان در شرایط اقلیمی گرم و خشک، می‌توان گفت، دولت‌مردان و سیاست‌گذاران باید در مبحث مدیریت منابع آب، بر پایداری اکولوژیکی منطقه و حفظ سلامت آبخوان و جوامع انسانی مستفر در منطقه توجه بیشتری داشته باشند. لذا علاوه بر تصحیح بهره‌برداری‌های فعلی، چشم‌اندازهای آینده بخش‌های مختلف، باید با درنظرگرفتن منابع آب انجام شود.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، پیشنهادهای زیر برای ادامه تحقیقات ارائه می‌گردد:

۱- محاسبات جامع زیست‌محیطی به این صورت که در برازش تابع اقتصادی هر کاربری، کلیه خسارات زیست‌محیطی شامل آلودگی منابع آب، آلودگی هوا و .... در نظر گرفته شود. به‌عبارتی طرح جامع برآورد هزینه‌های زیست‌محیطی کاربری‌ها اجرا گردد.

۲- در تحقیقات آتی، عدم قطعیت‌های بیشتری در مدل بهینه‌سازی لحاظ شود و مدل غیر قطعی بهینه‌سازی نیز مورد بررسی قرار گیرد. در صورت امکان از مدل‌های پیوسته شبیه‌ساز–بهینه‌ساز استفاده شود.

۵- مراجع

Asadi R, Malekinezhad H, Fatahi A (2015) Optimization of land use based on water resources by using linear programming (Case study: Yazd city). Journal of Water Management in Arid Lands 1(2): 11-26 (In Persian)

Azaiez MN (2002) A model for conjunctive use of ground and surface water with opportunity costs. European Journal of Operational Research 143:611-624

Barlow PM, Ahlfeld DP, Dickerman DC (2003) Conjunctive-management models for sustained yield of stream-aquifer systems. Journal of Water Resources Planning and Management 129(1):35-48

Buras N (1963) Conjunctive operation of dams and aquifers. Journal of the Hydraulics Division 89(6):111-132

Chang LC, Ho CC, Chen YW (2009) Applying multi objective genetic algorithm to analyze the conflict among different water use sectors during drought period. Journal of Water Resources Plan Management 136 (5):539–546

Coe Jack J (1990) Conjunctive use-advantages, constraints, and examples. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 116(3):427-443

Dale Larry L, Vicuna S, Dracup JA (2008) The conjunctive use of reservoirs and aquifers: Tradeoffs in electricity generation and water supply." Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, Honolulu, Hawaii

Deb K, Agrawal S, Pratap A, Meyarivan T (2000) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. In Parallel problem solving from nature PPSN VI (849-858). Springer Berlin Heidelberg

Dogrul EC, Kadir TN, Brush C F, Chung FI (2016) Linking groundwater simulation and reservoir system analysis models: The case for California's Central Valley. Environmental Modeling and Software77:168-182

Emch PG, Yeh WG (1998) Management model for conjunctive use of coastal surface water and groundwater. Journal of Water Resources Planning and Management 124(3):129-139

Goldberg DE (1989) Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison-Wesley, Reading Menlo Park: Addison-wesley

Gracheva I, Karimov A, Turral H, Miryusupov F (2009) An assessment of the potential and impacts of winter water banking in the Sokh aquifer. Central Asia. Hydrogeology Journal.17 (6):1471-1482

Holland JH (1975) Adaptation in natural and artificial systems," University of Michigan Press Annarbor, Cam-bridge Mass

Hamshari Newspaper (2014) Factory resistance from connection to industrial state refinery (In Persian)

surface water and groundwater at the basin scale. Journal of Water Resources Planning and Management 132 (6):454-467

Regulwar DG, Anand Raj P (2008)Development of 3-D optimal surface for operation policies of a multireservoir in fuzzy environment using genetic algorithm for river basin development and management. Journal of Water Resources Planning and Management. 22:595–610

Saber Chenari K, Abghari H, Erfanian M, Gholizadeh S (2013) Short-term model of optimization operation of water resources using particle swarm optimization and compared with genetic algorithm. Journal of Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) 97:63-72. (In Persian)

Scherberg J, Baker T, Selker J, Henry R (2014) Design of managed aquifer recharge for agricultural and ecological water supply assessed through numerical modeling. Journal of Water Resources Management28 (14):4971-4984

Scibek J, Allen DM (2006) Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. Water Resources Research 42(11):1-18

Shourian M, Mousavi SJ, Tahershamsi A (2008) Basin-wide water resources planning by integrating PSO algorithm and MODSIM. Journal of Water Resources Management 22 (10):1347–1366

Statistical Center of Iran, statistical yearbook from 2001-2011.(In Persian)

Valerio A, Rajaram H, Zagona E (2010) Incorporating groundwater-surface water interaction into river management models. Groundwater 48 (5):661-673.

Wang H, Gao JE, Zhang MJ, Li XH, Zhang SL, Jia LZ (2015) Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. Catena 127:80-91

Xuan W, Quan C, and Shuyi L (2012) An optimal water allocation model based on water resources security assessment and its application in Zhangjiakou Region, Northern China. Resources, Conservation and Recycling, 69:57-65

Yazd Regional Water Organization (2015). Statistics and information.(In Persian)

Zhang H, Hiscock KM (2010) Modeling the impact of forest cover on groundwater resources: A case study of the Sherwood Sandstone aquifer in the East Midlands, UK. Journal of Hydrology 392:136–149

Jyrkama MI, Sykes JF, Normani SD (2002) Recharge estimation for transient ground water modeling. Journal of Groundwater, 40:638–648

Karamouz M, Kerachian R, Zahraie B (2004) Monthly water resources and irrigation planning: Case study of conjunctive use of surface and ground water resources. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 130 (5):391-402

Karimi A, Nikoo MR, Kerachian R, and Mokhtarpour A (2014) Long-term conjunctive use of surface and ground water resources at basin scale considering water quality constraints (Case study: Zayandehrud watershed), Iranian Journal of Water Research, 14(8):97-108 (In Persian)

Kim NW, Chung IM, Won YS, Arnold JG (2008) Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. Journal of Hydrology 356:1–16

Kim Y, Chung ES (2013) Assessing climate change vulnerability with group multi criteria decision making approaches. Journal of Climatic change121 (2):301–315

Latif M (1991) Conjunctive water use to control water logging and stalinization. Journal of Water Resources Planning and Management, 117(6):611-628

Moghaddasi M, Morid S, Araghinejad Sh (2009) Optimization of water allocation during water scarcity condition using non-linear programming, genetic algorithm and particle swarm optimization (Case study). Iran-Water Resources Research 4(3):1-13. (In Persian)

Mohammad Rezapour Tabari M, Maknoon R., Ebadi E (2009) Multi-objective optimal model for conjunctive use management using SGAs and NSGA-II models. Journal of Water and Wastewater 69: 2-12 (In Persian)

Mohammad Rezapour Tabari M, Maknoon R., Ebadi E (2012) Development structure for optimal long-term planning in conjunctive use. Journal of Water and Wastewater 4:56-69 (In Persian)

Parsapour-Moghaddam P, Abed-Elmdoust A, and Kerachian R (2015). A Heuristic evolutionary game theoretic methodology for conjunctive use of surface and ground water resources. Journal of Water Resources Management, 29(11):3905-3918

Pulido-Velázquez M, Andreu J, and Sahuquillo A (2006) Economic optimization of conjunctive use of