تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نهم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۲
Volume 9, No. 3, Winter 2014 (IR-WRR)
۴۷-۵۸

تهیه رابط گرافیکی مدل مدیریت آب زیرزمینی در مدیریت بهره برداری از آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت شهرکرد)

سمیه جنت رستمی[۱*]، مجید خلقی[۲] و کورش محمدی[۳]

چکیده

محدودیت منابع آب سطحی و افزایش بی رویه جمعیت در چند دهه اخیر باعث وارد آمدن فشار مضاعف بر آبخوان‌ها و خسارت‌های جبران‌ناپذیری به منابع طبیعی کشور شده است. جهت جلوگیری از فاجعه به وجود آمده بایستی مدیریت بهینه بهره برداری از آب‌های زیرزمینی به عنوان یک اصل و پایه در برنامه‌ریزی‌های کوتاه مدت و بلند مدت مورد توجه قرار گیرد. با اینکه محققان زیادی در مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی استفاده نموده‌اند، اما هنوز نرم‌افزار کاملی برای آن وجود ندارد. در این تحقیق رابط گرافیکی تحت عنوان مدل گرافیکی مدیریت آب زیرزمینی، GGWM، که براساس دو مدل MODFLOW-2000 و GWM نوشته شده است، ارائه گردید. در مرحله بعد، کد تهیه شده در سیستم واقعی، آبخوان دشت شهرکرد به کار گرفته شد. با توجه به روند افزایشی میزان افت سطح آب زیرزمینی در این منطقه، سعی گردید مدل بهینه مدیریتی تهیه شده در این مطالعه، در راستای توسعه پایدار باشد. نتایج به‌دست آمده، نشان داد که در آبخوان شهرکرد می‌توان با مدیریت برداشت از چاه‌های کشاورزی واقع در سطح دشت و تامین نیازهای منطقه، میزان افت سطح ایستابی را ۱۰ درصد نسبت به حالت فعلی بهبود بخشید، که حاکی از موفقیت مدل در سیستم واقعی می‌باشد.

کلمات کلیدی: آب‌های زیرزمینی، آبخوان شهرکرد، شبیه‌سازی- بهینه‌سازی، GGWM ، GWM، MODFLOW-2000.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۳ اردیبهشت ۱۳۹۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۱ تیر ۱۳۹۲

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۳- دانشیار گروه محیط زیست پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
*- نویسنده مسئول

Development of a Graphical Interface For Ground Water Management Model to Manage Groundwater Utilization (Case Study in Shahr-e-kord Plain Aquifer, Iran)

S. Janatrostami [1], M. Kholghi [2] and K. Mohammadi [3]

Abstract

Limited surface water resources and enormous population growth in recent decades have resulted in groundwater overexploitation and damage to natural resources in Iran. Optimum groundwater resources management should be considered as the key issue and a basis in short and long term planning in order to stop further damages. Though the simulation-optimization approach has been widely used in groundwater resources management researches, there is still no comprehensive software to address all the aspects. In this research, a graphical interface, Graphical Ground Water Management (GGWM), was developed based on MODFLOW-2000 and GWM softwares. The developed model was applied in a case study for Shahr-e-kord plain aquifer. Considering the progressive water table drop in the area, the main goal of the model was to find a sustainable solution. The model were verified in the real case and the results showed that by withdrawal management in agricultural wells, it is possible to improve the water table drawdown by 10% compared to the current condition.

Keywords: Groundwater, Shahr-e-kord aquifer, Simulation- Optimization, GGWM, GWM, MODFLOW-2000.

Received: May 12, 2012
Accepted: July 2, 2013

1- PhD Candidate, Water Engineering Dept., University of Tehran, Karaj, Iran
E-mail: somayejanat@ut.ac.ir
2- Professor, Water Engineering Dept., University of Tehran, Karaj, Iran
3- Associate Professor, Water Engineering Research Institute, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

امروزه بخش مهمی از آب مورد نیاز بخش‌های مختلف مصرف، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که در دو دهه اخیر، افراط در بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی، باعث افت شدید سطح آب در اکثر آبخوان‌های کشور شده است. این افت که گاهی اوقات به بیش از ۱۰ متر نسبت به چند سال گذشته می‌رسد، بدون شک برای منابع طبیعی کشور یک فاجعه محسوب می‌شود. جهت حل این مشکل، کارشناسان آب‌زیرزمینی با بهره‌گیری از بهینه‌سازی آب زیرزمینی سعی در ارائه یک برنامه مدیریتی مناسب برای آبخوان هر منطقه با توجه به مشکلات آن منطقه دارند.

از دهه ۱۹۶۰ به طور گسترده، مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی به عنوان ابزارهای مهمی در تحلیل سیستم‌های منابع آب زیرزمینی وارد شدند. اخیراً مدل‌های آب زیرزمینی با روش‌های مختلف بهینه‌سازی جهت تعیین استراتژی مدیریت منابع آب و بهترین مجموعه جواب با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها ترکیب شده‌اند (Ahlfeld et al. 2005). بطور کلی جهت بهینه سازی سیستم آب‌های زیرزمینی یک منطقه ابتدا مدل ریاضی آبخوان منطقه مورد نظر تهیه می‌گردد. لازم به ذکر است که در استفاده از مدل ریاضی جهت بهینه‌سازی سفره‌های آب‌های زیرزمینی دو نگرش وجود دارد. در نگرش اول با استفاده از مدل ریاضی (مدل شبیه‌سازی)، ابتدا رفتار آبخوان را از لحاظ خطی یا غیرخطی بودن تشخیص می‌دهند، سپس رابطه بین مقادیر برداشت و افت سطح آب زیرزمینی را به صورت معادله‌ای به‌دست آورده و در نهایت، بهینه‌سازی سیستم آب زیرزمینی را انجام می‌دهند. به خاطر سهولت این روش، محققان زیادی از جمله Aquado and Remson (1974) جهت پیش‌بینی تعداد بهینه چاه‌ها، Schwarz (1976) در مدیریت هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی، Abdeh-Kolahchi et al. (2006) در بهینه‌سازی کیفی آب زیرزمینی و جوادیان زاده (۱۳۷۷) در تهیه مدل شبیه‌سازی و بهینه سازی جریان آب زیرزمینی و همچنین علیمحمدی (۱۳۸۴)، قادری و همکاران (۱۳۸۵)، دشتی (۱۳۸۵) و شمسایی و همکاران (۱۳۹۰) در بهینه سازی بهره‌برداری تلفیقی از آب‌های سطحی و زیرزمینی از این نگرش استفاده نمودند. نگرش دوم در بهینه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی، استفاده از مدل تلفیقی شبیه سازی- بهینه سازی است. در این نگرش بعد از کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی و تعیین متغیرهای تصمیم، تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی، اتصال دو مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. مزیت این روش در این است که در هنگام بهینه‌سازی به ازای هر تغییری در بردار متغیرهای تصمیم، مدل شبیه‌سازی دوباره اجرا می‌گردد. بدیهی است که این نگرش نسبت به نگرش قبلی از دقت بالاتری برخوردار است. Ahlfeld and Sawyer (1990) برای اصلاح آلودگی آب زیرزمینی، Ahlfeld and Heidari (1994)، در مدیریت هیدرولیکی سفره‌های آب زیرزمینی، Kholghi et al. (1996) در مدیریت تلفیقی آب‌های سطحی و زیرزمینی، در این مطالعه آنها موقعیت چاه‌ها و سرعت پمپاژ را با مینیمم کردن هزینه به‌دست آوردند. Barlow et al. (2003)، جهت تهیه مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی خطی جـــریان آب زیرزمینی، قزاق (۱۳۸۶) در مدیریت سفره آب زیرزمینی دشت قزوین، کتابچی و همکاران (۱۳۹۰) جهت مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و Tamer Ayvaz and Karahan (2008) و همچنین Tamer Ayvaz (2009)، جهت تهیه مدل تلفیقی شبیه سازی و بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و الگوریتم جستجوی هارمونی از این نگرش استفاده نمودند.

از میان کدهای آماده موجود در دنیا، کدی که بیشترین کاربرد را در زمینه کمیت آب‌های زیرزمینی در کشورهای مختلف دنیا داشته است، کد شبیه‌سازی MODFLOW می باشد که توسط سازمان تحقیقات زمین‌شناسی آمریکا (USGS[1]) ارائه شده است. Ahlfeld et al. (2005)، کد بهینه‌سازی را تحت عنوان GWM[2]، که بر اساس کد MODFLOW و به زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده، ارائه نمودند.

در این تحقیق، در راستای توسعه کد GWM، رابط گرافیکی این کد به منظور بهینه سازی و شبیه سازی آب زیرزمینی توسعه داده شد. در نسخه جدید تهیه شده، کاربر قادر است به سهولت داده‌های ورودی و نوع تابع هدف و شرایط محدود کننده مسئله مورد نظر را وارد کد کرده و بعد از اجرای آن، نتایج را مشاهده نماید. هیچکدام از این مراحل در کد قبلی قابل اجرا نبوده و استفاده از آن را برای کاربر مشکل می‌نمود. در ادامه این تحقیق، به منظور ارزیابی و بررسی کاربردی بودن آن در شرایط واقعی، کد توسعه داده شده برای یک مطالعه موردی به کار گرفته شد.

۲- روش تحقیق

در چند دهه اخیر تعدادی از کدهای کامپیوتری توسعه داده شده‌اند که در آنها امکان اتصال شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در سیستم جریان آب زیرزمینی فراهم شده است. GWM فرآیند جدیدی از کد MODFLOW-2000 در مدیریت آب‌های زیرزمینی است. این کد

در واقع نسخه توسعه یافته کد MODOFC است که توسط Ahlfeld and Riefler (2003) نوشته شده است (Ahlfeld et al., 2005).

GWM، سه نوع متغیر تصمیم شامل متغیرهای تصمیم مقدار جریان[۳]، متغیرهای تصمیم بیرونی[۴] و متغیرهای دوتایی[۵] را پشتیبانی می‌کند. این مدل تنها تابع هدف حداقل و حداکثرسازی مجموع وزنی سه نوع متغیر تصمیم را پشتیبانی می‌کند. محدودیت‌های تعریف شده در این کد، به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: دسته اول شامل محدودیت‌هایی هستند که برای اعمال آن‌ها ضرورتی در تولید ضرایب پاسخ نمی‌باشد (شامل محدودیت‌های متغیرهای تصمیم[۶] و محدودیت‌های جمع خطی[۷]) و دسته دوم شامل محدودیت‌هایی هستند که در به‌کارگیری آن‌ها بایستی ضرایب پاسخ بین متغیرهای تصمیم و متغیرهای حالت سیستم آب زیرزمینی تولید شوند (شامل محدودیت‌های بار هیدرولیکی[۸] و رودخانه[۹]). همچنین GWM ماتریس پاسخ را به سه روش برنامه‌ریزی خطی[۱۰]، برنامه‌ریزی غیرخطی[۱۱] و فرمول‌بندی مختلط خطی- دوتایی[۱۲] حل می‌کند.

کد بهینه‌سازی GWM که بر اساس کد شبیه‌سازی MODFLOW تهیه شده است، به گونه‌ای است که کاربر برای استفاده از آن به اطلاعات زیادی درباره چگونگی فرمت داده‌ها و مدیریت آب زیرزمینی احتیاج دارد. در نتیجه کاربر برای اجرای این برنامه نیازمند زمان نسبتاً قابل توجهی جهت فراگرفتن موارد یاد شده است. با توجه به موارد فوق در تحقیق حاضر سعی گردید نواقص مورد نظر در کد بهینه‌سازی GWM برطرف گردد. برای رسیدن به این هدف برنامه نویس نیازمند درک کاملی از نحوه برنامه‌نویسی GWM و MODFLOW می‌باشد. به این ترتیب کد GGWM[۱۳] بر اساس GWM و MODFLOW به صورت یک رابط گرافیکی که کاربر راحت‌تر بتواند با آن ارتباط برقرار کند یا به عبارتی کاربردوست باشد ارائه گردید.

از آنجا که کد بهینه‌سازی GWM براساس MODFLOW-2000 و با زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده است. در این تحقیق برای نوشتن کد GGWM به طوری‌که بتواند داده‌های ورودی را از کاربر دریافت کند و متناسب با آن نتایج بهینه‌سازی را نشان دهد، از زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک [۱۴]استفاده گردید.

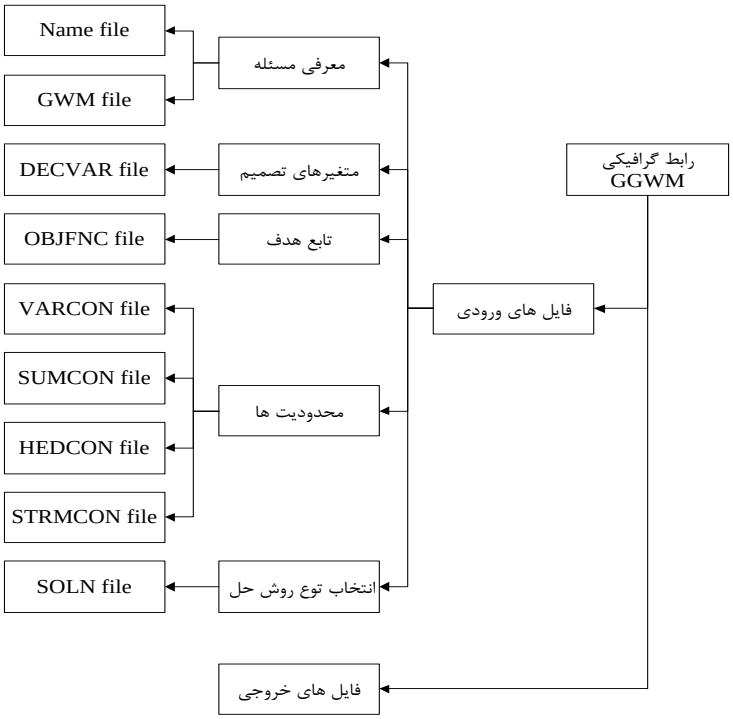
برای نیل به این هدف، مشکلی که در مرحله اول به وجود می‌آید تفاوت دو زبان برنامه‌نویسی ویژوال بیسیک و فرترن است. بدیهی است که اکثر برنامه‌نویسان [۱۵]DLL را جهت حل مسائلی نظیر این مسئله پیشنهاد می‌کنند. بعد از یافتن نحوه ساختن DLL برای این مسئله خاص و تعیین ورودی‌های آن، به دلیل گستردگی برنامه‌های موجود در GWM و سابروتین‌های آن، در هنگام اجرای DLL تهیه شده، برنامه‌ها و سابروتین‌های موجود در GWM با هم تداخل می‌کنند و برنامه به جواب نمی‌رسد. جهت اجتناب از این مشکل، از فایل exe شده برنامه GWM استفاده گردید. به این ترتیب فایل exe آن را در پوشه‌ای که پروژه در آن تشکیل می‌شود قرار داده و در برنامه ویژوال بیسیک با دستور shell execute آن را فراخوانی می‌کنند به این ترتیب مشکل تداخل برنامه‌ها در برنامه GWM حل می‌شود. کد GGWM براساس ساختار شکل ۱ تهیه شده است.

با توجه به شکل ۱، مدل GGWM شامل یک سری فایل‌های ورودی و خروجی است. فایل‌های ورودی به پنج بخش تقسیم می‌شود که عبارت است از: معرفی مسئله، متغیرهای تصمیم، تابع هدف، محدودیت‌ها و انتخاب نوع روش حل. در بخش معرفی مسئله دو پنجره Name file و GWM file تهیه گردید که در پنجره Name file همه فایل‌های ورودی و خروجی که توسط MODFLOW-2000 تولید می‌شود، وجود دارد که با توجه به داده‌های پروژه‌ای که در دسترس است گزینه‌های این پنجره انتخاب می‌گردد (شکل ۲). در پنجره GWM file نیز نوع محدودیت‌هایی که در مسئله وجود دارد تعیین می‌شود.

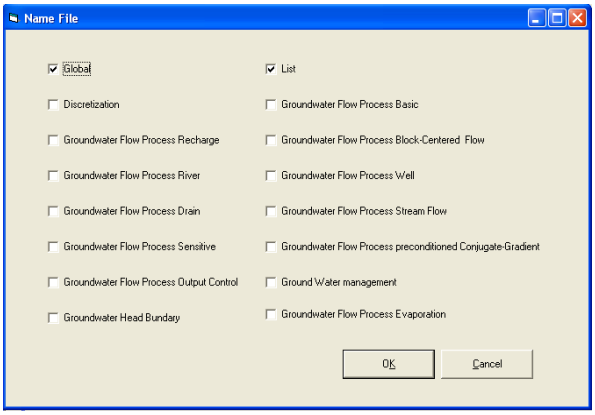
در بخش متغیرهای تصمیم پنجره DECVAR file تهیه گردید که در این پنجره تعداد هر نوع متغیرهای تصمیم و وزن اختصاص داده شده به هر یک از متغیرها مشخص می‌شود. در بخش تابع هدف پنجره OBJFNC file طراحی گردید که در این پنجره نوع تابع هدف اعم از حداقل یا حداکثرسازی و وزن هر یک از متغیرهای تصمیم در تابع هدف تعیین می‌شود (شکل ۳).

در بخش محدودیت‌ها پنجره‌های VARCON file، SUMCON file، HEDCON file و STRMCON file طراحی گردید که به ترتیب برای تعیین محدودیت‌های متغیرهای تصمیم، جمع خطی، ارتفاع هیدرولیکی و رودخانه به کار می‌رود که یکی از پنجره‌ها در شکل ۴ آورده شده است.

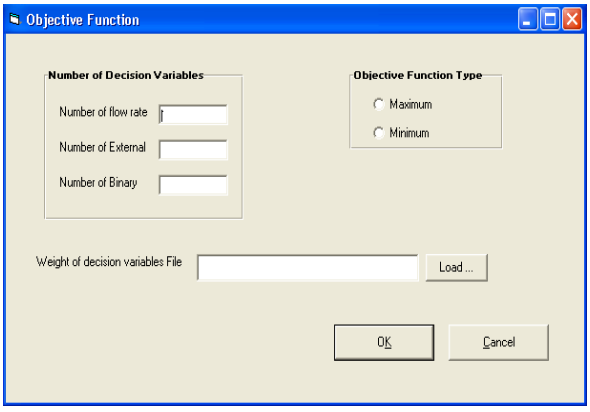
در بخش انتخاب نوع روش حل، پنجره SOLN file تهیه شد که این پنجره برای تعیین نوع روش حل ماتریس ضرایب پاسخ طراحی گردید. بعد از تعیین همه داده‌های ورودی به مدل، مدل آماده اجرا می‌شود، و بعد از اجرای مدل، نتایج نمایش داده شده و به فرمت اکسل ذخیره خواهد شد.



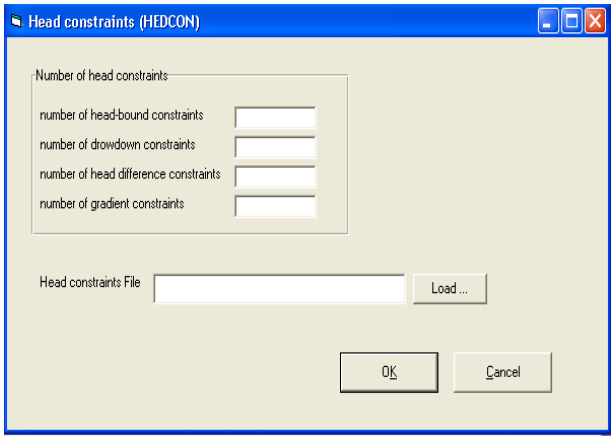
شکل ۱- ساختار GGWM



شکل ۲- نمایی از پنجره name file



شکل ۳- نمایی از پنجره تعریف تابع هدف



شکل ۴- نمایی از پنجره مربوط به تعیین محدودیت بار هیدرولیکی

۱-۲- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

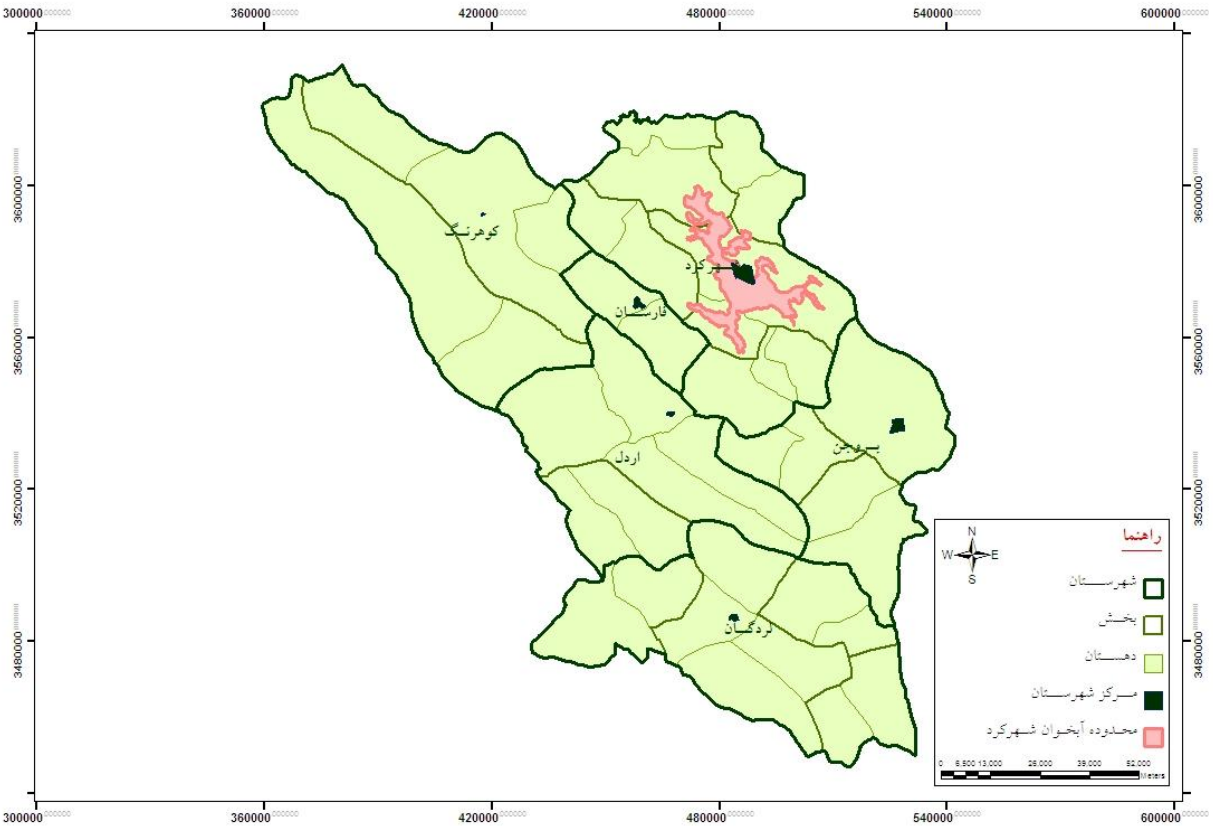
مطالعه موردی این تحقیق، آبخوان شهرکرد واقع در استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. وجود چندین دوره خشکسالی، کم شدن آبدهی چشمه‌ها و رودخانه‌های تأمین کننده آب کشاورزی و همچنین افزایش نیاز آبی در منطقه مورد مطالعه سبب شده است که بخش‌های اجرایی بیشتر به سمت بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی روی آورند که این عوامل باعث افزایش افت سطح ایستابی در سال‌های اخیر گردید. بنابراین، تهیه مدل مدیریت بهره‌برداری

بهینه از آبخوان باعث می‌گردد که روند برداشت‌ها به نحوی باشد که مدیریت در راستای توسعه پایدار باشد و از به وجود آمدن افت شدید سطح آب در این آبخوان و ایجاد فاجعه جبران ناپذیری که در بعضی از دشت‌های کشور رخ داده است، جلوگیری شود.

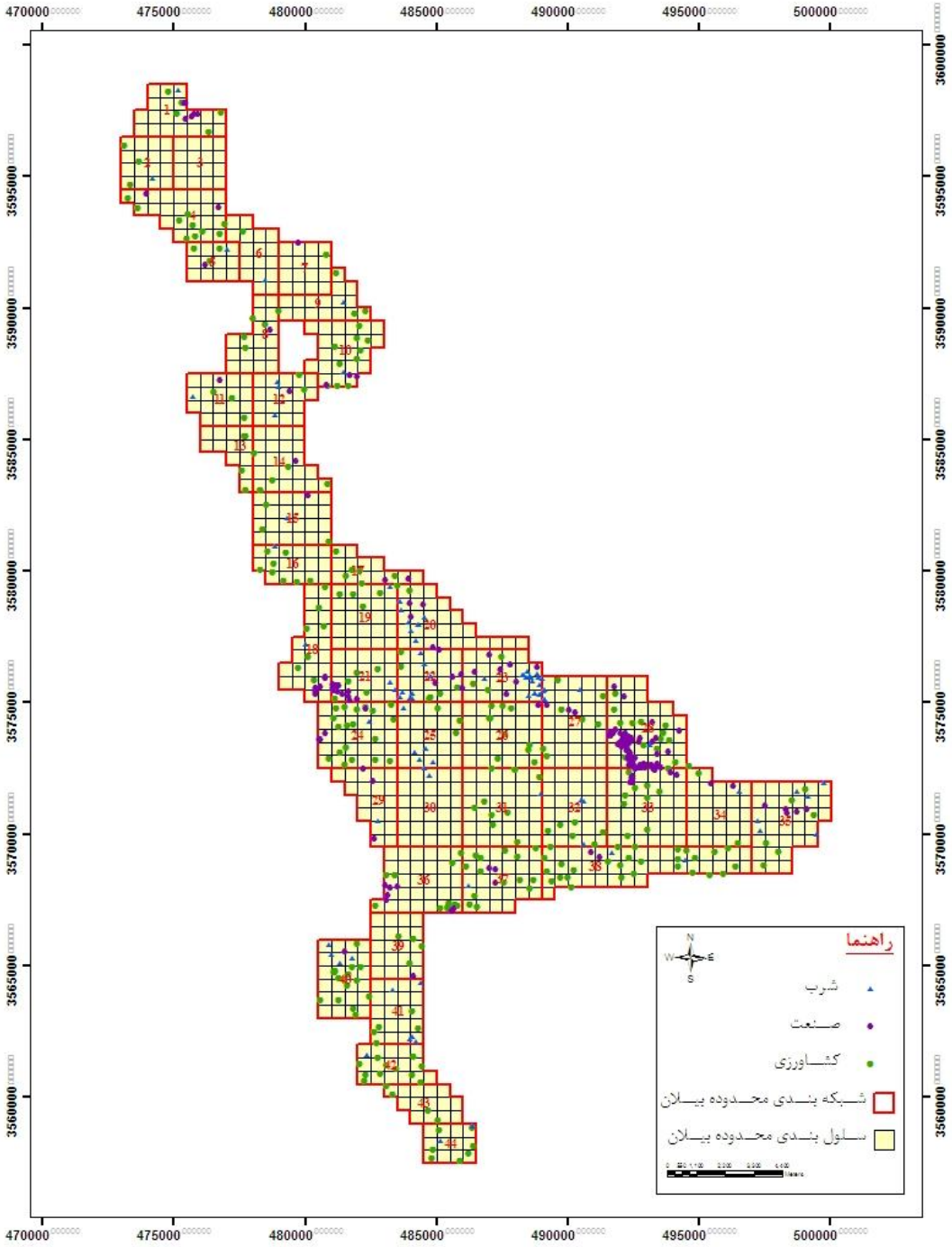
آبخوان دشت شهرکرد در استان چهارمحال و بختیاری و در جنوب غربی اصفهان قرارگرفته است. در شکل ۵ موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری نشان داده شده است. دشت شهرکرد از شمال و شمال غرب به ارتفاعات کلاه قاضی، قراول‌خانه و چهل‌دختر، از جنوب به ارتفاعات جهان بین و تفه، از شرق به ارتفاعات کوه سینه و برات، از غرب نیز به ارتفاعات قلنگان و ارتفاعات مشرف به جاده فارسان منتهی می‌گردد. سطح حوضه آبریز این دشت بالغ بر ۱۱۳۵/۵۷ کیلومترمربع است و مساحت محدوده مدل ۲۶۱/۲۵ کیلومترمربع می‌باشد. این ناحیه در حوضه آبریز رودخانه جهان‌بین قرار گرفته‌است.

مرز شمالی آبخوان که جبهه ورودی آب زیرزمینی است از نوع مرز با پتانسیل هیدرولیکی معلوم می‌باشد. مرز جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی که منطقه خروج آب زیرزمینی است نیز از نوع مرز با پتانسیل هیدرولیکی معلوم در نظر گرفته می شود. از نظر ساختار زمین شناسی سفره شهرکرد، یک لایه ای و از نوع آزاد می باشد.

بررسی داده‌های موجود در آبخوان دشت شهرکرد نشان داد که تنها در ۲ سال (۷۸-۱۳۷۷ و ۸۷-۱۳۸۶) اطلاعات کافی و مطالعات نیمه تفضیلی وجود داشت، بنابراین داده‌های ۲ سال برای کالیبراسیون و صحت سنجی استفاده گردید. داده‌های سال ۷۸-۱۳۷۷ جهت کالیبراسیون و داده‌های سال ۸۷-۱۳۸۶ جهت صحت سنجی مدل شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. بعد از تهیه مدل شبیه‌سازی منطقه مورد مطالعه، به منظور این‌که برنامه مدیریتی بتواند قابل اجرا برای بخش‌های اجرایی و مردم باشد شبکه‌های مدیریتی به مراتب بزرگ‌تر از سلول‌های مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته می شود. بنابراین کل محدوده مورد مطالعه به ۴۴ شبکه مدیریتی تقسیم گردید (شکل ۷). چاه‌های بهره برداری در منطقه مورد مطالعه دارای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب می باشد. توزیع چاه‌ها و مقادیر فعلی بهره‌برداری در منطقه در شکل‌های ۶ و ۷ آورده شده است.

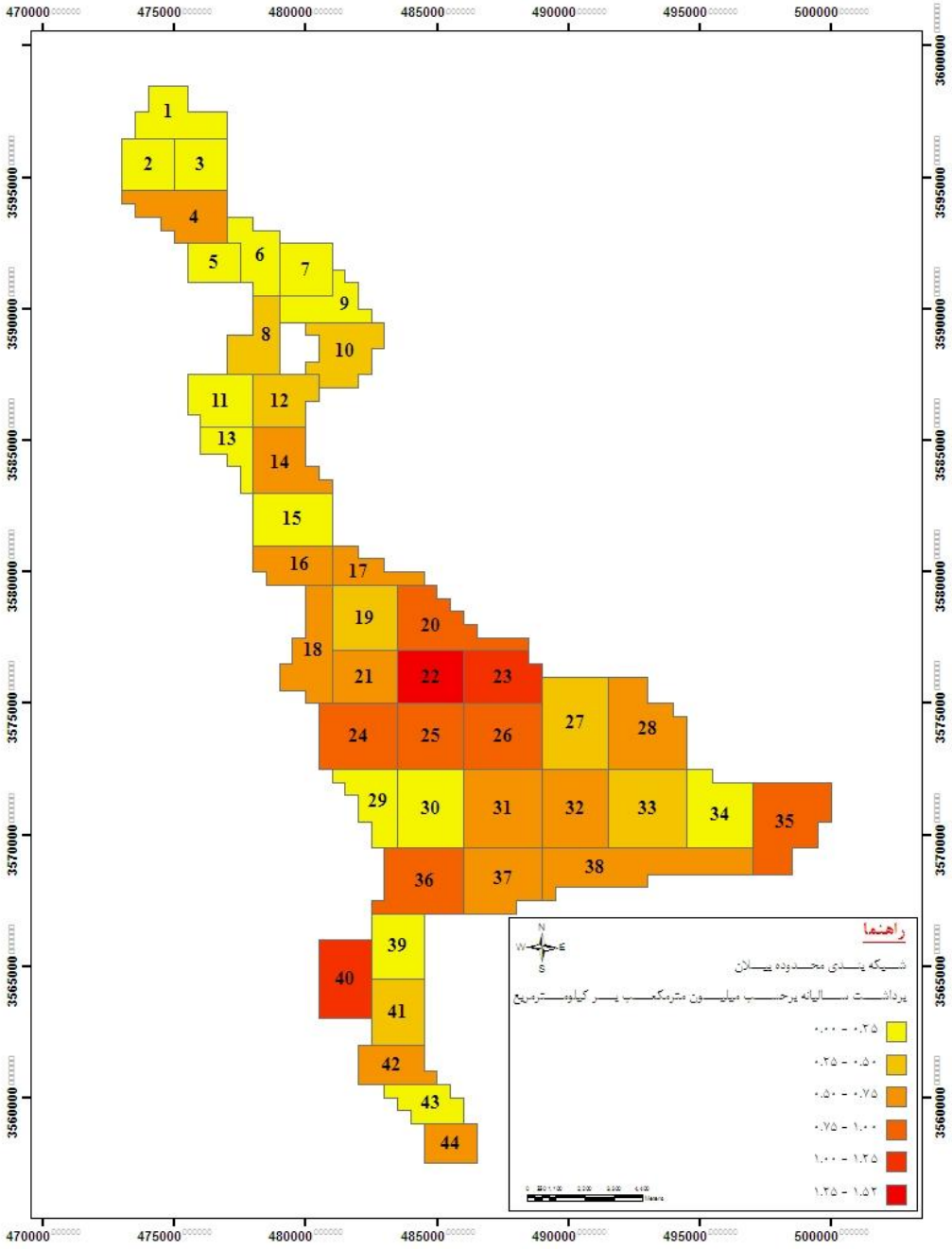


شکل ۵- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری



شکل ۶- توزیع چاه‌های کشاورزی، صنعت و کشاورزی در دشت شهرکرد

با توجه به اهمیت چاه‌های شرب و صنعت (از نظر تأمین آب مورد نیاز)، برای تهیه یک برنامه مدیریتی بهینه آب زیرزمینی سعی می گردد بیشتر بر روی مصارف کشاورزی مدیریت صورت گیرد. به این ترتیب در این تحقیق با حفظ میزان آبدهی چاه‌های شرب و صنعت، فقط در میزان بهره برداری از چاه‌های کشاورزی در شبکه‌های مدیریتی تغییراتی اعمال شده است. به منظور آگاهی از میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت شهرکرد، مدل شبیه‌سازی را برای حالت میزان بهره‌برداری فعلی و همچنین افزایش و کاهش درصدی از وضعیت بهره برداری فعلی اجرا نموده و با توجه به تغییرات ملاحظه شده نحوه مدیریت و انتخاب تابع هدف مشخص گردید.



شکل ۷- توزیع فعلی بهره‌برداری در منطقه

۲-۲- فرمول‌بندی مدیریت آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه

به طور کلی یک فرمول‌بندی مدیریت آب زیرزمینی که به خوبی تعریف شده باشد، شامل مقادیری از متغیرهای تصمیم است که توسط آن مقدار بهینه تابع هدف به دست آمده باشد و در عین حال تمامی محدودیت‌های تعریف شده بر روی متغیرهای تصمیم نیز به خوبی ارضا شده باشند.

متغیر تصمیم: در این تحقیق میزان برداشت از چاه‌های موجود در هر یک از شبکه‌های مدیریتی در هر ماه از سال به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شد، با توجه به اینکه نیاز آبی کشاورزی در ماه‌های آذر، دی، بهمن و اسفند صفر می‌باشد دلیلی جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری در این ماه‌ها وجود ندارد و جهت کم کردن حجم محاسباتی و صرف زمان کمتر برای رسیدن به جواب بهینه مقادیر برداشت این ماه‌ها در مسئله مدیریتی حذف شده است. به

منظور افزایش ضمانت اجرایی مدل، در هر شبکه مدیریتی نسبت برداشت از هر یک از چاه‌های کشاورزی به میزان کل برداشت از آن شبکه مشابه با شرایط موجود در نظر گرفته شده است. در نتیجه مقدار برداشت از چاه‌های موجود در هر شبکه مدیریتی به یک نسبت افزایش یا کاهش خواهد یافت. مدل بهینه در یک دوره پنج ساله اجرا می‌گردد. متغیرهای تصمیم به گونه‌ای تعریف شده‌اند که میزان برداشت بهینه سالانه در هریک از شبکه‌های مدیریتی در سال‌های مختلف یکسان در نظر گرفته شوند و از یک سال به سال دیگر تفاوتی نداشته باشند.

تابع هدف: حداکثر نمودن میزان برداشت از مجموعه شبکه‌ها با حفظ نسبت برداشت از هر یک از چاه‌های کشاورزی به میزان کل برداشت از آن شبکه به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.

$$Max\ Z=\sum_{t=1}^{60}\sum_{n=1}^{44} Q_{n,t} \qquad (۱)$$
$$(t=1,2,\ldots,60),\{n=(1,2,\ldots,44)\text{-}(3,29,30)\}$$

که t زمان برحسب ماه؛ n شماره شبکه مدیریتی و $Q_{n,t}$ مقدار برداشت کشاورزی در زمان t و از شبکه مدیریتی n می‌باشد. به علت نبود چاه کشاورزی در شبکه‌های مدیریتی ۳، ۲۹ و ۳۰، از تعداد کل متغیر تصمیم (۴۴ متغیر تصمیم) عدد ۳ کم شده است. بنابراین برای بدست آوردن کل متغیرهای تصمیم تعداد ۴۱ شبکه مدیریتی در ۸ ماه بهره‌برداری در سال ضرب می‌شود (41×8=328)

محدودیت: در مدل مدیریت آب زیرزمینی دو نوع از محدودیت‌های مدیریتی در نظر گرفته شده است. دسته اول شامل محدودیت‌های متغیرهای تصمیم QW_n هستند که برای اعمال آن‌ها ضرورتی در تولید ضرایب ماتریس پاسخ نمی‌باشد. حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم QW_n^u و QW_n^s که به ترتیب به معنای حداکثر و حداقل مجاز آب برداشت شده در منطقه می‌باشد. جهت انتخاب سناریوی مناسب بهره‌برداری، مدل شبیه‌سازی برای ۵۰ تا ۱۵۰ درصد مقادیر بهره برداری فعلی از چاه‌های کشاورزی اجرا گردید. سپس با توجه به بررسی عکس‌العمل‌های سفره نسبت به تغییرات برداشت، حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم به ترتیب ۷۰ و ۱۲۰ درصد برداشت فعلی در نظر گرفته شد.

به منظور آگاهی از میزان تغییرات سطح آب زیرزمینی در دشت شهرکرد، مدل شبیه‌سازی را برای حالت میزان بهره‌برداری فعلی و همچنین افزایش و کاهش درصدی از وضعیت بهره برداری فعلی اجرا نموده و با توجه به تغییرات ملاحظه شده نحوه مدیریت و انتخاب تابع هدف مشخص گردید.

$$QW_n^s \le QW_n \le QW_n^u \qquad (۲)$$

دسته دوم شامل محدودیت‌های بار هیدرولیکی هستند که در به کارگیری آن‌ها بایستی ضرایب پاسخ بین متغیرهای تصمیم و متغیرهای حالت سیستم آب زیرزمینی تولید شوند. برای تعیین این نوع محدودیت، در صورت وجود افت قابل توجه در شرایط فعلی مقدار ۹۰ درصد افت در شرایط فعلی و در صورت نبود افت قابل توجه در شرایط فعلی، میزان ثابت افت به عنوان مقدار افت مجاز بار هیدرولیکی در یک مکان و دوره تنش معین در نظر گرفته شده است.

$$dd_{i,j,k,t}=(h_{i,j,k,t})^0-h_{i,j,k,t} \qquad (۳)$$

$$dd_{i,j,k,t} \le dd^u_{i,j,k,t} \qquad (۴)$$

که در آن $dd_{i,j,k,t}$ معادل تفاوت بین ارتفاع اولیه و پایان دوره تنش t در مکان i,j و $dd^u_{i,j,k,t}$ حد بالای این پارامتر می‌باشد.

چاه‌های مشاهده‌ای بهترین گزینه به عنوان نقاط کنترل می‌باشند. اما از آنجایی که نحوه توزیع چاه‌ها به صورت یکنواخت نمی‌باشد و بر اساس مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی، بسیاری از نقاط دیگر واقع در محدوده بیلان دارای افت شدیدتری بوده‌اند، نقاط واقع در مرکز هر شبکه مدیریتی، به عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب میزان افت در هر یک از نقاط کنترل در نظر گرفته شده بر اثر تنش وارد شده از برداشت در هر شبکه می‌تواند به خوبی منعکس کننده خصوصیات آبخوان باشد. در دیگر نقاط واقع در مراکز شبکه-های مدیریتی افت در شرایط فعلی وجود نداشته و بنابراین به عنوان نقاط کنترل در نظر گرفته نشده‌اند.

به منظور بازنویسی محدودیت‌های بار هیدرولیکی تابع رابطه بین تنش‌های تحمیل‌شده در متغیرهای تصمیم و تغییرات حاصل شده در بار هیدرولیکی در موقعیت چاه‌های درنظرگرفته شده تولید می‌گردد. جهت انجام این کار از ماتریس پاسخ استفاده می‌شود.

روش حل مسئله مدیریت آب زیرزمینی: در شرایطی که محدوده آبخوان وسیع و سیستم مورد بررسی پیچیده باشد با توجه به اینکه گزینه‌های مختلفی شامل تعداد زیادی از دوره‌های تنش در افق زمانی بلندمدت تحلیل و بررسی می‌شود، هزینه‌های محاسباتی مدل‌سازی مسئله مدیریتی، قابل توجه خواهد بود. این مسئله کاربرد مدل‌های مدیریتی آب زیرزمینی که از لحاظ محاسباتی کارآمد می‌باشد را اجتناب ناپذیر می‌سازد. در این راستا با توجه به تحقیقات صورت گرفته توسط Pulido et al. (2008)، می‌توان از خطی‌سازی رابطه تنش و عکس العمل آبخوان به منظور ساده‌سازی رفتار سیستم

آبخوان استفاده نمود. با توجه به مطالب گفته شده، در این تحقیق جهت حل ماتریس پاسخ از روش برنامه‌ریزی خطی استفاده شده است.

همانطور کـه می‌دانید در برنـامه‌ریـزی خطی از روش سیمپلکس استفاده می‌شـود، روش سیمپلکس مستلزم تـولید رابطـه‌ای بین تنش‌های تحمیل شده در چاه‌های مدیریت شده (متغیرهای تصمیم مقدار جریان) و تغییرات حاصل شده در بار هیدرولیکی در هر یک از نقاط کنترل می باشد. رابطه بین بار هیدرولیکی و متغیر تصمیم، از بسط مرتبه اول سری تیلور بدست می آید.

$$h_{i,j,k,t}(QW)= h^{0}_{i,j,k,t}(QW^{0})+\sum_{n=1}^{N}\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial QW_n}(QW^{0})(QW_n-QW^{0}_n) \quad (۵)$$

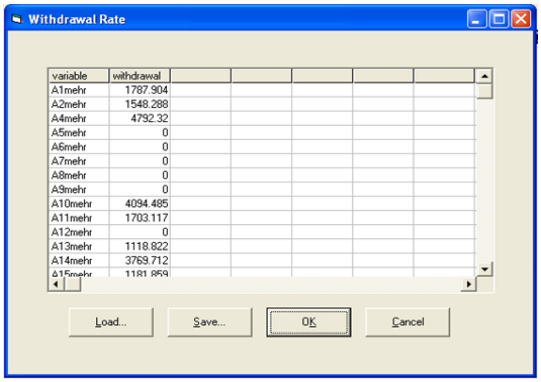
که در آن $h_{i,j,k,t}(QW)$ بار هیدرولیکی در موقعیت محدودیت i,j,k و دوره تنش t برای بردار (یا مجموعه) جدید از مقادیر جریان برداشت و یا تغذیه QW که دارای اجزای مستقل QW_n است، می‌باشد. $h^{0}_{i,j,k,t}(QW^{0})$ بار هیدرولیکی در موقعیت محدودیت i,j,k و دوره تنش t برای بردار جدید (مجموعه شرایط پایه) از مقادیر جریان برداشت و یا تغذیه QW^{0} که دارای اجزای مستقل QW^{0}_n است، می‌باشد. $\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial QW_n}(QW^{0})$ تغییر در بار هیدرولیکی موقعیت i,j,k و دوره تنش t بر اثر تغییر در برداشت و یا تغذیه در n امین متغیر تصمیم مقدار جریان و N تعداد کل متغیرهای تصمیم مقدار جریان می‌باشد. مشتقات جزئی که تعریف کننده ضرایب پاسخ هستند، به‌طور مستقیم محاسبه نمی‌شوند، بلکه به‌وسیله روش آشفتگی تفاضل محدود مرتبه اول[۱۶] تقریب زده می‌شوند. مشتق بار هیدرولیکی نسبت به هر متغیر تصمیم (ماتریس ضرایب پاسخ) به وسیله تقریب مرتبه اول معادلات تفاضل محدود (پیشرو) محاسبه می شود.

$$\frac{\partial h_{i,j,k,t}}{\partial QW_n}\approx\frac{\Delta h_{i,j,k,t}}{\Delta QW_n}=\frac{h_{i,j,k,t}\,(QW_{\Delta n})-h^{0}_{i,j,k,n}\,(QW^{0})}{QW_{\Delta n}} \quad (۶)$$

که در آن $QW_{\Delta n}$ مقدار آشفتگی برای n امین متغیر تصمیم مقدار جریان و $h_{i,j,k,t}\,(QW_{\Delta n})$ بار هیدرولیکی در موقعیت محدودیت i,j,k و دوره تنش t است که با استفاده از بردار مقادیر تنش برداشت و یا تغذیه $QW_{\Delta n}$ که تنها در جزء n به مقدار $QW_{\Delta n}$ متفاوت از بردار قبلی مقادیر تنش، QW^{0}، می‌باشد، محاسبه شده است.

۳- نتایج و بحث

بعد از آماده‌سازی آبخوان دشت شهرکرد جهت ورود به کد GGWM و تعریف شرایط بهینه‌سازی منطقه مورد مطالعه، مدل آماده اجرا می‌باشد. بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی با استفاده از این کد، نتایج به صورت excel قابل رویت می‌باشد (شکل ۸).



شکل ۸- نمایی از نحوه نمایش خروجی کد GGWM

نتایج بهینه‌سازی آبخوان مورد نظر به این صورت می‌باشد که مجموع برداشت سالانه از چاه‌های کشاورزی در شرایط بهینه ۸۷/۰۴۱ میلیون متر مکعب است، در صورتی که در شرایط فعلی ۹۴/۲ میلیون متر مکعب بوده است. بنابراین نسبت برداشت سالانه از چاه‌های کشاورزی در شرایط بهینه به شرایط فعلی ۰/۹۴۲ بدست آمد. در جدول ۱ نسبت ماهانه برداشت‌ها آورده شده است. همانطور که در جدول نشان داده شده، جهت مدیریت منطقه کاهش برداشت از چاه‌های کشاورزی بیشتر در ماه‌های گرم سال که نیاز کشاورزی بیشتر می‌باشد، صورت گرفته است.

با توجه به اینکه در این مسئله جهت بهینه سازی، رفتار آبخوان به صورت خطی درنظر گرفته شد، حال جهت اطمینان از این فرض، افت بدست آمده از مدل بهینه سازی با افت حاصل از شبیه سازی نتایج بهینه سازی مقایسه گردید (شکل ۹). افت شبیه‌سازی حاصل از برداشت بهینه، میزان افتی است که بعد از انجام بهینه‌سازی، مقادیر بهینه برداشت از چاه‌های کشاورزی به اضافه مقادیر شرب و صنعت در حالت فعلی را وارد مدل شبیه سازی نموده و بعد از اجرای مدل شبیه‌سازی مقادیر افت بدست می‌آید. مقایسه این افت‌ها در شکل ۹ نشان می‌دهد که به جز در تعدادی از نقاط کنترل تقریباً نتیجه مطلوبی داده است که این را می‌توان به فرض برهم پوشانی خطی مقادیر افت ناشی از برداشت در شبکه‌های مدیریتی مربوط دانست. بنابراین فرض خطی بودن آبخوان با مقدار کمی خطا همراه خواهد بود که می‌توان از آن صرف نظر نمود. جهت نشان دادن نتایج مدیریت در منطقه مورد مطالعه، نمودار مقادیر افت فعلی همراه با مقادیر افت بدست آمده بعد از شبیه سازی مدل با برداشت بهینه حاصل از مدل بهینه سازی در شکل ۱۰ آورده شده است. افت فعلی در اثر برداشت فعلی از چاه‌های کشاورزی به اضافه چاه‌های صنعت و شرب در آبخوان ایجاد می‌کند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، مدل بهینه‌سازی با اجرای سنـــاریوی ۳۰ درصد کاهش

جدول ۱- نسبت ماهانه برداشت‌ها از چاه‌های کشاورزی

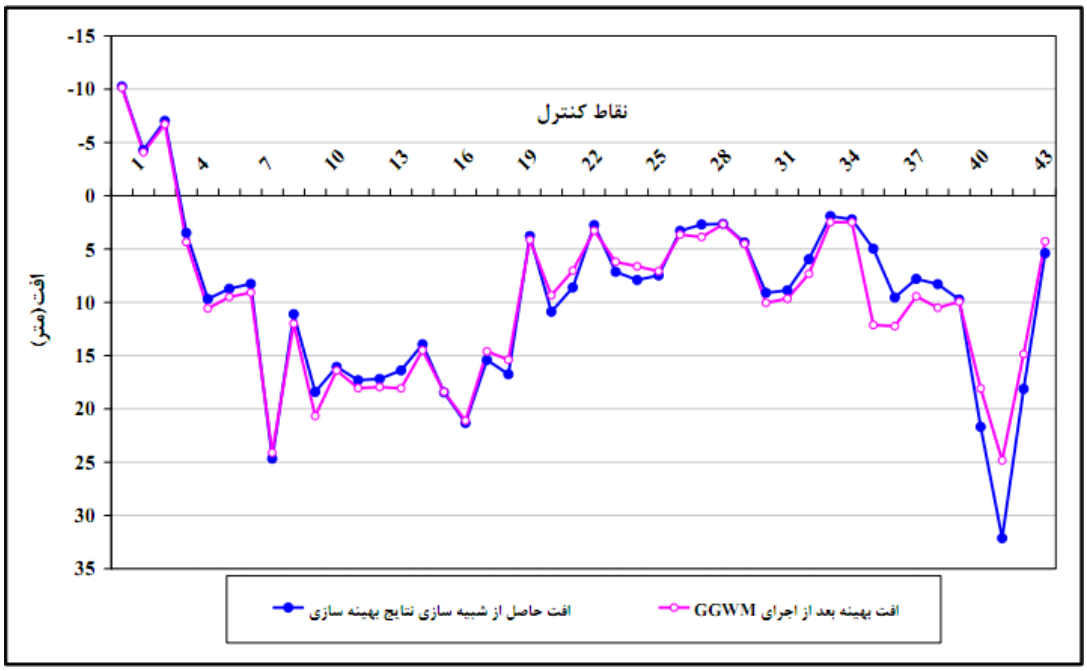
ماه	برداشت ماهانه فعلی	برداشت ماهانه بهینه	نسبت برداشت بهینه به فعلی
مهر	۱۱/۳۰۵	۱۱/۰۳۳	۰/۹۷۶
آبان	۷/۵۳۷	۷/۳۵۹	۰/۹۷۶
فروردین	۵/۶۵۳	۵/۳۹۲	۰/۹۵۴
اردیبهشت	۱۲/۲۴۷	۱۱/۴۹۰	۰/۹۳۸
خرداد	۱۵/۰۷۳	۱۳/۷۷۱	۰/۹۱۴
تیر	۱۴/۱۳۱	۱۲/۶۴۴	۰/۸۹۵
مرداد	۱۴/۱۳۱	۱۲/۴۳۲	۰/۸۸۰
شهریور	۱۴/۱۳۱	۱۲/۹۲۱	۰/۹۱۴

برداشت و ۲۰ درصد افزایش برداشت از چاه‌های کشاورزی نسبت به حالت فعلی، توانسته است مقدار افت را تا میزان زیادی کاهش دهد که بیشترین آن ۹/۹۰۲ متر در شبکه مدیریتی ۳۶ می‌باشد.

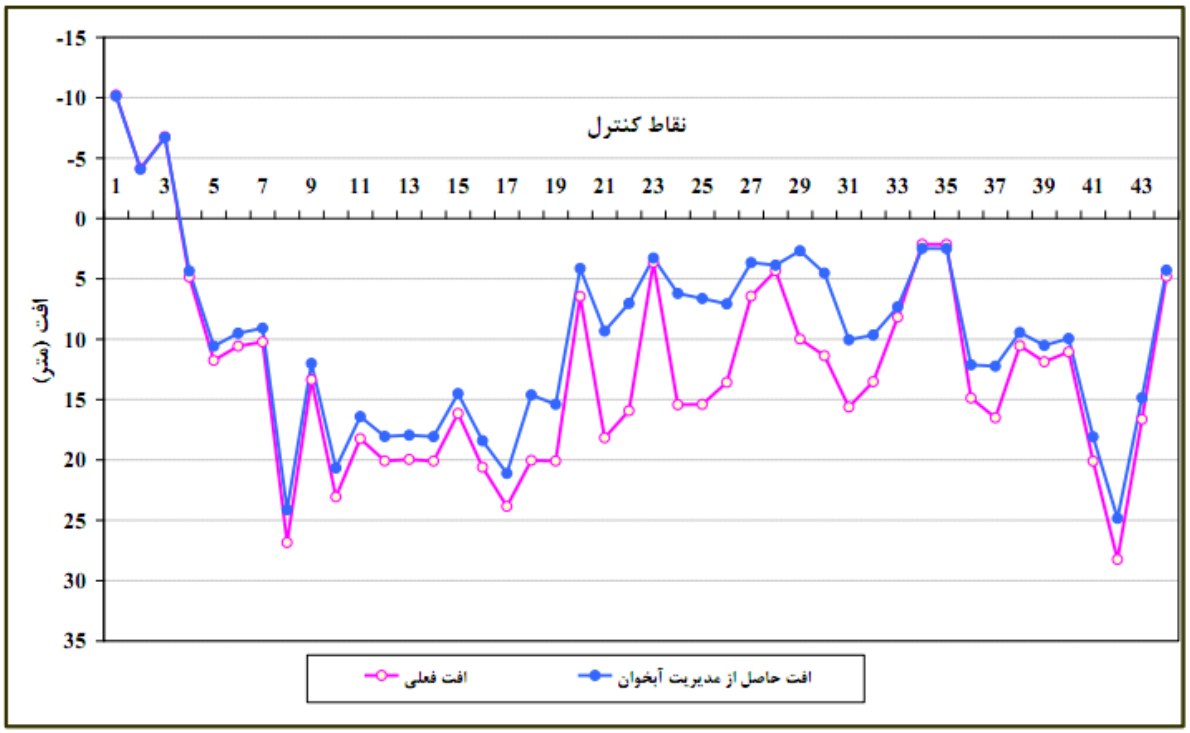
۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر جهت توسعه مدل مدیریت آب‌های زیرزمینی از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده گردید. در این راستا ابتدا رابط گرافیکی تحت عنوان کد گرافیکی مدیریت آب زیرزمینی (GGWM) با استفاده از کدهای GWM و MODFLOW-2000 توسعه یافت. سپس جهت تأیید کد تهیه شده آبخوان شهرکرد به عنوان مطالعه موردی انتخاب گردید. در ادامه، جهت تهیه مدل مدیریتی آبخوان شهرکرد، ابتدا، رفتار سیستم سفره آب‌زیرزمینی با استفاده از کد شبیه‌سازی MODFLOW تعیین گردید.

به دلیل حجیم بودن محاسبات در روش بهینه‌سازی غیرخطی، جهت حل مسئله بهینه‌سازی در GGWM، می‌توان سیستم آبخوان به صورت خطی فرض شود و از روش برنامه‌ریزی خطی استفاده نمود. بنابراین در منطقه مورد مطالعه با بررسی نتایج مدل شبیه‌سازی آبخوان و در نظر گرفتن شرایط منطقه، مدل بهینه‌سازی در سیستم خطی انجام گرفت. هدف مدیریت آبخوان شهرکرد، پایین آوردن ۱۰ درصدی افت سطح ایستابی با استفاده از اجرای سناریوی ۳۰ درصد کاهش برداشت و ۲۰ درصد افزایش برداشت از چاه‌های کشـــاورزی



شکل ۹- مقایسه افت بهینه بعد از اجرای کد GGWM و افت حاصل از شبیه‌سازی نتایج GGWM



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر افت فعلی و افت حاصل از مدیریت آبخوان (اجرای کد GGWM)

نسبت به حالت فعلی می‌باشد. نتایج کلی که از اجرای مدل بهینه سازی دشت شهرکرد بدست آمد، نشان داد که مدل بهینه‌سازی مورد استفاده در این تحقیق، (GGWM)، توانسته است با ۹۲/۳۹ درصد برداشت نسبت به شرایط فعلی، افت را به میزان ۱۰ درصد کاهش دهد و بعد از انجام شبیه‌سازی مقادیر برداشت بهینه، بیشترین مقدار افت مشاهده شده، ۹/۹۰۲ متر، در شبکه مدیریتی ۳۶ بدست آمد. مقایسه مقادیر افت در شرایط بهینه حاصل از مدل بهینه سازی و شبیه‌سازی نتایج بهینه‌سازی حاکی از این است که می‌توان با پذیرفتن درصد ناچیز خطا نتیجه گرفت که رفتار آبخوان خطی می‌باشد، و با توجه به نتایج موفقیت آمیز GGWM، این مدل می‌تواند برای مدیریت کمی آب زیرزمینی در هر دشت دیگری مورد استفاده قرار گیرد.

پی نوشت‌ها

1- U.S. Geological Survey
2-Ground Water Management
3- Flow-rate decision variables
4- External decision variables
5- Binary variables
6- Decision Variable Constraints
7- Linear summation constraints
8- Hydraulic head constraints
9- Streamflow constraints
10- Linear programming
11- Nonlinear programming
12- Mixed-binary linear
13-Graphical Ground Water Management
14- Visual Basic
15- Dynamic Link Library
16- First order, finite difference perturbation method

۵- مراجع

جوادیان‌زاده م م (۱۳۷۷) تهیه مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی آب‌های زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.

دشتی س (۱۳۸۵) مدیریت بهره‌برداری تلفیقی از سیستم چندهدفه منابع آب سطحی و زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

شمسایی الف، فرقانی ع (۱۳۹۰) بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی در مناطق خشک. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره۲: ۲۶-۳۶.

کتابچی ح، عطایی آشتیانی ب (۱۳۹۰) توسعه الگوریتم جامعه مورچه‌ها به صورت تلفیقی با مدل شبیه‌سازی عددی برای مدیریت بهینه آبخوان‌های ساحلی. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۷، شماره ۱: ۱-۱۲.

علیمحمدی س (۱۳۸۴) طراحی و بهره‌برداری بهینه تلفیقی از سیستم آب‌های سطحی و زیرزمینی–رویکرد ذخیره سیکلی. پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

قادری ک، اسلامی ح ر، موسوی س ج (۱۳۸۵) بهره‌برداری بهینه تلفیقی از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دشت تهران–شهریار. مجموعه مقالات دومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، اصفهان، ایران، ۳و ۴ بهمن.

قزاق الف (۱۳۸۶) بهره‌برداری بهینه از آب‌های زیرزمینی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی منابع آب، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران.

Abdeh-Kolahchi A, Satish MG, Ketata C, Islam MR (2009) Sensitivity analysis of genetic algorithm parameters in groundwater monitoring network optimization for petroleum contaminant detection. Advances in Sustainable Petroleum Engineering and Science 1(3):305-318.

Ahlfeld D, Heidari M (1994) Applications of optimal hydraulic control to groundwater systems. Journal of Water Resources Planning & Management 120(3):350-365.

Ahlfeld DP, Barlow PM, Mulligan AE (2005) GWM-A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000). U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1072, 124 p.

Ahlfeld DP, Riefler G (2003) Documentation for MODOFC-A program for solving optimal flow control problems based on MODFLOW simulation. Version 2.3: Amherst, MA, University of Massachusetts Department of Civil and Environmental Engineering, 48 p.

Ahlfeld DP, Sawyer CS (1990) Well location in capture zone design using simulation and optimization techniques. Groundwater 28(4):507-512.

Aquado E, Remson I (1974) Groundwater hydraulics in aquifer management. Journal of the Hydraulics Division – ASCE 100 (1):103–118.

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

Kholghi M, Razazck M, Treichel W (1996) Modelisation et gestion quantitative des systemes hydrauliques nappe- riviere par l'approche matrice des reponses unitaires. Hydrolgeologie 4:11-20.

Pulido-Velazquez D, Ahlfeld D, Andrew J, Sahuquillo A (2008) Reducing the computational cost of unconfined groundwater flow in conjunctive-use models at basin scale assuming linear behaviour: The case of Adra- Campo de Dalı´as. Journal of Hydrology 353:159-179.

Schwarz J (1976) Linear models for groundwater management. Journal of Hydrology 28:377–392.

Tamer Ayvaz M (2009) Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models. Advances in Water Resources 32(6):916- 924.

Tamer Ayvaz M, Karahan H (2008) A Simulation/ optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates. Journal of Hydrology 357(1-2):76-92.