نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره3، جلد9، مرداد - شهریور 1394، ص. 479-469

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 9, Aug.-Sep. 2015, p. 469-479

ارائه مدل شبیه ساز-بهینه ساز چندهدفه کمی بهره‌برداری از آبخوان به منظور تعیین سیاست برداشت بهینه

صادق صادقی طبس[1*]، محسن پوررضا بیلندی[2]، ابوالفضل اکبرپور[3] و سیده زهرا صمدی[4]

تاریخ دریافت: 1393/12/13 تاریخ پذیرش: 1394/5/28

چکیده

وجود دوره‌های خشکسالی و هم‌چنین افزایش مصرف آب در منطقه مورد مطالعه (دشت بیرجند) سبب شده است که بخش‌های اجرایی به سمت بهره‌برداری بیش‌تر از سفره‌های آب زیرزمینی روی آورند. به این ترتیب مدیریت بهره‌برداری از سفره می‌تواند از به وجود آمدن افت شدید سطح آب در این آبخوان و ایجاد فاجعه جبران‌ناپذیر جلوگیری کند. جهت نیل به این امر مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی برای آبخوان دشت بیرجند ارائه گردید. مدل پیشنهادی تلفیقی از مدل شبیه‌سازی آبخوان (MODFLOW2005-NWT) و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه (AMALGAM) در محیط برنامه‌نویسی MATLAB می‌باشد. مدل جهت تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان واسنجی و صحت‌سنجی گردید. در مدل بهینه‌سازی، کمینه نمودن سه تابع کمبود ناشی از عدم تأمین نیازها، افت سطح ایستابی و شاخص اصلاح شده کمبود به‌عنوان اهداف مدل لحاظ گردید. مدل ارائه شده برای یک دوره یکساله با 12 دوره تنش ماهیانه اجرا شده و جبهه پارتو بهینه حاصل گردید. به‌عنوان یک نمونه از جواب‌های پارتو بهینه محاسبه شده، مشاهده شد در زمانی که سطح ایستابی ثابت بماند، مقدار 14/4 میلیون متر مکعب از نیازها با کمبود مواجه شده و شاخص اصلاح‌شده کمبود برابر 3/95 می‌گردد. جهت تعیین بهترین گزینه سیاست برداشت بایستی با در نظر گرفتن معیارهای اقتصادی، اجتماعی و پیامدهای زیست محیطی توسط مسئولین و سیاست‌گذاران مربوطه، جواب بهینه مناسب از میان سایر جواب‌های بهینه پارتو انتخاب شده و مقادیر برداشت متناظر با جواب منتخب تعیین گردد. با تحلیل نتایج حاصل از به‌کارگیری ساختار پیشنهادی می‌توان دریافت که رویکرد ارائه شده کارایی بسیار بالایی در تعیین سیاست بهینه آبخوان دارد.

واژه‌های کلیدی : الگوریتم AMALGAM، جبهه پارتو، سیاست بهینه برداشت، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، MATLAB

مقدمه

امروزه بخش مهمی از آب مورد نیاز بخش‌های مختلف مصرف، از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که در دو دهه اخیر، افراط در بهره برداری از آب‌های زیرزمینی، باعث افت شدید سطح آب در اکثر آبخوان‌های کشور شده است. این افت که گاهی اوقات به بیش از ده متر نسبت به چند سال گذشته می‌رسد، بدون شک برای منابع طبیعی کشور یک فاجعه محسوب می‌شود. جهت حل این مشکل، کارشناسان آب زیرزمینی با بهره‌گیری از بهینه‌سازی آب زیرزمینی سعی در ارائه یک برنامه مدیریتی مناسب برای آبخوان هر منطقه با توجه به مشکلات آن منطقه دارند. هدف از مدیریت آب‌های زیرزمینی در یک محل، در واقع بیش‌ترین استفاده ممکن از این منابع برای رفع نیازهای استفاده‌کنندگان در منطقه می‌باشد. نحوه مدیریت بایستی به ترتیبی باشد که از اثرات زیان‌آوری مانند برداشت مازاد، نامناسب شدن کیفیت آب و نشست زمین بر اثر پمپاژ بیش از اندازه در حال و آینده جلوگیری نماید (Chiang and Kinzelbach, 2001). از این رو از دهه 1960 به طور روزافزون مدل‌های عددی جریان آب زیرزمینی به عنوان ابزارهای مهمی در تحلیل سیستم‌های منابع آب زیرزمینی وارد شدند. در حقیقت مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل می‌باشند که چگونگی جریان آب زیرزمینی را تحت حاکمیت خود دارند (Prickett, 1975). دوپیت، تیم، بوسینسکیو و فرشهایمر اولین افرادی بودند که از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی استفاده کردند (Zheng and Bennett, 2002). از جمله برنامه‌هایی که دارای قابلیت‌های بسیار خوبی در مطالعات آب زیرزمینی می‌باشد و هم‌اکنون در بسیاری از

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه بیرجند
2 - استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند
3 - دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه بیرجند
4- استادیار گروه مهندسی منابع آب دانشگاه کارولینای جنوبی
(* نویسنده مسئول: Email: sadeghitabas@yahoo.com)

کشورهای جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، رابط GMS[1] است که عمدتاً به روش‌های عددی تفاضل محدود و اجزای محدود به شبیه‌سازی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. GMS محیطی جامع و گرافیکی برای شبیه‌سازی‌های جریان آب زیرزمینی است که شامل یک رابط[2] کارتوگرافیکی کاربر دوست[3] (برنامه GMS) و تعدادی برنامه‌های اجرایی مستقل نظیر MODFLOW، MT3DMS، MODPATH و غیره می‌باشد. از معایب این نرم افزار و دیگر نرم‌افزارهای مشابه عدم انعطاف‌پذیری در لینک برنامه‌ای اجرایی با مدل‌هایی نظیر مدل‌های عدم قطعیت و بهینه‌سازی می‌باشد که ضرورت این مورد در بسیاری از مسائل مدل‌سازی مانند مدیریت آبخوان و بهینه‌سازی کمی و کیفی بهره‌برداری از آن، اجتناب ناپذیر است. مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از کد منبع باز[4]، سبب انعطاف‌پذیری شبیه‌سازی توسط این‌گونه مدل‌ها نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی که تاکنون در زمینه آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است، می‌گردد.

اخیراً مدل‌های آب زیرزمینی با روش‌های مختلف بهینه‌سازی برای تعیین استراتژی مدیریت منابع آب و بهترین مجموعه جواب با توجه به تابع هدف و محدودیت‌ها ترکیب شده اند (Ahlfeld et al, 2005). به طور کلی جهت بهینه‌سازی سیستم آب زیرزمینی یک منطقه ابتدا باید مدل ریاضی آبخوان منطقه مورد نظر تهیه گردد. در استفاده از مدل ریاضی جهت بهینه‌سازی سفره‌های آب‌های زیرزمینی دو نگرش وجود دارد. در نگرش اول با استفاده از مدل ریاضی (شبیه‌سازی)، رفتار آبخوان را از لحاظ خطی یا غیرخطی بودن تشخیص داده و رابطه بین مقادیر برداشت و افت سطح آب زیرزمینی را محاسبه می‌کنند. سپس با استفاده از معادله به‌دست آمده، بهینه‌سازی سیستم آب زیرزمینی را انجام می‌دهند. به خاطر سهولت این روش، محققان زیادی از جمله آکوادو و همکاران برای پیش‌بینی تعداد بهینه چاه‌ها، کلاهچی و همکاران (2006) در بهینه‌سازی کیفی آب زیرزمینی و علیمحمدی (1384)، در بهینه‌سازی سیستم ذخیره سیکلی از این نگرش استفاده نمودند (Aquado et al, 1974). نگرش دوم در بهینه‌سازی سفره‌های آب زیرزمینی، استفاده از مدل تلفیقی شبیه‌سازی- بهینه‌سازی است. در این نگرش بعد از واسنجی مدل شبیه‌سازی و تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان، تابع هدف و محدودیت‌های مدل بهینه‌سازی، تلفیق 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 (جنت رستمی و همکاران، 1390). الفلد و همکاران (1990)، از این روش برای اصلاح آلودگی آب زیرزمینی استفاده نمودند، در این مطالعه آن‌ها موقعیت چاه‌ها و سرعت پمپاژ را با مینیمم کردن هزینه به‌دست آوردند (Ahlfeld and Sawyer, 1990). بارلو و همکاران، مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی جریان آب زیرزمینی که شبیه‌سازی آن به صورت عددی و بهینه‌سازی آن با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی انجام می‌گیرد را ارائه نمودند (Barlow et al, 2003).

در حالی که در دنیای واقعی بایستی بهینه‌سازی همزمان چندین هدف و دستیابی به چندین معیار متضاد انجام گیرد، معمولاً برای پیدا کردن جواب‌های مسائل چند هدفه، از ترکیب اهداف برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در حالی که این گونه مسائل باید به صورت چند هدفه مورد بررسی قرار گیرند (Emadi and Khademi, 2011). بر خلاف بهینه‌سازی تک هدفه که در آن جواب بهینه واحد جستجو می‌شود، در مسائل چند هدفه، به دلیل تبادل بین اهداف متضاد جواب بهینه واحدی وجود ندارد و باید چندین جواب بهینه که مجموعه غیر مغلوب نامیده می شود را جستجو نمود.(Oliveira and Loucks, 1997) در این گونه مسائل پیدا کردن جواب‌های بهینه در چنین فضایی برای روش‌هایی بر پایه گرادیان کاری دشوار است. یکی از مفاهیمی که کارایی خود را در حل بسیاری از مسائل چند هدفه نشان داده است و در بسیاری از الگوریتم‌های چند هدفه مورد استفاده قرار گرفته است، روش مبتنی بر پارتو[5] می‌باشد. یک مفهوم مهم در روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر پارتو مفهوم غالب بودن[6] است. جواب i بر جواب j غالب می‌باشد اگر دو شرط زیر برقرار باشد:

جواب i از دید هیچ یک از توابع هدف از جواب j بدتر نباشد.

جواب i حداقل در یکی از توابع هدف از جواب j بهتر باشد.

مجموعه همه جواب‌هایی که دو شرط بالا را داشته باشند، جبهه پارتو[7] نامیده می‌شود. الگوریتم‌هایی مانند NSGA-II[8] ، MOPSO[9] ، SPEA-II[10]، و AMALGAM[11] بر پایه مفهوم پارتو استوار شده‌اند. اسکوپوس و همکاران، الگوریتم چندهدفه فراکاوشی را برای واسنجی مدل جریان آب سطحی و زیرزمینی در اراضی کشاورزی واقع در مکزیکو استفاده نمودند(Schoups, 2005) . بکل و نیکلو، مدل نیمه

1- Groundwater Modeling System
2- Interface
3- User friend
4- Open source code

5- Pareto
6- Dominate
7- Pareto Front
8- Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II)
9- Multi Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)
10- Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA-II)
11- A Multi Algorithm, Genetically Adaptive Multi-objective (AMALGAM)

گسترده حوضه‌ای که به عنوان ابزاری برای ارزیابی منابع آب و خاک می‌باشد، را با استفاده از الگوریتم NSGA-II واسنجی نمودند (Bekele and Nicklow, 2007). طبری و سلطانی در تحقیقی سیاست بهینه برداشت از منابع آب به صورت تلفیقی را بر پایه‌ی نظرات و سیاست‌های تصمیم‌گیران تأمین آب با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و SGA تعیین نمودند. نتایج نشان از کارایی بالای سیاست ارائه شده در جهت بهبود پتانسیل‌های آبی منطقه و جلوگیری از تلفات بی‌رویه آب، داشت (Tabari and Soltani, 2013).

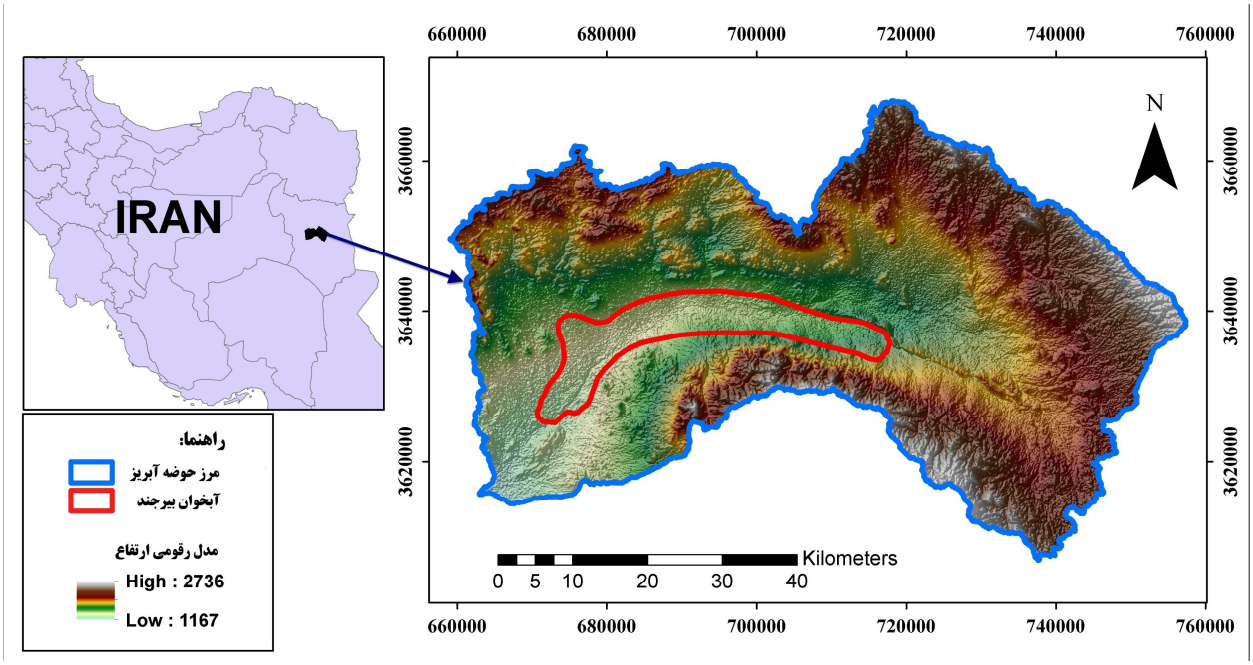
هدف از این تحقیق به‌دست آوردن مقادیر بهینه برداشت از سفره آب زیرزمینی دشت بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی می‌باشد، به‌طوری که اهداف متناقض کمینه شدن نیازهای برآورد نشده، افت سطح ایستابی و شاخص اصلاح شده کمبود در تعادل باشند. به عنوان یکی دیگر از جنبه‌های قابل توجه مطالعه حاضر، ارائه ساختاری بر پایه روابط حاکم بر شبیه‌سازی کمی آبخوان به صورت کد منبع باز (در محیط برنامه‌نویسی MATLAB) است که این امر سبب انعطاف‌پذیری شبیه‌سازی توسط مدل ارائه شده نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی که تاکنون در زمینه آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است، می‌گردد.

مواد و روش‌ها

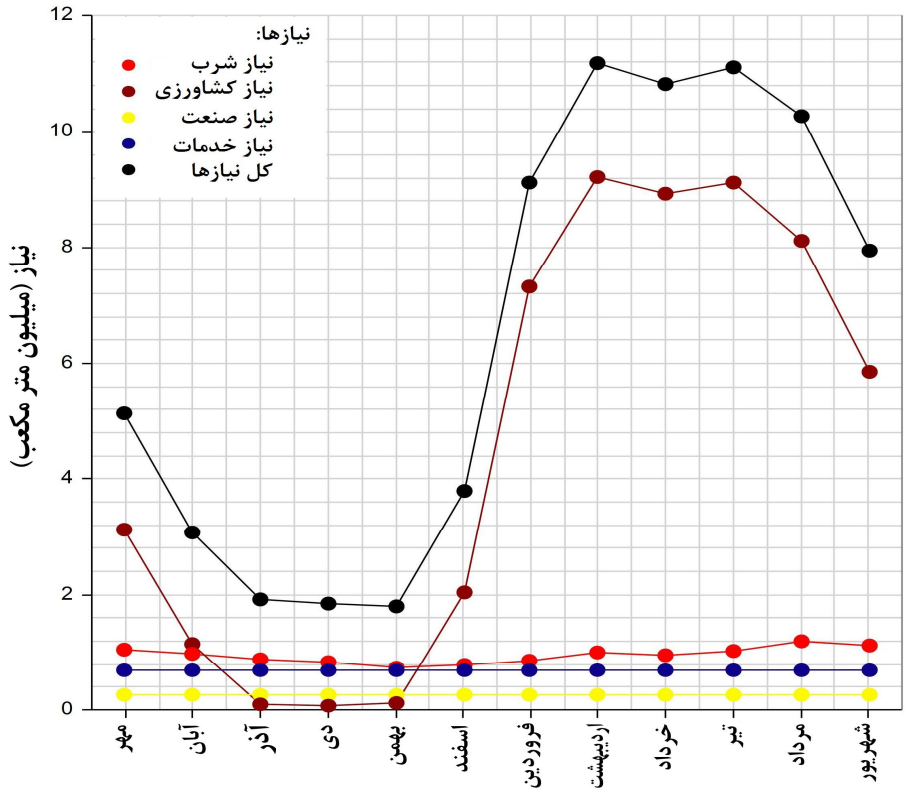
موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

آبخوان دشت بیرجند با مساحت 265 کیلومترمربع و متوسط ضخامت اشباع 30 متر، در استان خراسان جنوبی واقع گردیده است (شکل 1). وسعت کل حوضه آبریز دشت بیرجند در حدود 3408 کیلومتر مربع بوده که از این میزان حدود 1383 کیلومترمربع را دشت و مابقی را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. دشت بیرجند طبق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. از نظر توپوگرافی حداکثر ارتفاع دشت بیرجند 2736 متر و حداقل ارتفاع آن 1167 متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد است. شیب زمین در قسمت های شرقی زیاد بوده و هرچه به سمت غرب و قسمت‌های انتهایی دشت حرکت می‌کنیم شیب آن کم شده و سطح زمین تقریباً حالت مسطح دارد.

نیازهای آبی منطقه مورد مطالعه به چهار دسته‌ی نیازهای شرب، کشاورزی، صنعت و خدمات تقسیم می‌شوند که مقادیر آن‌ها در شکل 2 ذکر گردیده است.



شکل1- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل2-مقادیر نیازهای شرب، کشاورزی، صنعت و خدمات در منطقه مورد مطالعه بر حسب (MCM)

مبانی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی

مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی در واقع فرم ریاضی معادله بیلان را در یک منطقه حل می‌کند و به طور کلی با فرض پیوستگی محیط[1] ساخته می‌شود. با این نگرش، معادلات بیلان برای یک محدوده از آبخوان نوشته شده و سپس به محدوده‌های مجاور تعمیم داده می‌شود. تحت این شرایط معادله بیلان به شکل یک معادله دیفرانسیل جزئی در می‌آید. هر جمله در این معادله معرف مقدار خاص یک پارامتر در واحد سطح، حجم یا زمان می‌باشد. به طور خلاصه یک مدل ریاضی که برای شبیه‌سازی جریان آب‌های زیر زمینی به کار می‌رود، مجموعه‌ای از مقادیر عددی پارامترهای مختلف در معادله بیلان می‌باشد.

معادلات حاکم بر جریان در آب‌های زیرزمینی

فرم کلی معادله حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_s\frac{\partial h}{\partial t}\mp R \qquad (1)$$

که در رابطه فوق، k_x، k_y و k_z مؤلفه‌های تانسور هدایت هیدرولیکی، h بار پتانسیل، S_s ذخیره ویژه و R مؤلفه تغذیه‌کننده یا تخلیه‌کننده (به ترتیب با علامت مثبت یا منفی) آبخوان می‌باشند(Anderson and Woessner, 1992).

در آبخوان‌های آزاد ضخامت لایه اشباع با تغییر ارتفاع سطح آب زیرزمینی تغییر می‌کند. برای حل معادله جریان در این حالت دوپویی در سال 1863 فرضیاتی را وضع کرد که عبارت‌اند از:

الف) جریان افقی است.

ب) شیب هیدرولیکی مساوی شیب سطح آزاد می‌باشد.

معادله‌ای که بر اساس فرضیات دوپویی و معادله پیوستگی در شرایط وجود جریان سه بعدی و ناماندگار استخراج گردیده عبارت است از:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y h\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z h\frac{\partial h}{\partial z}\right)=S_y\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2)$$

که در این رابطه، S_y آبدهی ویژه است. مدل عددی MODFLOW از روابط (1) و (2) برای محاسبه ارتفاع سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف آبخوان، استفاده می‌کند(شمسایی، 1377).

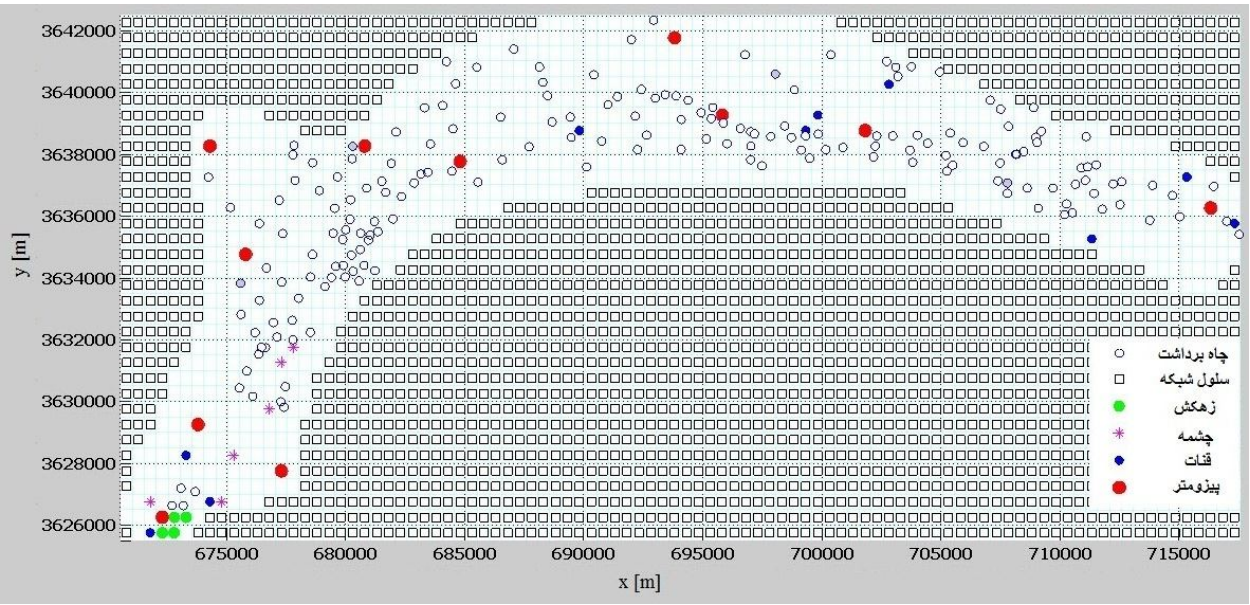
مدل کمی آبخوان

در این تحقیق برای ساخت مدل جریان در منطقه مورد مطالعه، از هفت لایه اطلاعاتی[2] برای ورود داده‌های مرز آبخوان، پیزومترها، چاه‌ها، تغذیه سطحی، زهکش، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره استفاده شد این مرزها شامل 9 جبهه ورودی و یک جبهه خروجی آب

1 Continuum Approach

2 Coverage

زیرزمینی به صورت زهکش است.



شکل3- شبکه بندی آبخوان و موقعیت چاه‌ها، پیزومترها و زهکش منطقه مورد مطالعه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB

نوسانات سطح آب مشاهداتی در 11 پیزومتر موجود در آبخوان، مورد استفاده قرار گرفت. تعداد 190 حلقه چاه شامل 139 چاه کشاورزی، 31 چاه شرب و 20 چاه صنعتی در مدل گنجانده شد. هم-چنین تعداد 6 عدد چشمه و 11 حلقه قنات موجود در آبخوان در مدل گنجانده شد (شکل 3).

با توجه به اقلیم خشک منطقه و بارش ناچیز نزولات جوی (کم‌تر از 150 میلی‌متر درسال)، تغذیه در مدل تنها ناشی از آب برگشتی شرب و کشاورزی (به میزان ناچیز) و هم‌چنین از طریق جبهه‌های ورودی به آبخوان در نظر گرفته شد. مرحله بعد شامل طراحی شبکه مدل، انتخاب دوره‌های تنش[1] و گام‌های زمانی[2]، تعیین شرایط اولیه و مرزی، تعیین نوع و تعداد لایه آبدار و غیره است. برای اینکه بتوان معادلات دیفرانسیل جزئی را حل نمود بایستی محیط را به اجزای کوچک‌تری که اصطلاحاً شبکه می‌نامند، تقسیم نمود. شبکه‌بندی دشت با 34 سطر و 94 ستون از سلول‌هایی مربعی شکل در ابعاد 500 ×500 متر در یک لایه طراحی شد. پس از تعریف شبکه، سلول‌هایی که خارج از مرز آبخوان قرار داشته و نیاز به محاسبات در آن‌ها نبود، با قرار دادن کد صفر در محل سلول، غیرفعال گردیدند. در نهایت تعداد 1077 سلول از سلول‌های شبکه، فعال در نظر گرفته شدند (شکل 2). جهت اعمال مقادیر هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب ذخیره (S_y)، سطح دشت به چندین منطقه همگن تقسیم و مقادیر اولیه به صورت تخمینی به آن‌ها اختصاص داده شد. سپس این مقادیر با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی *COA*[3] در محیط *MATLAB* واسنجی و صحت‌سنجی شد. مدل‌سازی جریان دشت بیرجند برای یک سال، از مهر 1389 تا مهر 1390 انجام گرفت. جهت انجام مدل‌سازی از 12 دوره تنش یک‌ماهه با گام‌های زمانی ده روزه استفاده شد، یعنی برای هر دوره تنش به سه گام زمانی جهت محاسبات اکتفا گردید.

با توجه به اطلاعات به‌دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی تنها یک لایه آبدار و آن هم از نوع آزاد در دشت بیرجند وجود دارد. در انتها جهت تکمیل مدل عددی، مقادیر ارتفاع مطلق سنگ کف، توپوگرافی و سطح آب اولیه مشاهده‌ای در 11 پیزومتر موجود (شرایط اولیه[4]) با استفاده از ابزار درون‌یابی در محیط GIS[5] به روش کریجینگ[6] درون‌یابی و به تمامی سلول‌های شبکه اختصاص داده شد.

لازم به ذکر است برای حل عددی معادله دیفرانسیل جزئی جریان، از برنامه MF2005NWT[7] که از تحلیل‌گر نیوتن[8] برخوردار است به همراه بسته UPW[9] در محیط mfLab (Olsthoorn, 2013) استفاده شد.

1- Stress Period
2- Time Step

3- Cuckoo Optimization Algorithm (COA)
4- Initial Condition
5- Geographical Information System
6- Kriging
7- Modflow-2005-NWT
8- Newton Solver
9- Upstream Weighting Package

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه AMALGAM

در مقایسه با مسائل تک‌هدفه که در آن‌ها به دنبال یک جواب بهینه هستیم، در مسائل چند هدفه به ندرت یک جواب قابل پذیرش موجود است. در این مسائل با مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه روبرو می‌شویم که بر یکدیگر برتری ندارند و اصطلاحاً به آن‌ها بهینه پارتو[1] پارتو[1] گفته می‌شود. این مجموعه جواب‌ها از این جهت بهینه هستند که راه حل بهتری نسبت به آن‌ها با در نظر گرفتن تمام اهداف وجود ندارد. جواب مساله بهینه‌سازی با چند هدف، یک حل یگانه به عنوان بهینه کلی نمی‌باشد. در عوض در بهینه‌سازی چند منظوره، هدف ما یافتن یک دسته از جواب‌های بهینه پارتو است.

یکی از جدیدترین الگوریتم‌های چند هدفه هوشمند الگوریتم *AMALGAM* بود که توسط روت و رابینسون در سال 2007 ارائه گردید(Vrugt and Robinson, 2007). روش *AMALGAM* ترکیبی از دو مفهوم جدید می‌باشد و در دو حالت فرآیند تکامل در آن صورت می‌گیرد. در حالت اول از قابلیت‌های تکاملی چهار الگوریتم چندهدفه *NSGA-II*، *PSO*، *DE* و *AMS* به صورت همزمان جهت تکامل جمعیت استفاده می‌کند و در حالت دوم از قابلیت تکامل خود الگوریتم *AMALGAM* جهت تکامل جمعیت استفاده می‌گردد. این الگوریتم به‌دلیل استفاده همزمان از چند الگوریتم چندهدفه هوشمند دیگر، الگوریتم ترکیبی[2] چند هدفه نامیده می‌شود. ناگفته نماند در این این الگوریتم نیز مقدار برازندگی هر عضو از جمعیت بر اساس مفهوم غلبه پارتو (*FNS*[3]) تعیین می‌گردد.

در تحقیق ژانگ و همکاران، مقایسه‌ای بین روش‌های بهینه-سازی چند هدفه ساده[4] *NSGA-II*، *SPEA-II* و روش بهینه‌سازی چندهدفه ترکیبی *AMALGAM* در واسنجی مدل هیدرولوژیکی *SWAT* انجام گرفت. نتایج نشان داد الگوریتم ترکیبی چند هدفه *AMALGAM* کارایی بیش‌تری نسبت دو روش دیگر (روش‌های بهینه سازی چندهدفه ساده) در واسجی مدل هیدرولوژیکی *SWAT* دارد (Zhang et al, 2010).

متغیرهای تصمیم و توابع هدف در مدل بهینه‌سازی

متغیرهای تصمیم مدل بهینه‌سازی، مجموع مقادیر برداشت از سفره آب‌های زیرزمینی (190 چاه) در ماه‌های مختلف (12 متغیر) می‌باشد. هم‌چنین توابع هدف مورد استفاده به صورت زیر تعریف می-گردد:

حداقل نمودن مجموع نیازهای برآورده نشده[5] که رابطه آن در زیر زیر قرار گرفته است، به عنوان تابع هدف اول لحاظ گردید.

$$MIN\ \left\{ Shortage = \sum_{t=1}^{n} (\mathrm{TD}_t - TW_t) \right\} \qquad (3)$$

در این رابطه TW_t میزان برداشت از سفره در دوره زمانی t (بر حسب *MCM*)، TD_t میزان نیاز در دوره زمانی t (بر حسب *MCM*)، n تعداد کل دوره‌های زمانی (ماه) است.

با توجه به این که تابع هدف فوق تنها مجموع کمبودها در طول دوره را کمینه نموده و توزیع کمبود در ماه‌های مختلف مد نظر قرار نمی‌گیرد، لذا از شاخص اصلاح شده کمبود (*MSI*[6]) نیز به عنوان تابع هدف دوم استفاده گردید. استفاده از شاخص مذکور از حیث جنبه‌های اقتصادی واجتماعی اهمیت دارد. کاربرد این تابع هدف توسط محققین زیادی گزارش شده است (Hsu and Cheng, 2002, Chang et al, 2005, Tu et al, 2008).

$$MIN\ \left\{ MSI = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^{n} \left(\frac{TS_t}{TD_t}\right)^2 \right\} \qquad (4)$$

در این رابطه TS_t میزان کمبود در دوره زمانی t، TD_t میزان نیاز در دوره زمانی t، n تعدادکل دوره‌های زمانی (ماه) است. وجود توان دو در این رابطه باعث می‌شود کمبودهای شدیدتر وزن بالاتری در تابع مذکور داشته باشند و بنابراین با سرعت بیش‌تری کاهیده شوند.

لازم به ذکر است نیاز شرب در تمام دوره‌های زمانی بایستی کاملاً برآورده گردد، لذا ابتدا مقادیر نیاز شرب از آب برداشتی کسر و سپس مقادیر کمبود برای سایر نیازها (کشاورزی، صنعت و خدمات) محاسبه گردید.

در نهایت حداقل نمودن افت سطح ایستابی (رابطه 5) نیز به عنوان تابع هدف سوم مورد استفاده قرار گرفت.

$$MIN\ \left\{ DrawDown = \overline{H}_0 - \overline{H}_{end} \right\} \qquad (5)$$

در رابطه فوق $\overline{H}_0$ میانگین هد آب در سطح آبخوان (تمامی سلول‌های شبکه) در ابتدای دوره (برحسب m) و $\overline{H}_{end}$ میانگین هد آب در سطح آبخوان در انتهای دوره شبیه‌سازی (بر حسب m) می‌باشد.

تهیه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی جهت تعیین سیاست بهینه برداشت

منظور از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، تلفیق مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی است. پس از ایجاد مدل شبیه‌ساز کمی آبخوان، برای دستیابی به هدف اصلی این تحقیق (تعیین

1- Pareto-Optimal
2- Multi-algorithm
3- Fast Non-dominated Sorting
4- Single Algorithm EMO Method
5- Sum of Deficits
6- Modified Shortage Index

سیاست بهینه برداشت)، نیاز به تلفیق مدل شبیه‌ساز با الگوریتم بهینه-ساز(*AMALGAM*) می‌باشد. در نتیجه با نوشتن برنامه میانجی، ارتباط بین مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی، برقرار گردیده و مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز حاصل گردید.

نتایج و بحث

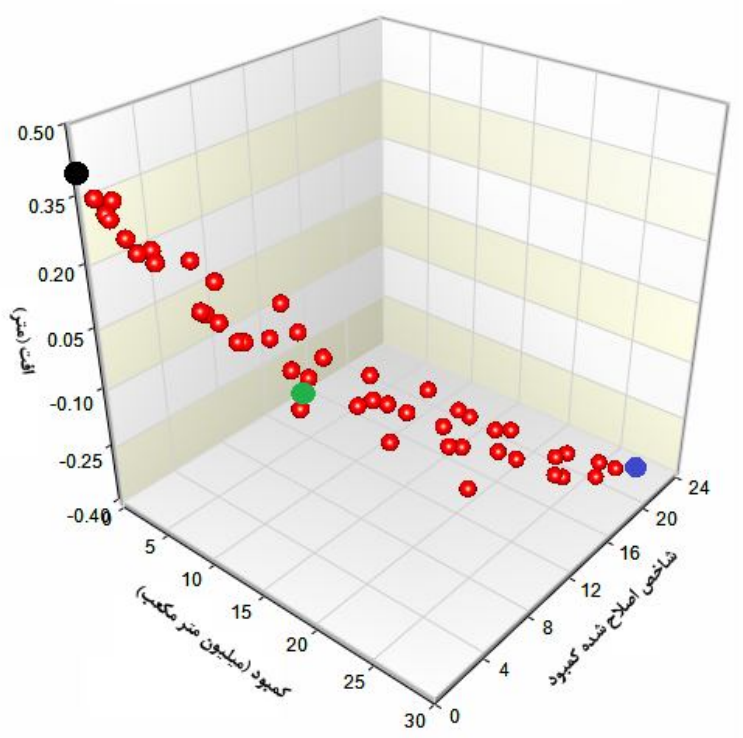
پس از تهیه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، مدل برای یک دوره یک ساله (سال آبی 90-1389) با 12 دوره تنش ماهیانه (هر دوره تنش شامل سه گام زمانی ده روزه) جهت تعیین سیاست برداشت بهینه از آبخوان به تعداد 5000 تکرار اجرا و همگرایی حاصل گردید.

جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف در شکل 4 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر کمبود، به طور متناظر شاخص MSI نیز افزایش می‌یابد و در مقابل مقادیر افت سطح ایستابی کاهش می‌یابد (مقادیر افت منفی به معنای بالا آمدن سطح آب می‌باشد). هم‌چنین در جوابی دیگر از جبهه پارتو می‌توان مشاهده نمود با افزایش افت سطح ایستابی مقادیر کمبود کاهش می‌یابد به طوری‌که در افت سطح ایستابی به مقدار 40 سانتی‌متر در طول دوره شبیه‌سازی کلیه نیازها برآورده شده و هیچ‌گونه کمبودی مشاهده نمی‌گردد.

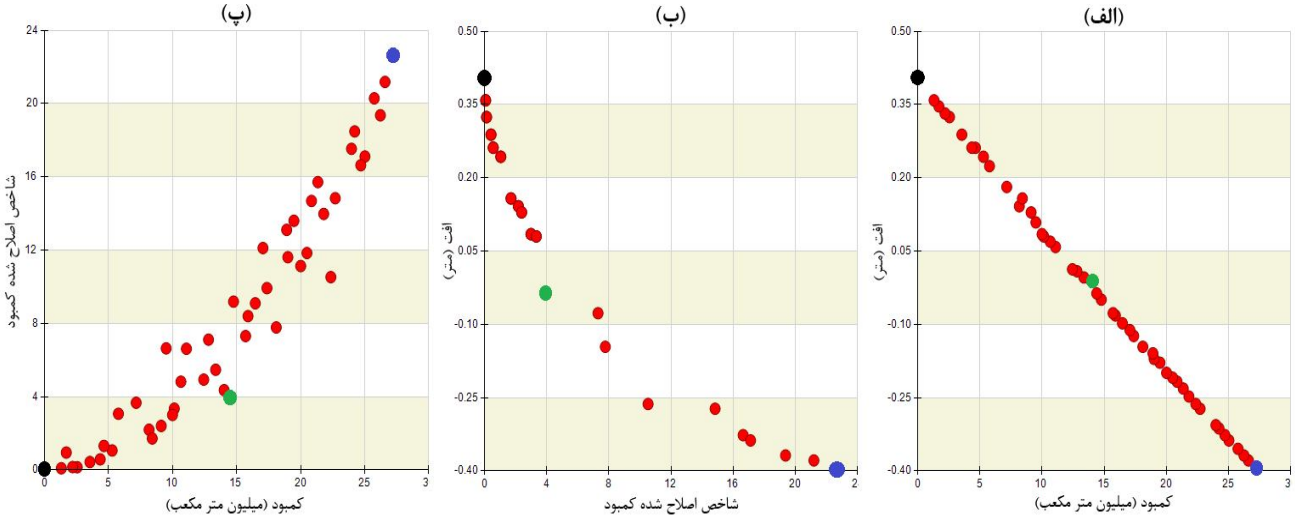
در ادامه جهت مشاهده و درک بهتر مجموعه جواب‌های بهینه، مقایسه دو به دوی جبهه پارتوی اهداف با یکدیگر به صورت دوبعدی در شکل 5 نشان داده شده است.

با توجه به شکل (5-الف) مشاهده می‌گردد افت سطح ایستابی و کمبود با یکدیگر رابطه عکس دارند. از آنجاکه کاهش افت در نتیجه-ی کاهش برداشت از آبخوان حاصل می‌شود، بدیهی است مقادیر تأمین نیاز آبی کاهش یافته و بنابراین کمبودها افزایش می‌یابد. هم-چنین قابل ملاحظه است رابطه بین مقادیر کمبود با افت سطح ایستابی نسبتاً خطی می‌باشد که این امر می‌تواند به دلیل یکسان در نظر گرفتن مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان در عمق باشد.

مطابق رابطه 4 شاخص MSI (که نقش توزیع مقادیر کمبود در طول دوره جهت کاهش تنش ناشی از کمبود را دارد) با کمبود رابطه مستقیم دارد (شکل 5-پ) و بنابر آنچه که در پاراگراف قبل گفته شد، کمبود و افت رابطه عکس دارند؛ در نتیجه انتظار می‌رود شاخص MSI نیز با افت سطح ایستابی رابطه عکس داشته باشد (شکل 5-ب).



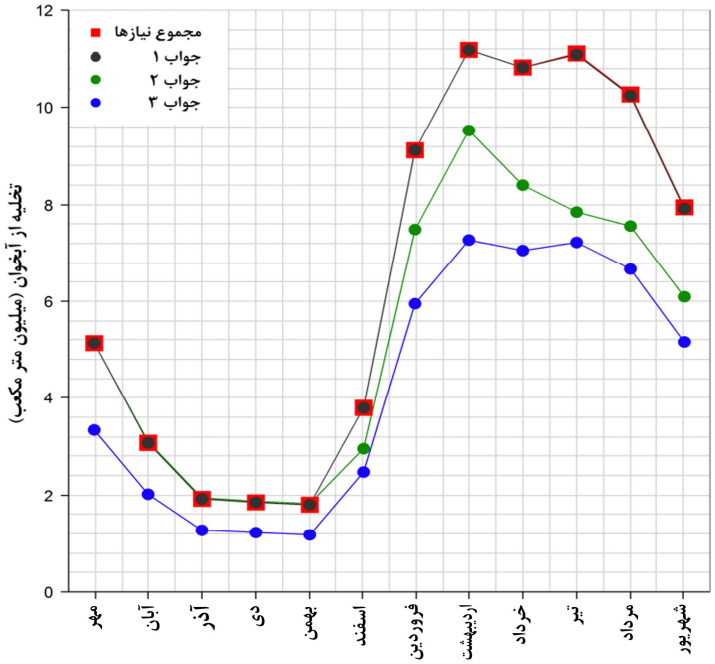
شکل4- جبهه پارتو حاصله از مقادیر توابع هدف



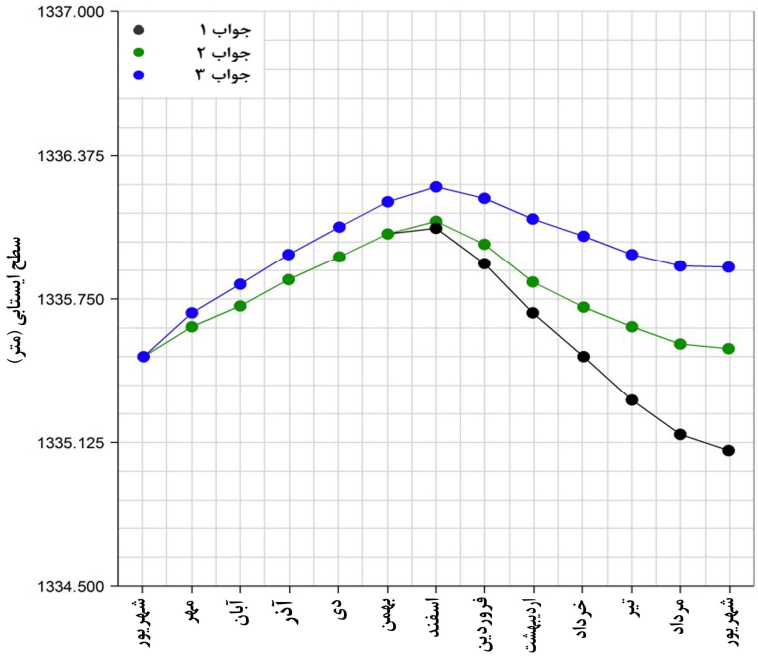
شکل5- مقایسه دو به دوی جبهه پارتوی اهداف با یکدیگر به صورت دوبعدی

هر چند در شکل‌های (5-الف، ب و پ) جبهه پارتو حاصل از دو هدف ترسیم شده‌اند، ولی بایستی در نظر داشت که بهینه‌سازی سه تابع هدف به صورت همزمان انجام گردیده است؛ بنابراین نمی‌توان هیچ ترکیب دوتایی از اهداف را بدون در نظر گرفتن هدف سوم تحلیل نمود. به عنوان مثال مشاهده می‌شود بدون در نظر گرفتن تابع هدف افت (شکل 5-پ)، بهترین مقدار جبهه برای دو تابع هدف دیگر (MSI و کمبود) برابر صفر (ایده‌آل ترین مقدار) حاصل گردیده است. این استنتاج بدون در نظر گرفتن مقدار افت متناظر، به ظاهر ایده‌ال می‌باشد؛ زیرا با توجه به شکل 4 مشاهده می‌شود حداکثر مقدار افت متناظر با همین نقطه رخ داده که با هدف کمینه نمودن افت سطح ایستابی در تعارض است.

در ادامه مجموع مقادیر بهینه برداشت از آبخوان (متغیرهای تصمیم‌گیری) در طول دوره شبیه‌سازی برای سه نمونه از جواب‌های بهینه محاسباتی از قسمت‌های مختلف جبهه پارتو (در شکل‌های 4 و 5 با رنگ‌های مشکی، سبز و آبی مشخص گردیدند) آورده شده است(شکل 6).



شکل6- مجموع مقادیر بهینه برداشت از آبخوان در طول دوره شبیه‌سازی برای سه نمونه از جواب‌های بهینه پارتو



شکل7- مقادیر تغییرات سطح ایستابی در طول دوره شبیه‌سازی برای هر یک از سه نمونه جواب مذکور

همانطور که در شکل 4 قابل مشاهده است، نمونه جواب شماره یک در جهت ارضای هدف اول (حداقل نمودن مجموع کمبودها) و در مقابل آن نمونه جواب شماره سه در جهت ارضای هدف سوم (حداقل نمودن افت سطح ایستابی) انتخاب گردیدند. هم‌چنین نمونه جواب شماره دو در جهت ارضای نسبی هر سه هدف مورد استفاده در این تحقیق انتخاب گردیده است.

مقادیر تغییرات سطح ایستابی در طول دوره شبیه‌سازی برای هر یک از سه نمونه جواب مذکور در شکل 7 نشان داده شده است.

مطابق شکل‌های 6 و 7 با توجه به این امر که درصد عمده نیازها را نیاز کشاورزی و در ماه‌های واقع در نیمه دوم سال تشکیل می دهد، لذا مشاهده می‌گردد بیش‌ترین مقادیر کمبود و افت سطح ایستابی نیز در همین دوره که نیاز کشاورزی افزایش می‌یابد رخ می‌دهد.

با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که نوسانات بالای تراز سطح آب و در نتیجه تغییر پارامترهای کیفی آب در نیمه اول سال وجود دارد. بنابراین تعدیل و تغییر الگوی کشت به طوری که توزیع نیازها و برداشت از آبخوان در طی سال را یکنواخت تر نماید نیز می‌تواند به عنوان یکی از راهکارهای موثر در کاهش این نوسانات (تغییر پارامترهای کیفی) مورد بررسی قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل شبیه‌ساز آب‌های زیرزمینی به صورت کد منبع باز در محیط برنامه‌نویسی MATLAB ارائه گردید. استفاده از مدل ارائه شده سبب انعطاف‌پذیری بیش‌تر در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی که تاکنون در زمینه آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است، می‌گردد. مدل مذکور برای شبیه‌سازی آبخوان دشت بیرجند مورد استفاده قرار گرفت. پس از واسنجی و صحت‌سنجی، مدل شبیه‌سازی با مدل بهینه‌سازی چندهدفه (الگوریتم بهینه سازی AMALGAM) تلفیق گردید و مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب زیرزمینی ارائه گردید. در مدل، کمینه نمودن سه تابع کمبود ناشی از عدم تأمین نیازها، افت سطح ایستابی و شاخص اصلاح شده کمبود به عنوان اهداف مدل لحاظ گردید. مدل ارائه شده برای یک دوره یکساله با 12 دوره تنش ماهیانه اجرا شده و جبهه پارتو بهینه حاصل گردید. به عنوان یک نمونه از جواب‌های پارتو بهینه محاسبه شده، مشاهده شد در زمانی که سطح ایستابی ثابت بماند، مقدار 14/4 میلیون متر مکعب از نیازها با کمبود مواجه شده و شاخص اصلاح شده کمبود برابر 3/95 می‌گردد.

در این تحقیق مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه (بهینه پارتو) جهت برآورده نمودن اهداف مذکور ارائه گردید. اما انتخاب بهترین گزینه به عنوان سیاست بهینه برداشت بر عهده مسئولین امر و سیاست گذاران مربوطه است تا با لحاظ نمودن معیارهای اقتصادی، اجتماعی و پیامدهای زیست محیطی، بهترین جواب بهینه از میان سایر جواب‌های بهینه پارتو گزیده و مقادیر برداشت متناظر با جواب منتخب تعیین گردد.

منابع

علی محمدی،س. 1384. طراحی و بهره‌برداری بهینه تلفیقی از سیستم آب‌های سطحی و زیرزمینی- رویکرد ذخیره سیکلی، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، 220 ص.

جنت رستمی،س.، خلقی،م.، محمدی،ک.، مالمیر،م. 1390. مدیریت بهره‌برداری از سفره آب زیرزمینی دشت شهرکرد، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان

شمسایی،ا. 1377. هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخلخل. جلد سوم کاربرد مدل‌های ریاضی- کامپیوتری. دانشگاه صنعتی امیر کبیر، 392 ص.

Abdeh-Kolahchi,A., Satish,M.G., Ketata,C and Islam,M.R. 2006. Sensitivity analysis of genetic algorithm parameters in groundwater monitoring network optimization for petroleum contaminant detection. Journal. Risk Assess. Management. In press .

Ahlfeld,D.P., Barlow,P.M and Mulligan,A.E. 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.1072, 124

Ahlfeld,D.P and Sawyer,C.S. 1990. Well Location in Capture Zone Design Using Simulation and Optimization Techniques. Groundwater. 28 .4: 507-512.

Aquado,E and Remson,I. 1974. Groundwater hydraulics in aquifer management. Journal of the Hydraulics Division – ASCE, 100.1: 103–118.

Barlow,P.M., Ahlfeld,D.P and Dickerman,D.C. 2003. Conjunctive-Management Models for Sustained Yield of Stream-Aquifer Systems. Journal of. Water Resources Planing and Management, 129.1: 35-48.

Bekele,E.G and Nicklow,J.W. 2007. Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II, Journal of Hydrology. 341(3-4), 165-176.

Carrera,J., Medina,A., Heredia,J., Vives,L., Ward,J and Walters,G. 1989. Parameter stimation in groundwater modelling: From theory to application. Hydrogeo Chem, Inc., Tucson, Arizona, USA.

Anderson,M.P and Woessner,W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. 381.

Chiang,W and Kinzelbach,W. 2001. Processing Modflow A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. Berlin, Springer Verlag.

Dupuit,J. 1863. Estudes Theoriques et Pratiques sur le Mouvement desEaux. Paris: Dunod.

Emadi,A.R and Khademi,M. 2011. Reservoir Operation Rule Curve of Doroodzan Dam using Yield Model" Journal of Water and Soil. 25.5: 1058-1068

Hsu,N.S and Cheng,K.W. 2002. Network flow optimization model for basin-scale water supply planning. Water Resources Planning and Management. 128.2:102–112

Olsthoorn,TN. 2013. mfLab: Environmet for MODFLOW suite groundwater modeling. accessed December 19

Oliveira,R and Loucks,D. 1997. Operating rules for multi - reservoir systems. Water Resource Research. 33.4: 839–852.

Prickett,T.A. 1975. Modeling Techniques for Groundwater Evaluation. Journal of Advances in Hydrosciense, 10.1: 1-143.

Schoups,G., Addams,C.L and Gorelick,S.M. 2005. Multi-objective calibration of a surface water-groundwater flow model in an irrigated agricultural region: Yaqui Valley, Sonora, Mexico. Hydrology and Earth System Sciences. 9.5: 549-568.

Tabari,MMR and Soltani,J. 2013. Multi-Objective Optimal Model for Conjunctive Use Management Using SGAs and NSGA-II Models Water resources management. 27 .1: 37-53

Tu,M.Y., Hsu,N.S., Tsai,F.T.C and Yeh,W.W.G. 2008. Optimization of hedging rules for reservoir operations. Water Resource Planning and Management. 134.1: 3–13

Vrugt,J.A and Robinson,B.A. 2007. Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. Proceding. National. Acadamic. Science. U.S.A. 1043, 708–711

Zhang,X., Srinivasan,R and Liew,M.V. 2010. On the use of multi-algorithm, genetically adaptive multi-objective method for multi-site calibration of the SWAT model. *Hydrological Processes*, *24*.8: 955-969.

Zheng,C and Bennett,G.D. 2002. Applied contaminant transport modeling. (Vol. 2). New York: Wiley-Interscience.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 9, Aug.-Sep. 2015, p. 469-479

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره3، جلد9، مرداد - شهریور 1394، ص. 479-469

Application of Multi Objective Optimization Method AMALGAM in Determining the Policy of Optimum Discharge from Groundwater Resources Using Mathematical Model

S. SadeghiTabas[1*], M. Pourreza Bilondi [2], A. Akbarpour[3] and S.Z. Samadi[4]
Recived: Mar.04, 2015 Accepted: Aug.19, 2015

Abstract

Due to existence of drought periods, decreasing the discharge of the aqueducts and springs and also growing usage of water in study area, administrative sections are eager to do pumping from the groundwater aquifer so aquifer operation management can have an important role in preventing the adverse decrease in water table in this aquifer and creating the Irreparable disaster for attaining this necessity simulator-optimizer model of groundwater was offered. Offered model is a combination of aquifer simulating model (MODFLOW2005-NWT) and multi-objective optimizing algorithm (AMALGAM) in MATLAB programming. For determining the aquifer hydrodynamics parameters, this model was validated and calibrated. The objectives of this model were minimizing the three functions of shortage affected by the failure to supply the necessity, decreasing the water table and Modified Shortage Index (MSI). The presented model was run for a year period with 12 monthly Stress period and Optimal Pareto Front was determined. As one of pareto optimum calculated answers, it can be viewed that when water table remains unchanged, 14.4 million cubic meters of demands exhibit shortage and the amount of MSI will be 3.95. In order to specifying the best option of policy discharge, according to economic, social criteria and environmental effects by administrators and relevant policies, the appropriate optimum answer should been defined among the other optimum and selected pareto answers and also among the discharge amounts corresponding chosen answer. By analyzing the results of using the recommended structure, it can be found that the presented approach has good performance in determining the aquifer optimum policy.

Keywords: AMALGAM, the simulator- optimizer model for groundwater, Birjand plains, optimum policy of discharge, Pareto front, MATLAB.

1- M.Sc. Student, Water Resources Engineering, University of Birjand
2- Assistant Professor of Water Engineering Department., University of Birjand
3- Associate Professor of Civil Engineering, University of Birjand
4- Assistant Professor of Water Resources Engineering Department., University of South Carolina
(*-Corresponding Author Email: sadeghitabas@yahoo.com)