Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶
Volume 13, No. 2, Summer 2017 (IR-WRR)
۸۲-۹۸

حل معکوس مدل‌های آب زیرزمینی - رویکرد غیرمستقیم

ابوذر احمدی[۱]، سعید علیمحمدی[۲*]
و سید سعید موسوی ندوشنی[۳]

چکیده

هدف اصلی مطالعه حاضر، ارائه ساختار و روشی برای واسنجی مدل‌های آب زیرزمینی است. واسنجی خودکار با رویکرد غیرمستقیم مد نظر قرار گرفته و مسأله معکوس در مدل‌سازی آب زیرزمینی به‌صورت یک مسأله بهینه‌سازی تعریف شده است. برای حل این مسأله بهینه‌سازی غیرخطی از الگوریتم ژنتیک استفاده گردیده است. کمینه‌سازی جذر میانگین مربع اختلاف میان مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی و تراز متناظر محاسبه شده در نرم‌افزار MODFLOW به‌عنوان معیار واسنجی و ارزیابی تعیین شده است. مقادیر هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (با ناحیه‌بندی معلوم) نیز به عنوان پارامترهای مدل در نظر گرفته شده است. با ایجاد تغییراتی در کدهای اصلی برنامه MODFLOW-2005 و افزودن الگوریتم ژنتیک به آن، یک برنامه بهینه‌سازی (MF2005GA_P) به زبان فرترن ۹۰ تهیه شده است که به‌دلیل تبادل داخلی متغیرهای اصلی (مانند RMSE)، کاهش محسوسی در مدت زمان اجرای برنامه نسبت به رویکرد اتصال کدهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حاصل نموده است. این برنامه بر اساس یک مدل فرضی، توسعه یافته و به صورت اولیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه آبخوان ابهر به عنوان مطالعه موردی انتخاب و عملکرد برنامه در مقیاس واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این روش، کاهش حدود ۴۰ درصدی RMSE را نسبت به نتایج واسنجی با روش سعی و خطا، نشان داده است.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، مدل‌سازی معکوس، واسنجی خودکار، الگوریتم ژنتیک

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۱۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران - آب‌های زیرزمینی، دانشگاه شهید بهشتی
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
۳- استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Inverse Solution of Groundwater Models - Indirect Approach

*A. Ahmadi [1], S. Alimohammadi [2]**
and S. S. Mousavi Nadoushani [3]

Abstract

The main purpose of this study was developing a framework for the calibration of groundwater models. The automatic calibration with indirect approach has been considered and inverse problem in groundwater flow modeling was defined as an optimization problem. For solving the nonlinear optimization problem, genetic algorithm has been used. Minimizing the root of mean square deviation between observed and the corresponding computed heads in MODFLOW was considered as a calibration and evaluation criterion. Also, the hydraulic conductivity and specific yield (with known zonation) have been considered as model parameters. Changing some part of MODFLOW-2005 source codes and embedding the genetic algorithm, an optimization program (MF2005GA_P) has been developed in FORTRAN 90. Internal exchange of main variables (e.g. RMSE) has decreased the execution time noticeably compared to the approach that linked optimization and simulation codes. The program has been developed and primarily evaluated based on a hypothetical model. Next, Abhar aquifer was selected as a case study and the program performance in a real scale has been investigated. The results have shown about 40 percent decrease in RMSE compared to the trial and error calibration results.

Keywords **:** Groundwater, Inverse modeling, Automatic calibration, Genetic Algorithm

Received: March 31, 2016
Accepted: December 15, 2016

1- Graduated Student of Civil Engineering – Groundwater, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Assistant professor, Faculty of Civil Engineering, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; Email: s_alimohammadi@sbu.ac.ir
3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
*- Corresponding Author

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در بسیاری از حوزه‌های علوم و مهندسی، مدل‌های ریاضی برای نمایش فرایندهای پیچیده و از نتایج آن‌ها برای مدیریت و تحلیل ریسک سیستم استفاده می‌شود (Hill and Tiedman, 2007)؛ مدل‌هایی که فرایندهای موجود را به صورت معادلات ریاضی ارائه می‌دهند. یکی از محبوب‌ترین ابزارهایی که از اواسط سال ۱۹۶۰ میلادی به منظور کاربرد در مطالعات آب زیرزمینی، هم‌زمان با توسعه و افزایش دسترسی به سیستم‌های رایانه‌ای سریع‌تر، توانمندتر و در عین حال ارزان‌تر به وجود آمد، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی قطعی (علت و معلولی)[۱] با پارامترهای توزیعی هستند (Delleur, 2007). مادفلو[۲] یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی آب زیرزمینی می‌باشد.

واسنجی[۳]، از مراحل بسیار مهم پیش از کاربرد مدل است. تطابق مقادیر مشاهداتی و محاسباتی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های کیفیت یک مدل و توانمندی آن در نمایش یک سیستم واقعی است؛ بنابراین به عنوان بخشی از این مرحله، باید مقادیری برای پارامترهای مدل برآورد شود که حداقل اختلاف ممکن میان مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را سبب گردد. با تعریف این اختلاف در قالب تابع هدف[۴] فرایند تخمین پارامترهای مدل، فرایند بهینه‌سازی نامیده می‌شود (Hill and Tiedman, 2007).

به طور کلی، روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی به دو دسته سنتی[۵] یا کلاسیک و نوین یا فراکاوشی[۶] تقسیم می‌گردند. الگوریتم‌های فراکاوشی به دلیل فرضیات و اطلاعات اندکی که درباره فرم مسائل و فضای جستجو نیاز دارند، در مسائل مختلف و پیچیده‌ای کاربرد دارند. الگوریتم ژنتیک، یک الگوریتم فراکاوشی الگوبرداری شده از نظریه تکامل (نظریه داروین)، فرایند انتخاب طبیعی و سیستم‌های ژنتیکی است که توسط جان هالند[۷] و همکاران او در دانشگاه میشیگان توسعه یافت (Goldberg, 2006) و تاکنون در مطالعات بسیاری از جمله در حوزه مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گرفته است (Nicklow et al., 2010).

McDonald and Harbaugh (2003) پیشینه، نحوه توسعه و نیز برخی تجارب استفاده از مادفلو تا رسیدن بـه نسخه‌های اولیه MODFLOW-2000 را مـرور نموده‌اند. از زمـان انتشار اولیه مادفلو در سال ۱۹۸۴ میلادی چهار نسخه اصلی آن منتشر شده است که آخـرین نسخه آن MODFLOW-2005 می‌بـاشد (USGS-OGW, 2011).

Nicklow et al. (2010) به صورت جامع به مرور مطالعات کاربرد الگوریتم‌های تکاملی در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب پرداختند. Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015a) به مرور مطالعات مرتبط با کاربرد الگوریتم‌های فراکاوشی در مسائل مدیریت آب زیرزمینی ساحلی پرداختند و عملکرد و تأثیر هشت الگوریتم مختلف را بر روی چهار مسأله معیار، مورد بررسی قرار دادند.

Wang and Zheng (1996) به منظور ارزیابی مقدماتی کاربرد الگوریتم ژنتیک برای واسنجی مدل‌های آب زیرزمینی از یک مدل فرضی استفاده نمودند. در این مطالعه از MODFLOW-88 برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج کاربرد الگوریتم ژنتیک در دو حالت مفروض داده‌های مشاهداتی بدون خطا[۸] و با اضافه نمودن خطا با روش گوس- نیوتون مقایسه و در حالت دوم مناسب‌تر معرفی شد. Zheng (1997) با اتصال[۹] الگوریتم ژنتیک به MODFLOW-88 به عنوان مدل شبیه‌ساز کمی (جریان) آب زیرزمینی و MT3D به‌عنوان مدل شبیه‌ساز کیفی آب زیرزمینی، یک برنامه شبیه‌سازی - بهینه‌سازی با ساختار ماژولی تهیه نمود. این برنامه تجاری که ModGA نامیده شد، برای طراحی بهینه سیستم‌های کنترل هیدرولیکی و احیا[۱۰] آبخوان و نسخه‌ای از آن به نام ModGA_P، به‌طور خاص برای واسنجی مدل‌های آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت.

Poeter and Hill (1997) از یک روش رگرسیون غیرخطی در مدل‌سازی معکوس استفاده نمودند. در این مطالعه با ارائه چند مسأله فرضی و ارائه توضیحاتی برای ایجاد ارتباط با مسائل واقعی، بر اهمیت استفاده از مدل‌های معکوس به‌عنوان یکی از گام‌های ضروری در مدل‌سازی آب زیرزمینی تأکید شد.

Lingireddy (1998) از الگوریتم ژنتیک به‌منظور برآورد پارامترهای آبخوان استفاده نمود. در این مطالعه به‌منظور کاهش زمان قابل توجهی که برای ارزیابی جواب‌ها (کروموزوم‌ها) مورد نیاز بود، از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی استفاده شد.

Solomatine et al. (1999) با در نظر گرفتن دو پارامتر مدل و نمایش سطح تابع هدف (RMSE) یا فضای جستجو برای مسأله خود، بر لزوم تغییر دیدگاه نسبت به مسائل واسنجی مدل‌های آب زیرزمینی و در نظر داشتن امکان وجود چندین نقطه کمینه محلی[۱۱] در فضای جستجو تأکید نمودند. در این مطالعه برای واسنجی یک

www.SID.ir

Archive of SID

مدل آب زیرزمینی در شرایط ماندگار[12]، نرم‌افزار شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی (TRIWACO) به نرم‌افزار تجاری GLOBE که شامل تعدادی از روش‌های بهینه‌سازی نوین می‌باشد، متصل شد.

Madsen and Perry (2012) کاربرد الگوریتم ژنتیک در واسنجی یک مسأله واقعی که با استفاده از MODFLOW-2000 تهیه شده بود را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه کدنویسی الگوریتم ژنتیک به زبان ویژوال بیسیک[13] (VB) انجام و سپس این کد به مادفلو متصل شد. مدت‌زمان اجرای کامل مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی (واسنجی) با فرایند تعریف شده در این مطالعه حدود ۱۱ ساعت گزارش شد.

Ataie-Ashtiani et al. (2013) برای واسنجی مدل یک آبخوان ساحلی خاص در جزیره کیش که با استفاده از نرم‌افزار SUTRA تهیه گردید، از مدل‌سازی معکوس با نرم‌فزار PEST استفاده نمودند. Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015b) پیشرفت‌های اخیر در حوزه مدیریت آب‌های زیرزمینی ساحلی را مورد توجه قرار دادند و ایده‌هایی که به‌منظور بهبود روند اجرای محاسبات در مدل‌های شبیه‌سازی – بهینه‌سازی وجود داشت، مرور نمودند. Ketabchi and Ataie-Ashtiani (2015c) یک رویکرد بهینه‌سازی فراکاوشی را به‌منظور مدیریت مؤثر آبخوان‌های ساحلی مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه به منظور کاهش مدت‌زمان لازم برای حجم بالای محاسبات مورد نیاز تا رسیدن به استراتژی بهینه برای مدیریت آبخوان ساحلی جزیره کیش که در نرم‌افزار SUTRA تهیه شده بود، از موازی نمودن[13] ارزیابی گزینه‌ها یا جمعیت الگوریتم در نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

روش‌های مرسوم برای تخمین پارامترهای مدل، نظیر استفاده از تطابق نموداری (نتایج آزمایش پمپاژ) به‌دلیل فرضیات نسبتاً زیادی که دارند با وجود مفید بودن، محدود هستند (Yeh, 1986). تفکر اصلی حل معکوس این است که به‌جای استفاده از نقاط محدود آزمایش‌های پمپاژ از اطلاعات مربوط به چاه‌های مشاهداتی استفاده شود و بدین ترتیب اطلاعات بیشتری مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین استفاده از مدل‌های گسترده، عدم قطعیت تخمین پارامترهای مدل را نسبت به استفاده از تعداد محدود آزمایش‌های پمپاژ، کاهش می‌دهد. زمان‌بر و خسته‌کننده بودن فرایند سعی و خطا و وابستگی آن به نظرات شخصی، گرایش به فرایندهای سیستماتیک و واسنجی خودکار مدل‌های آب زیرزمینی را افزایش داده است؛ ولی ارائه ندادن جواب منحصربه‌فرد و یکتا، ناپایداری، نیاز به معلومات آماری قابل ملاحظه و دشواری درک روش‌های واسنجی مورد استفاده، از جمله دلایلی بود که نرم‌افزارهای واسنجی موجود رواج چندانی نداشته و همچنان روش سعی و خطا به دیگر روش‌ها ترجیح داده می‌شدند (Kresic, 1997)؛ البته قرار گرفتن این نرم‌افزارها در واسطهای گرافیکی تا حدودی استفاده از آن‌ها را افزایش داده است. همچنین غالب نرم‌افزارهای موجود، از روش‌های بهینه‌سازی گرادیانی برای برآورد پارامترهای مدل استفاده می‌کنند و در «مسائل بهینه‌سازی پیچیده غیرخطی که روش‌های گرادیانی قادر به یافتن جواب آن‌ها نمی‌باشند، می‌توان روش‌های جستجوی مطلق نظیر GA را مد نظر قرار داد» (Hill and Tiedman, 2007)؛ بنابراین، بررسی و ارائه روش‌های جدید (بدیل[14]) به‌منظور حل مسأله معکوس آب زیرزمینی یا واسنجی خودکار مدل‌های آب زیرزمینی حائز اهمیت است.

هدف اصلی این مطالعه، بررسی و ارائه روش‌های مناسب بدیل برای واسنجی مدل‌های جریان آب زیرزمینی می‌باشد. رویکرد داخلی و استفاده از ویژگی کد باز[15] بودن مادفلو، کم‌تر مورد توجه بوده است؛ در اکثر مطالعات قبلی یا مادفلو کنار گذاشته شده یا کد بهینه‌سازی به مادفلو متصل شده است. در این پژوهش پس از کدنویسی و تنظیم الگوریتم ژنتیک برای هدف مورد نظر، با بررسی جزییات کدنویسی مادفلو و ایجاد تغییراتی در آن، الگوریتم ژنتیک به کدهای مادفلو اضافه شده است. همچنین، استفاده از آخرین نسخه مادفلو (MF2005 v1.11.00) از دیگر موارد شاخص مطالعه حاضر می‌باشد. این برنامه پس از تکمیل و ارزیابی اولیه در قالب یک مدل فرضی، در یک مسأله واقعی و در مقیاس بزرگ‌تر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ از اطلاعات مربوط به مدل آبخوان ابهر (Abkhan Consulting Engineers, 2003) برای مطالعه موردی استفاده شده است.

در مسأله معکوس، به‌منظور رسیدن به یک مسأله پایدار باید تعداد مجهولات یا به‌عبارت دیگر درجه آزادی مسأله کاهش یابد. یکی از روش‌هایی که برای این منظور استفاده می‌گردد، روش ناحیه‌بندی[16] است (Hill and Tiedman, 2007)؛ در این روش، محدوده مدل‌سازی برای هر یک از پارامترها به تعدادی ناحیه که همگن فرض می‌شوند، تقسیم می‌گردد. روش مذکور، خارج از حدود این مطالعه می‌باشد و در اینجا از ناحیه‌بندی مفروض در مسأله فرضی و در مطالعه موردی، از ناحیه‌بندی که پیش‌تر در مراحل تهیه مدل برای پارامترها در نظر گرفته شده بود، استفاده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲- روش تحقیق

مادفلو و الگوریتم ژنتیک دو بخش اصلی برنامه MF2005GA_P را که در پژوهش حاضر به‌منظور حل معکوس مدل‌های جریان آب زیرزمینی تهیه شده، تشکیل داده است. بنابراین ابتدا توضیحات مختصری درباره زمینه کلی پژوهش و این دو بخش و سپس جزییات بیشتری درباره ساختار و نحوه تنظیم برنامه MF2005GA_P ارائه شده است. به‌منظور تهیه و ارزیابی اولیه این برنامه، یک مدل فرضی تعریف شده و مورد استفاده قرار گرفته است که مشخصات کلی این مدل و نکات تکمیلی تنظیم برنامه، به‌صورت اجمالی تحت عنوان مدل فرضی بیان گردیده است. در انتهای این بخش ضمن معرفی مطالعه موردی، به نحوه ارزیابی برنامه MF2005GA_P در مقیاس واقعی اشاره شده است.

۲-۱- واسنجی و حل معکوس مدل آب زیرزمینی

تعریف مسأله در واسنجی یا تعیین پارامترهای[۱۷] مدل، درست عکس شبیه‌سازی یا مسأله مستقیم می‌باشد. وضعیت سیستم که خروجی مسأله مستقیم محسوب می‌شد، ورودی و پارامترها که از ورودی‌های مدل بودند، خروجی‌های این مسأله محسوب می‌شوند. بنابراین تعیین پارامترها اغلب مسأله معکوس[۱۸] نامیده می‌شود (Sun, 1999).

به‌طور کلی دو روش برای واسنجی مدل وجود دارد: روش سعی و خطا و روش واسنجی خودکار (Anderson and Woessner, 1992). در روش واسنجی خودکار از برنامه‌های رایانه‌ای با رویکرد مستقیم یا غیرمستقیم، برای فرایند واسنجی استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت‌های رویکرد مستقیم، فقط در شرایط خاصی از این رویکرد استفاده می‌شود و در اغلب برنامه‌های رایانه‌ای موجود، رویکرد غیرمستقیم ارجح می‌باشد (Anderson and Woessner, 1992; Hill and Tiedman, 2007). در پژوهش حاضر واسنجی خودکار با رویکرد غیرمستقیم مدنظر قرار گرفته است.

۲-۲- الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی (الگوریتم ژنتیک)

الگوریتم‌های فراکاوشی به‌صورت غیرمستقیم و بدون در نظر گرفتن فرم مسأله و فضای جستجو، به‌سوی بهترین جواب یا جواب‌های مسأله حرکت می‌کنند. بنابراین، با وجود اینکه نمی‌توان تضمین نمود که جواب نهایی، بهترین جواب موجود برای مسأله است، در عین حال نقاط بهینه محلی نمی‌توانند مانع از حرکت این الگوریتم‌ها به‌سوی بهترین جواب یا نقطه بهینه عمومی گردند. شکل ۱ دسته‌بندی تعدادی از الگوریتم‌های فراکاوشی رایج و شناخته‌شده را نشان می‌دهد. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فراکاوشی تکاملی است؛ که پرکاربردترین الگوریتم تکاملی و نیز فراکاوشی در مطالعات برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب بوده است (Nicklow et al., 2010; Ketabchi and Ataie, 2015a, c).

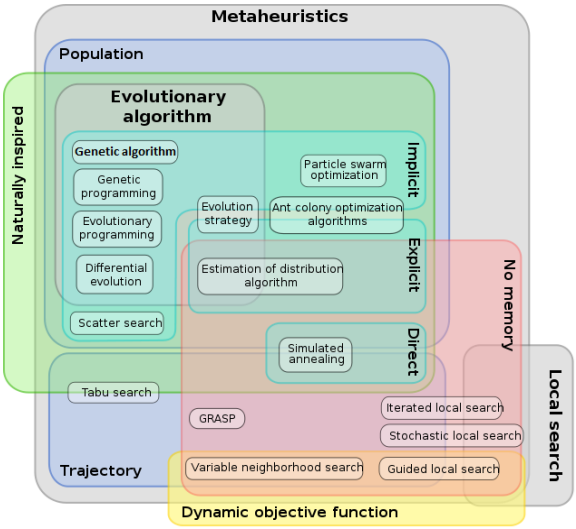


Fig 1 - Metaheuristics classification (Dréo and Candan 2011)

شکل ۱- دسته‌بندی الگوریتم‌های فراکاوشی (Dréo and Candan 2011)

گام‌های اصلی الگوریتم ژنتیک شامل تولید جمعیت اولیه، ارزیابی جمعیت، انتخاب، فرایندهای تولید جمعیت بعدی (تزویج یا ترکیب[۱۹] و جهش[۲۰]) می‌باشد؛ این گام‌ها از ارزیابی جمعیت جدید تا زمان تأمین معیار یا معیارهای توقف الگوریتم، تکرار می‌شوند (Nicklow et al., 2010). الگوریتم ژنتیک دودویی[۲۱] با وجود برخی محاسن از جمله سهولت ایجاد تنوع در جواب‌ها از طریق اعمال عملگرهای تزویج و جهش، محدودیت‌های زیادی را به‌خصوص در مورد مسائلی که محدوده مجاز برای متغیرهای تصمیم پیوسته باشد، به‌همراه دارد (Zahraie and Hosseini, 2009).

در پژوهش حاضر از روش‌ها و دستوراتی مشابه الگوریتم ژنتیک پیوسته ارائه شده توسط Haupt and Haupt (2004)، استفاده شده ولی به‌منظور ترجمه[۲۲] (بر روی رایانه‌های شخصی)، تکمیل و بهبود عملکرد، مورد تصحیح قرار گرفته و تغییراتی در کدهای این الگوریتم ایجاد شده است. از جمله تغییراتی که مورد بررسی قرار گرفته‌اند، روش انتخاب تورنمنت (مسابقه‌ای)[۲۳] و نخبه‌گرایی[۲۴] می‌باشد (Zahraie and Hosseini, 2009).

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۳- مدل شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مادفلو

مادفلو یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین برنامه‌های رایانه‌ای جهت مدل‌سازی آب زیرزمینی می‌باشد. این نرم‌افزار به‌منظور حل عددی معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی از روش تفاضل محدود[۲۵] استفاده می‌کند (شکل ۲). در این روش، ناحیه مورد مطالعه با شبکه‌بندی[۲۶] و مشخص نمودن نقاط محاسباتی یا گره‌ها[۲۷] به تعدادی بلوک تقسیم می‌شود و به این صورت به‌لحاظ ریاضی نیز معادله (دیفرانسیلی) حاکم با تعدادی معادله جبری تقریب زده می‌شود.

در پژوهش حاضر از MODFLOW-2005 و نسخه ۱۱ آن استفاده شده است (Harbaugh, 2005). با وجود اینکه مادفلو یک فایل گروهی[۲۸] و اجرایی است ولی متناسب با اهداف پژوهش، ابتدا کدهای مادفلو در یک نرم‌افزار مترجم[۲۹] بر روی رایانه شخصی، ترجمه شده و سپس تغییرات لازم در آن ایجاد شده است.

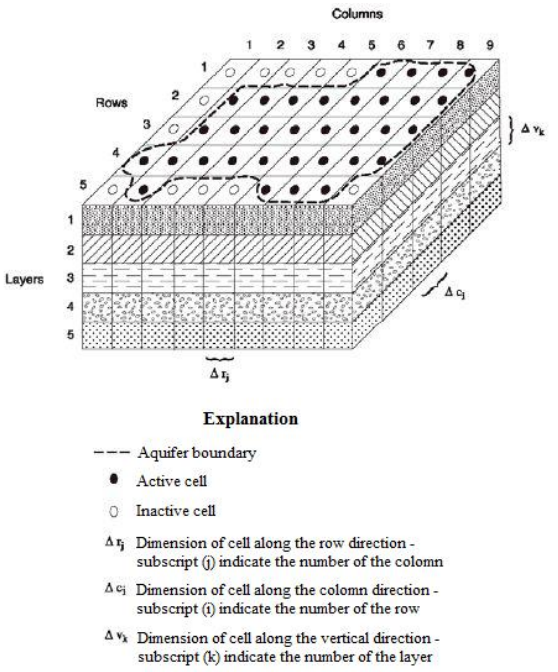


Fig 2 - Discretization of aquifer system in MODFLOW

شکل ۲- گسسته‌سازی (شبکه‌بندی) سیستم آبخوان در مادفلو (Harbaugh, 2005)

۲-۴- مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی (روش واسنجی)

روندنمای برنامه MF2005GA_P که در این پژوهش برای حل معکوس مدل‌های آب زیرزمینی، تهیه شده (تنظیم و کدنویسی) در شکل ۳ ارائه شده است. این برنامه به دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) برای واسنجی یا تعیین پارامترهای (Parameter Estimation) مدل آب زیرزمینی که توسط آخرین نسخه نرم‌افزار مادفلو (MF2005) تهیه شده است و همچنین با اقتباس از نام‌گذاری نزدیک‌ترین کد تجاری موجود در این زمینه یعنی ModGA_P (Zheng, 1997)، MF2005GA_P نام‌گذاری گردیده است.

کمینه‌سازی RMSE (جذر میانگین مربع خطاها)، به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. با این تعریف که خطا، اختلاف میان مقادیر تراز یا هد هیدرولیکی[۳۰] سطح آب زیرزمینی یا به‌اختصار هد مشاهداتی (اندازه‌گیری شده یا میدانی) و مقادیر محاسباتی متناظر آن‌ها، می‌باشد (رابطه ۱). در این رابطه، n_s و n_t به ترتیب تعداد نقاط (مکان‌ها) و تعداد دوره‌های زمانی هستند که داده‌های مشاهداتی ثبت شده‌اند؛ h_o، h_c، h_{min} و h_{max} به ترتیب هد مشاهداتی، هد محاسباتی، حدود پایین و بالای تغییرات هد بر حسب متر و IN، BOUND و P به ترتیب نشان‌دهنده شرایط اولیه، شرایط مرزی و پارامترهای مدل می‌باشند.

هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (به لحاظ نوع، نه تعداد) به‌عنوان پارامترهای نامعلوم در واسنجی مدل و متغیرهای تصمیم مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند و هدف، کمینه‌سازی RMSE از طریق برآورد مقادیری برای این پارامترها می‌باشد.

$$RMSE = \left[\frac{1}{ns} \times \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{ns} \sum_{t=1}^{nt} (h_o - h_c)_i^2 \right]^{0.5} \quad (۱)$$

$$h_c = f(IN, BOUND, P)$$

$$h_{min} \le h_c \le h_{max}$$

در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که به ازای هر تکرار (نسل)، مادفلو برای ارزیابی هر یک از عضوهای جمعیت (جواب‌های محتمل) باید یک‌بار اجرا گردد؛ به‌طور مثال اگر حداکثر تکرار و اندازه جمعیت در الگوریتم ژنتیک به ترتیب ۵۰۰ و ۵۰ باشد، در صورت عدم تأمین معیار یا شرط سطح خطای مطلوب، ۲۵۰۰۰ بار اجرای مادفلو در این ساختار مورد نیاز است.

با وجود سرعت بالا و در نتیجه مدت‌زمان نسبتاً کوتاه اجرای مادفلو، حتی اگر هر اجرای آن یک ثانیه باشد، اجرای کامل این برنامه ۲۵۰۰۰ ثانیه یعنی حدود ۷ ساعت به طول می‌انجامد (بدون لحاظ نمودن مدت‌زمان اجرای سایر دستورات برنامه). کاهش محسوس مدت‌زمان اجرای برنامه از نقاط شاخص این پژوهش می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

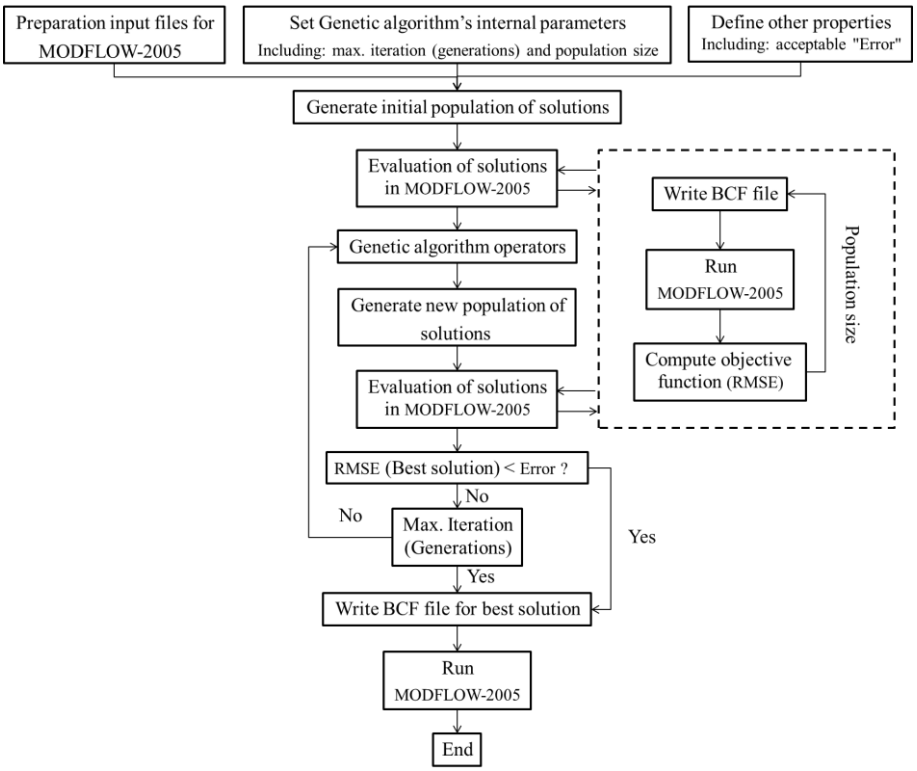


Fig 3 – The MF2005GA_P simulation - optimization model flowchart (Ahmadi, 2015)

شکل ۳- روندنمای مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی MF2005GA_P (Ahmadi, 2015)

در این ساختار (شکل ۳)، ارزیابی جواب‌ها به برنامه سپرده شده است و به‌طور کلی با توجه به عملکرد الگوریتم ژنتیک ضرورتی برای چاپ تمام فایل‌های خروجی مادفلو مطابق یک اجرای معمولی وجود ندارد؛ بنابراین تا حد امکان از چاپ‌های غیرضروری مادفلو در اجراهای متوالی جلوگیری و در عین حال با تغییر در برخی از کدهای مادفلو، روند اجرا و نتایج مادفلو کنترل شده است.

نحوه ایجاد ارتباط میان الگوریتم ژنتیک و MODFLOW-2005 برای واسنجی خودکار مدل، مسأله اصلی در تهیه برنامه MF2005GA_P است. از دیدگاه مفهومی، MODFLOW-2005 و مدل شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی که با استفاده از آن تهیه می‌شود، بخش اصلی ساختار مسأله را تشکیل داده و به‌منظور برآورد پارامترهای این مدل از الگوریتم ژنتیک در حل مسأله بهینه‌سازی با تابع هدفی مطابق رابطه ۱ استفاده شده است؛ اما در واقع، بخش اصلی برنامه را الگوریتم ژنتیک تشکیل داده است و MODFLOW-2005 برای ارزیابی جمعیت (جواب‌ها)، فراخوانی می‌شود.

چنان‌که بیان شد، در پژوهش حاضر رویکرد داخلی برای ارتباط مذکور استفاده شده است. بنابراین ساختار برنامه‌نویسی MODFLOW-2005 مورد بررسی قرار گرفته و تغییراتی در کدهای آن ایجاد شده است. در این رویکرد به‌منظور افزایش سرعت اجرای برنامه، اطلاعات اصلی به‌صورت داخلی میان الگوریتم ژنتیک و مادفلو مبادله می‌شوند؛ به‌طور مثال، برای محاسبه RMSE از محاسبات داخلی مادفلو استفاده و نتایج این محاسبات به الگوریتم ژنتیک منتقل شده است. در عین حال، ساختار کلی اجرایی مادفلو به‌صورت فایل گروهی حفظ شده است – یعنی داده‌های مورد نیاز برای اجرا، از طریق فایل‌های ورودی به مادفلو معرفی شده‌اند – که امکان توسعه آتی برنامه به لحاظ نسخه مادفلو مورد استفاده را فراهم می‌نماید.

از دیدگاه برنامه‌نویسی، با توجه به استفاده از زبان فرترن ۹۰ در کدنویسی MODFLOW-2005، دستیابی به رویکرد داخلی برای ارتباط میان دو بخش اصلی برنامه، مستلزم استفاده از همین زبان بوده و الگوریتم ژنتیک (که خود به زبان فرترن ۹۰ تهیه شده است) نیز به‌صورت ماژولی به کدهای اصلی MODFLOW-2005 اضافه

www.SID.ir

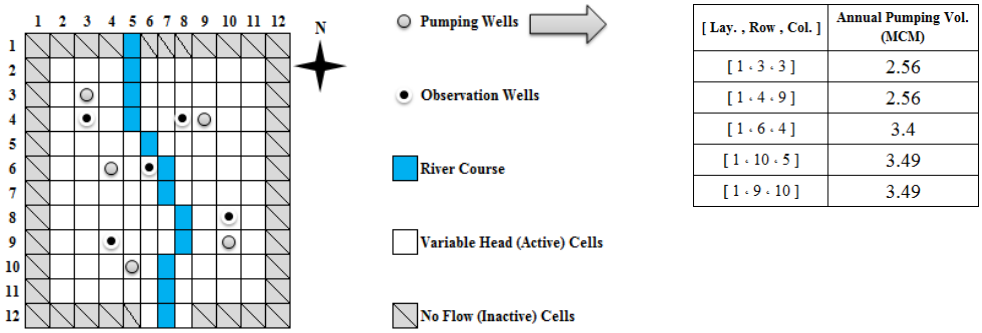
Archive of SID

شده است و در یک نرم‌افزار مترجم فرترن (CVF v.6.6[۳۱])، هم‌زمان به کد ماشین ترجمه شده‌اند.

۲-۵- مدل فرضی

به‌منظور تهیه و ارزیابی اولیه عملکرد برنامه MF2005GA_P در حل معکوس مدل جریان آب زیرزمینی، از آن برای برآورد پارامترهای مورد نظر در یک آبخوان آزاد فرضی مطابق شکل ۴ استفاده شده است. مساحت این آبخوان ۸۰ کیلومترمربع در نظر گرفته شده است که به‌صورت مستطیلی با ابعاد ۸ کیلومتر در ۱۰ کیلومتر می‌باشد. حجم برداشت مفروض از چاه‌های پمپاژ در دوره شبیه‌سازی نیز در شکل ۴ ارائه شده است. آبخوان با یک لایه و در جهت عمودی (سطرها) به فواصل ۱۰۰۰ متر و در جهت افقی (ستون‌ها) به فواصل ۱۰۰۰ و ۵۰۰ متر شبکه‌بندی شده است. ضخامت آبخوان، به‌صورت یکنواخت ۱۰۰ متر و تراز کف آن صفر در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه این مدل، به‌گونه‌ای تعریف گردید که آب سطحی و زیرزمینی، هم‌تراز بوده و تبادلی میان رودخانه و آبخوان وجود نداشته باشد. شبیه‌سازی در شرایط غیرماندگار[۳۲] مدنظر بوده و طول دوره شبیه‌سازی ۱۲ ماه در نظر گرفته شده است که هر ماه یک دوره تنش[۳۳] می‌باشد. برای جزییات بیش‌تر در خصوص تعریف این مدل فرضی به Ahmadi (2015) مراجعه شود.

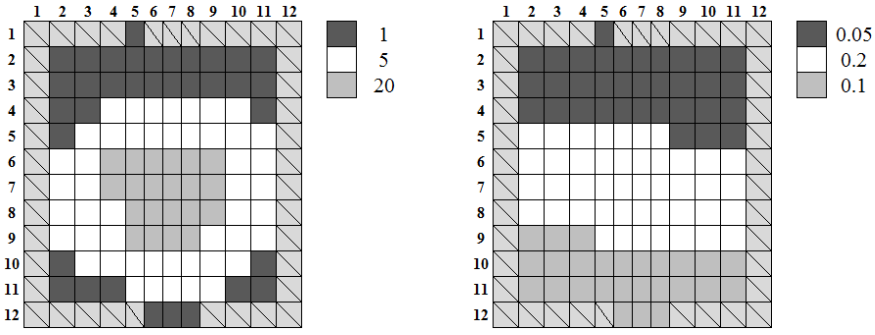
تغییرات (ناحیه و مقدار) پارامترهای آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی به ترتیب در شکل ۵ (a) و (b) ارائه شده است. در مسأله بهینه‌سازی حل معکوس مدل، همین پارامترها متغیرهای تصمیم یا مجهولات مسأله می‌باشند. بنابراین، پس از تهیه مدل آبخوان فرضی در مادفلو، ابتدا این مدل با مقادیر صحیح پارامترها اجرا گردید و مقدار هد محاسبه شده در سلول‌های متناظر چاه‌ها و در انتهای دوره شبیه‌سازی (تا دو رقم اعشار)، به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای مفروض برای حل معکوس مدل، در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر موجود در جدول ۱ نتایج حل معکوس مدل فرضی با استفاده از برنامه MF2005GA_P در یک اجرا، به صورت نمونه نشان می‌دهد.



[Lay. , Row , Col.]	Annual Pumping Vol. (MCM)
[1 , 3 , 3]	2.56
[1 , 4 , 9]	2.56
[1 , 6 , 4]	3.4
[1 , 10 , 5]	3.49
[1 , 9 , 10]	3.49

Fig 4 - Layout of the hypothetical aquifer components and the assumed Annual pumping volume (Ahmadi, 2015)

شکل ۴- جانمایی اجزای آبخوان فرضی و حجم پمپاژ سالانه مفروض (Ahmadi, 2015)



a - Hydraulic conductivity (m/day) **b - Specific yield**

Fig 5 - Spatial distribution of the hypothetical aquifer hydrodynamic parameters

شکل ۵- توزیع مکانی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان فرضی

www.SID.ir

Archive of SID

Table 1 – The MF2005GA_P program performance to achieve known parameters of hypothetical model

جدول ۱- عملکرد برنامه MF2005GA_P در رسیدن به پارامترهای معلوم مدل فرضی

Hydraulic conductivity (m/day)		Specific yield	
	0.95		0.05
	5.00		0.20
	19.97		0.10

در انتهای این مقدار RMSE به ۰/۰۶ متر (۶ سانتی‌متر) رسیده است و همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقادیر نهایی واسنجی با مقادیر صحیح این پارامترها (شکل ۵) اختلاف ناچیزی دارند. مدت‌زمان این اجرا، ۳۹ دقیقه بوده است که با توجه به تعداد تکرار (نسل) و اندازه جمعیت (۱۰۰۰۰۰ بار اجرای مادفلو)، بیانگر مؤثر بودن روش‌هایی است که برای کاهش مدت‌زمان اجرای برنامه، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این اجرا، نیمی از جمعیت در هر تکرار، جایگزین شده و پارامترهای دیگر الگوریتم ژنتیک یعنی نرخ جهش، اندازه جمعیت و حداکثر تکرار (تعداد نسل) به ترتیب ۰/۲، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ تعیین شده‌اند. شکل ۶ عملکرد الگوریتم ژنتیک را در این اجرا نشان می‌دهد. هر یک از اعضای جمعیت، یک RMSE متناظر دارند که کم‌ترین مقدار RMSE، متناظر بهترین عضو آن جمعیت است و RMSE متوسط، میانگین همه آن‌ها می‌باشد. مقادیر موجود در جدول ۱ بهترین جواب الگوریتم ژنتیک در این اجرا و بهترین عضو جمعیت آخر (آخرین نسل) است.

پس از مناسب بودن عملکرد کلی برنامه MF2005GA_P در برآورد پارامترهای مدل فرضی و پیش از کاربرد آن در مطالعه موردی، بهبود عملکرد الگوریتم ژنتیک مورد استفاده (Haupt and Haupt, 2004)، مدنظر قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا تأثیر مقادیر مختلف پارامترهای داخلی نظیر نرخ جهش بر عملکرد الگوریتم ژنتیک در چند اجرا بررسی شده و سپس به‌منظور اثربخشی بیشتر تکرارها، همگرایی و تکرارپذیری جواب‌های مناسب، در عملگرها یا روش‌های پیشروی الگوریتم، تغییراتی ایجاد شده است. از میان مواردی که مورد بررسی قرار گرفتند، تغییر زیر بیش‌ترین تأثیر را بر بهبود عملکرد این الگوریتم در پژوهش حاضر داشته است.

در الگوریتم مورد استفاده، جهش به‌صورت جایگزینی مقدار پیشین هر یک از مجهولات (ژن‌ها[۳۴]) با یک عدد تصادفی در بازه مجاز متناظر آن اتفاق می‌افتد و به‌جز در نظر گرفتن بازه مجاز مجهولات، تفاوت دیگری میان عضوها و جمعیت‌های مختلف در نوع جهش وجود ندارد.

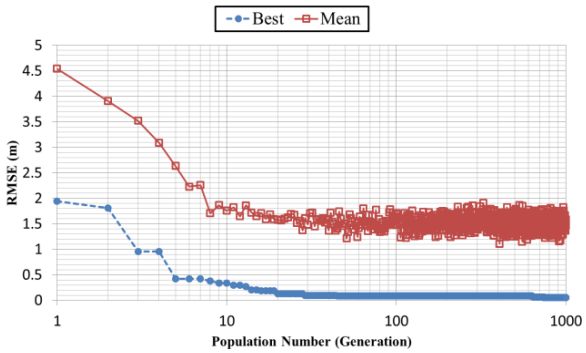


Fig 6 - The GA performance to achieve known parameters of hypothetical model

شکل ۶- عملکرد الگوریتم ژنتیک در رسیدن به پارامترهای معلوم مدل فرضی

در این مطالعه با تغییر این روند، ابتدا یک نرخ متوسط برای جهش، تعیین شده است تا مانع از همگرایی زودرس الگوریتم شود و نوع جهش نیز در این مرحله مشابه قبل می‌باشد. در حین اجرا، بر اساس عدم کاهش RMSE در تعداد معینی تکرار (که از پیش تعریف شده است)، نرخ جهش به میزان معینی افزایش می‌یابد؛ اما بخشی از جهش‌ها (کمتر از ابتدا)، مشابه قبل باقی می‌ماند و سایر جهش‌ها، مطابق رابطه ۲ که به الگوریتم اضافه شده است، اعمال می‌شوند. در رابطه ۲، جهش متناسب با محل و زمان جهش اعمال می‌گردد؛ به این مفهوم که مقدار پیشین مجهولات و شماره جمعیت در مقدار جهش یافته (پس از جهش) آن مجهول، مؤثر می‌باشند.

$$P_n = P_o + P_o \times F \times T \times (1 - \frac{ige}{(maxit + 1)}) \qquad (۲)$$

کاهش نرخ جهش تصادفی موجب همگرایی الگوریتم و کاهش RMSE متوسط می‌گردد و زمینه را برای اثربخشی بیش‌تر رابطه ۲ فراهم می‌آورد. در عین حال، حفظ تعداد هرچند اندک جهش تصادفی برای جلوگیری از باقی‌ماندن الگوریتم در نقاط بهینه محلی لازم است. در رابطه فوق P_n، P_o، ige و maxit به ترتیب مقدار جدید ژن (در اینجا پارامتر مدل)، مقدار پیشین آن ژن، شماره نسل (جمعیت) و حداکثر تعداد نسل (تکرار) می‌باشند؛ F یک ضریب ثابت کاهشی است و T ضریبی است که با احتمال برابر مقادیر یک یا منفی یک را می‌پذیرد. تکرار جواب‌های مناسب در چندین اجرا و همگرایی الگوریتم، از محاسن و اضافه شدن تعداد پارامترهای داخلی الگوریتم ژنتیک از محدودیت‌های روش پیشنهادی می‌باشد. شکل ۷ عملکرد

www.SID.ir

Archive of SID

الگوریتم ژنتیک در یکی از اجراهایی است که از روش فوق استفاده شده است.

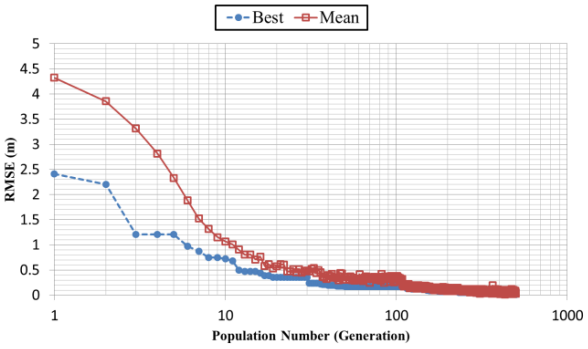


Fig 7 - Effect of proposed method on mutation on the GA performance

شکل ۷- تأثیر استفاده از روش پیشنهادی برای جهش بر عملکرد الگوریتم ژنتیک

تغییر عملگر انتخاب در الگوریتم مورد استفاده (Haupt and Haupt, 2004) و جایگزینی «چرخ رولت وزنی[۳۵]» با «تورنمنت» یا «انتخاب مسابقه‌ای» نیز مورد بررسی قرار گرفت. روش انتخاب مسابقه‌ای به علت عدم نیاز به مرتب‌کردن جواب‌ها و استفاده از احتمال به‌جای نرخ تزویج و جهش، تا حدودی سرعت اجرای بالاتری داشته و حین اجرا، حجم کمتری از حافظه رایانه را اشغال می‌کند؛ اما تغییر روش انتخاب و استفاده از روش انتخاب مسابقه‌ای، به‌تنهایی عملکرد الگوریتم ژنتیک مورد استفاده را از جنبه‌های مورد نظر (همگرایی و تکرارپذیری جواب‌های مناسب) بهبود نداده است.

۲-۶- مطالعه موردی

عملکرد برنامه MF2005GA_P که در پژوهش حاضر توسعه یافته است، با کاربرد آن به‌منظور واسنجی مدل آبخوان آزاد دشت ابهر، در مقیاس بزرگ‌تر و واقعی ارزیابی شده است. دشت ابهر در شرق استان زنجان با امتداد شمال غرب- جنوب شرق واقع شده است. این دشت از نواحی شمالی به ارتفاعات کوه‌های البرز و از جنوب به کوه‌های سلطانیه محدود می‌گردد. وسعت حوضه آبریز دشت، ۲۲۹۰ کیلومترمربع می‌باشد. حداکثر ارتفاع منطقه در جنوب غربی دشت ۲۷۰۰ متر و حداقل آن حدود ۱۳۷۰ متر از سطح دریا در ناحیه خروجی (حیدریه یامچی) است (Abkhan Consulting Engineers, 2003). شکل ۸ موقعیت تقریبی محدوده مدل‌سازی آبخوان ابهر را در استان زنجان و تصویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد.

به‌طور کلی تعداد ۵۸۰ حلقه چاه فعال در محدوده بیلان، وجود دارد که از این تعداد ۵۵ چاه دارای مصرف شهری، ۱۴ چاه دارای مصرف صنعتی، ۴۶۲ چاه دارای مصرف کشاورزی و ۴۹ چاه دومنظوره (کشاورزی و شهری یا کشاورزی و صنعتی) هستند. بر این اساس، سالانه ۲۴/۰۸ میلیون مترمکعب از چاه‌های شرب، ۱/۱۶ میلیون مترمکعب از چاه‌های صنعتی، ۱۹۲/۲۱ میلیون مترمکعب از چاه‌های کشاورزی، ۶/۰۹ میلیون مترمکعب از چاه‌های دومنظوره و در مجموع ۲۲۳/۵۴ میلیون مترمکعب از طریق کلیه چاه‌ها، از آبخوان برداشت صورت می‌گیرد (Alimohammadi and Hosseinzadeh, 2010).

محدوده مدل‌سازی، ۴۹۶ کیلومترمربع وسعت دارد که از یک لایه، ۴۴ سطر و ۳۹ ستون برای شبکه‌بندی آن استفاده شد. شبکه‌بندی این مدل در راستای افق، یکنواخت و ابعاد هر یک از سلول‌ها، ۱۰۰۰ متر در۱۰۰۰متر است (Abkhan Consulting Engineers, 2003). شکل ۹ نمای گسترده، شبکه‌بندی مدل و محل ۱۹ چاه‌های مشاهده‌ای را که در واسنجی مدل استفاده گردید، نشان می‌دهد.

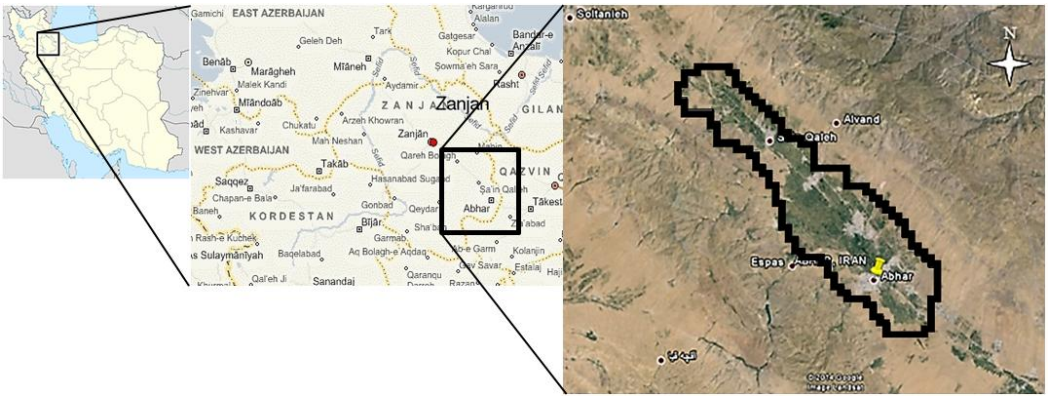


Fig 8 - Modeling area; Abhar–Zanjan aquifer, Iran (case study)

شکل ۸- محدوده مدل‌سازی، آبخوان ابهر - زنجان (مطالعه موردی)

www.SID.ir

Archive of SID

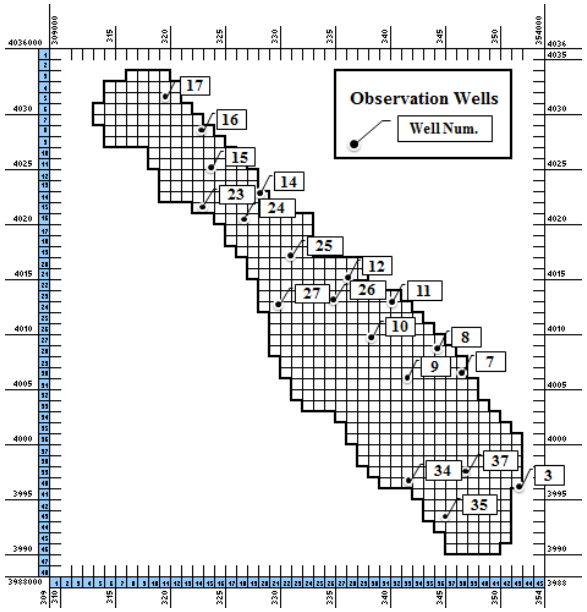


Fig 9 - Discretization of Abhar aquifer model and the location of the observation wells

شکل ۹- شبکه‌بندی مدل آبخوان ابهر و محل چاه‌های مشاهده‌ای

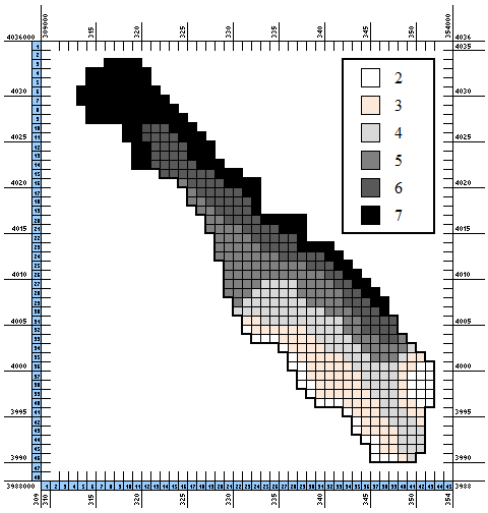
در واسنجی مدل آبخوان ابهر با روش سعی و خطا، اغلب داده‌های ورودی به مدل در دو حالت شبیه‌سازی در رژیم ماندگار و غیرماندگار، مورد تعدیل و تصحیح قرار گرفتند. در این روش، پس از برآورد اولیه پارامترهای هیدرودینامیک در تعدادی از نقاط محدوده مدل‌سازی با استفاده از نتایج آزمایش‌های پمپاژ، با بررسی RMSE در اجراهای متوالی، توزیع نهایی این پارامترها تعیین گردید (Abkhan Consulting Engineers, 2003). شکل ۱۰ تغییرات و توزیع نهایی هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه و جدول ۲ مقادیر نهایی این پارامترها را بر اساس نتایج روش سعی و خطا ارائه می‌دهند.

در پژوهش حاضر متناسب با اهداف و حدود تعریف شده، واسنجی مدل آب زیرزمینی آبخوان ابهر در رژیم غیرماندگار با استفاده از برنامه MF2005GA_P تکرار شده و نتایج آن با روش سعی و خطا مقایسه گردیده است.

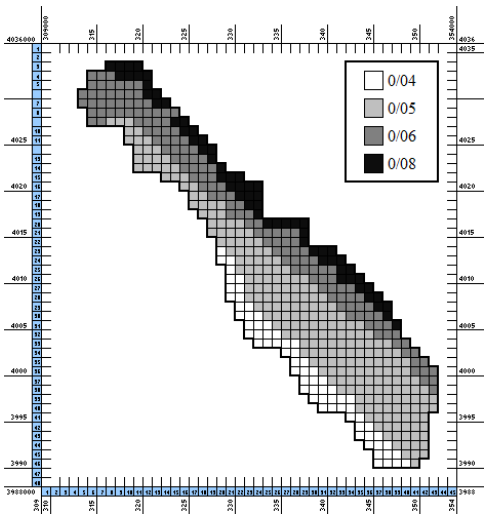
Table 2 – The results of the trial and error method for Abhar aquifer model calibration (Abkhan Consulting Engineers, 2003)

جدول ۲- نتایج روش سعی و خطا در واسنجی مدل آبخوان ابهر (Abkhan Consulting Engineers, 2003)

Hydraulic conductivity (m/day)		Specific yield	
HK 1	2	Sy 1	0.04
HK 2	3	Sy 2	0.05
HK 3	4	Sy 3	0.06
HK 4	5	Sy 4	0.08
HK 5	6	RMSE = 3.31 meters	
HK 6	7		



a - Hydraulic conductivity (m/day)



b - Specific yield

Fig 10 - Spatial distribution of Abhar aquifer hydrodynamic parameters (Alimohammadi and Hosseinzadeh, 2010)

شکل ۱۰- توزیع مکانی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان ابهر (Alimohammadi and Hosseinzadeh, 2010)

www.SID.ir

Archive of SID

در فرایند واسنجی، مقادیر پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه (در مجموع ۱۰ پارامتر) به‌عنوان مجهولات مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف RMSE (رابطه ۱) تعیین شده‌اند و سایر مشخصات مدل شامل ناحیه‌بندی این پارامترها، ورودی‌های مدل (داده‌های معلوم) در نظر گرفته شده‌اند. طول این دوره شبیه‌سازی یک سال است که به ۱۲ دوره تنش مطابق با ۱۲ ماه سال تقسیم شده است؛ بنابراین با احتساب ۱۹ چاه مشاهده‌ای، ۲۲۹ داده ثبت شده برای هد یا تراز سطح آب زیرزمینی در دوره شبیه‌سازی وجود دارد.

همان‌طور که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، اغلب چاه‌های مشاهده‌ای در مرکز سلول‌های شبکه مدل قرار ندارند. در MODFLOW-2005 به‌نوعی امکان تعیین مختصات چاه‌ها و در نظر گرفتن نقاط مشاهده‌ای با فاصله از مرکز سلول، وجود دارد و این تغییر در مقادیر محاسباتی متناظر چاه‌های مشاهده‌ای، تأثیرگذار است (Harbaugh and Hill, 2013)؛ اما در Visual MODFLOW 2.8.2 که مدل آبخوان ابهر با استفاده از آن تهیه گردید، با وجود دریافت مختصات چاه، مطابق بررسی نتایج خروجی این مختصات در مقادیر محاسباتی متناظر چاه‌های مشاهده‌ای تأثیری نداشته و مقادیر محاسباتی، همان مقادیر مراکز سلول‌های مدل می‌باشند.

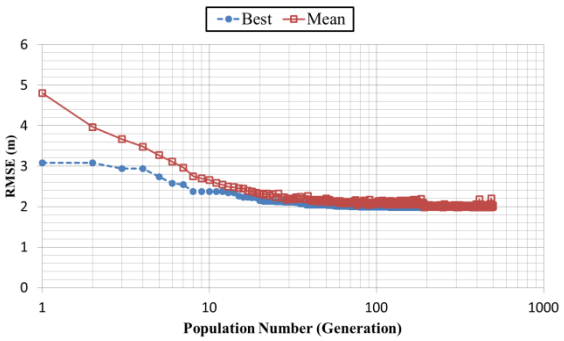
تعیین سطح خطای مطلوب برای تعیین مقادیر نهایی (صحیح) واسنجی، با توجه به منطقه مورد مطالعه و تمامی عوامل تأثیرگذار از جمله شیب یا گرادیان سطح آب زیرزمینی صورت می‌گیرد و بر این اساس در برخی مناطق رسیدن به خطای ۲۰ متر نیز ممکن است مورد قبول باشد. با فرض اینکه دقت اندازه‌گیری داده‌های هد مشاهده‌ای در حد سانتی‌متر باشد به منظور رسیدن به حداقل ممکن RMSE سطح خطای مطلوب ۰/۰۱ متر تعیین گردیده است. در عین حال در صورت عدم دستیابی به این سطح (که محتمل می‌باشد)، پارامتر حداکثر تکرار یا تعداد نسل الگوریتم ژنتیک، محدودکننده اجرای برنامه MF2005GA_P می‌باشد.

در الگوریتم ژنتیک مورد استفاده می‌بایست برای پارامترهای مدل (متغیرهای تصمیم یا ژن‌ها) حدودی تعیین شود (Haupt and Haupt, 2004). تعیین حدود بالا و پایین برای پارامترها، در اغلب مدل‌های معکوس وجود دارد؛ اما تعیین مقدار این حدود و تأثیر آن، مورد بحث می‌باشد (Hill and Tiedman, 2007)؛ رسیدن به این حدود و معرفی آن‌ها به‌عنوان مقدار یک یا تعدادی از پارامترها، از اعتبار مقادیر برآورد شده می‌کاهد. در پژوهش حاضر، حد پایین پارامترها به‌منظور جلوگیری از توقف اجرای مادفلو، ۰/۰۰۱ و نیز حد بالای پارامترها به‌صورت اولیه یک مقدار منطقی متناسب با نوع پارامتر در نظر گرفته شده و بنا به نیاز و برای بررسی عملکرد برنامه، افزایش یافته است.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

پس از تهیه فایل‌های ورودی، برنامه MF2005GA_P برای حل معکوس مدل آبخوان ابهر و تعیین پارامترهای مورد نظر، اجرا گردید. با توجه به ساختار کلی الگوریتم ژنتیک (عملگرهای تصادفی و وجود پارامترهای داخلی)، عملکرد برنامه در چند اجرا بررسی شده است. مقدار RMSE در اغلب اجراها، کمتر از ۲/۵ متر و در بهترین اجرا به کمتر از ۲ متر نیز کاهش یافته است؛ در حالی که این مقدار بر اساس نتایج واسنجی با روش سعی و خطا بیش از ۳ متر می‌باشد.

شکل ۱۱ عملکرد الگوریتم ژنتیک را در بهترین اجرا نمایش می‌دهد. مقادیر پارامترهای اصلی الگوریتم در این اجرا نیز در کنار همین شکل ارائه شده است. مدت‌زمان این اجرا (شامل ۵۰۰۰۰ بار اجرای مادفلو)، حدود ۷۰ دقیقه بوده است.



GA main parameters	
parameter	value
Crossover rate and Selection ratio	0.5
Initial mutation rate	0.02
Population size	100
Number of Generations or Maximum Iteration	500
F coefficient in (2) formula	0.01

Fig 11 - GA internal parameters and its performance in Abhar aquifer model calibration

شکل ۱۱- پارامترهای داخلی و عملکرد الگوریتم ژنتیک در واسنجی مدل آبخوان ابهر

www.SID.ir

Archive of SID

مجموع خطاهای مطلق (ABSE)، مجموع مربع خطاها (SQE) و RMSE، برای مدل واسنجی شده با استفاده از برنامه MF2005GA_P، به ترتیب ۳۸، ۶۴ و ۴۰ درصد نسبت به نتایج واسنجی با روش سعی و خطا، کاهش یافته‌اند. از طریق تعریف سیستماتیک مسأله بهینه‌سازی با تابع هدف کمینه‌سازی RMSE (رابطه ۱)، مقادیری برای پارامترهای مدل آبخوان ابهر تعیین شده‌اند که در مجموع اختلاف میان هدهای محاسباتی و مشاهداتی متناظر تا حد امکان کاهش یابد؛ در حالی‌که با همین تعریف و به دلیل محدودیت‌های روش سعی و خطا به‌نظر می‌رسد که این روند، کامل نگردید. در ۷۰ درصد داده‌ها، مقادیر محاسباتی با استفاده از نتایج برنامه MF2005GA_P نسبت به نتایج روش سعی و خطا، به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر می‌باشند. شکل ۱۲ نتایج این دو روش را برای هر یک از داده‌های مشاهده‌ای (۲۲۹ داده) در قالب توان دوم اختلاف میان هد مشاهداتی و محاسباتی نمایش می‌دهد.

شکل ۱۳ تفاوت مقدار خطای مطلق در رسیدن به مقادیر مشاهداتی را برای هر یک از این دو روش، نمایش می‌دهد. در واسنجی خودکار با الگوریتم ژنتیک حدود ۴۰ درصد خطاها به یک متر یا کمتر کاهش یافته و در مجموع بیش از ۹۰ درصد خطاها به کمتر از ۴ متر رسیده است؛ اما در انتهای واسنجی با روش سعی و خطا، هنوز ۲۰ درصد داده‌های محاسباتی بیش از ۴ متر با مقادیر مشاهداتی متناظر اختلاف دارند که در این میان اختلاف‌های بیش از ۵ و حتی ۱۰ متر نیز ملاحظه می‌شود.

با توجه به تعریف تابع هدف (رابطه ۱) و یکسان در نظر گرفتن ارزش هر یک از داده‌ها، شکل‌های ۱۲ و ۱۳ تصویر مناسب‌تری از عملکرد برنامه ارائه می‌دهند؛ در عین حال هیدروگراف محاسباتی که حاصل شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در آبخوان ابهر پس از واسنجی مدل با این دو روش می‌باشد، در کنار هیدروگراف مشاهداتی (اندازه‌گیری‌شده)، برای ۴ چاه مشاهده‌ای (شکل ۹) در نمودارهای شکل ۱۴ ارائه شده‌اند. در ۷۵ درصد از چاه‌های مشاهده‌ای، نتایج مدل واسنجی‌شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به نتایج روش سعی و خطا، در مجموع تطابق مناسب‌تری با داده‌های مشاهده‌ای دارند.

در چاه شماره ۱۲، هیدروگراف‌های محاسباتی کاملاً بالاتر از هیدروگراف مشاهداتی می‌باشد (شکل ۱۴- a)؛ یعنی بر اساس نتایج شبیه‌سازی، سطح آب زیرزمینی در موقعیت این چاه در تراز بالاتری نسبت به مقادیر مشاهده شده متناظر قرار گرفته است. اما روند تغییرات تراز سطح آب در مدلی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک واسنجی شده است به روند تغییرات ثبت شده نزدیک‌تر می‌باشد که سبب شده RMSE در مجموع حدود ۲۰ درصد در این چاه کاهش یابد. تا میانه دوره شبیه‌سازی، هیدروگراف‌های محاسباتی برای هر دو روش روند نسبتاً مشابهی دارند و تراز سطح آب به سبب تعادل نسبی میان برداشت از آب زیرزمینی و تغذیه آب زیرزمینی تغییرات زیادی ندارد ولی در نیمه دوم دوره شبیه‌سازی تغییر پارامترها در واسنجی خودکار موجب افت بیش‌تر سطح آب زیرزمینی شده است. اما هیدروگراف خروجی مدلی که با روش سعی و خطا واسنجی گردید، همچنان روند یکنواخت دارد و موجب شده تا خطای مدل در برآورد مقادیر مشاهداتی افزایش یابد.

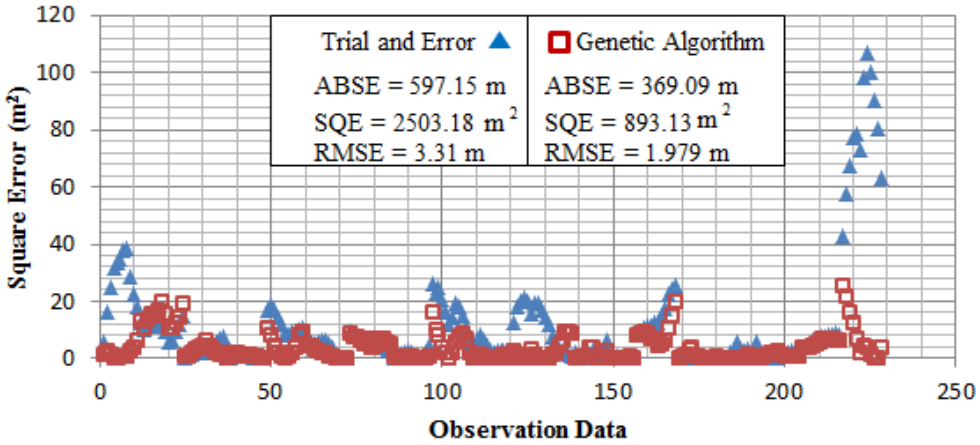
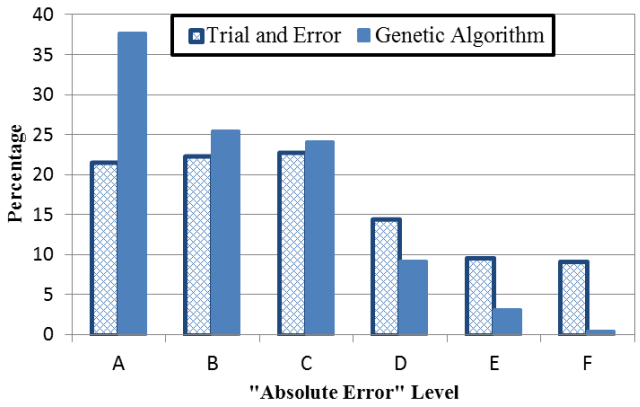


Fig 12 – Comparison of "square error" in Abhar aquifer model calibration using the two methods

شکل ۱۲- مقایسه"توان دوم خطا" در واسنجی مدل آبخوان ابهر با استفاده از دو روش

www.SID.ir

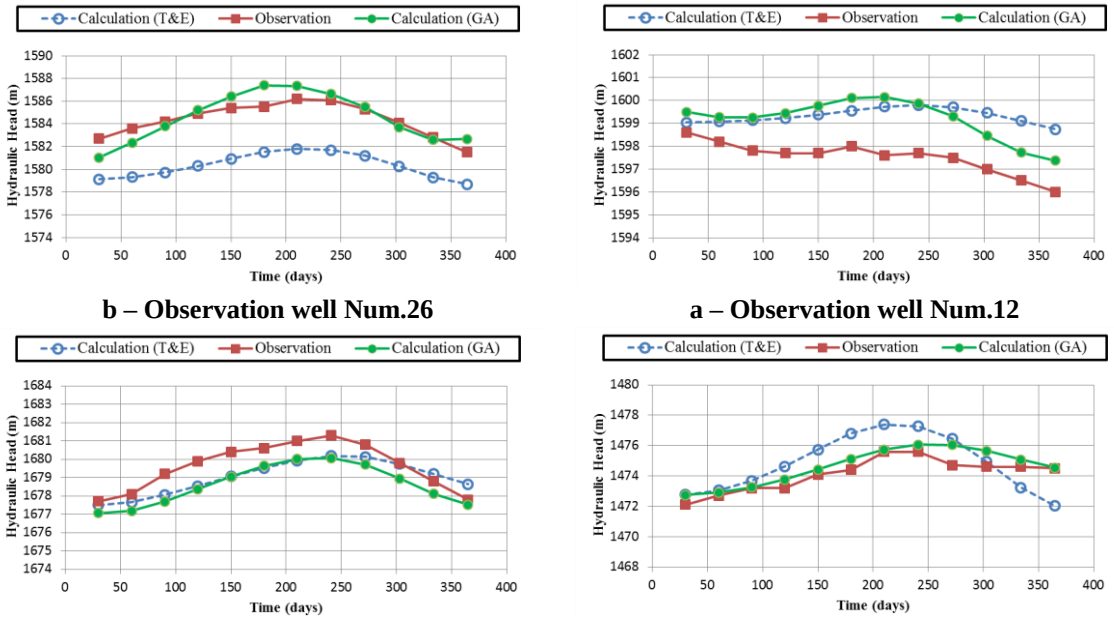
Archive of SID



"Absolute Error" Levels Definition	
A	Less than or equal (LE.) 1 meters
B	Greater than 1 and LE. 2 meters
C	Greater than 2 and LE. 3 meters
D	Greater than 3 and LE 4 meters
E	Greater than 4 and LE. 5 meters
F	Greater than 5 meters

Fig 13 – Comparison of "absolute error" in Abhar aquifer model calibration using the two methods

شکل ۱۳- مقایسه "خطای مطلق" در واسنجی مدل آبخوان ابهر با استفاده از دو روش



b – Observation well Num.26

a – Observation well Num.12

d – Observation well Num.14

c – Observation well Num.37

Fig 14 – Comparing the fitting of calculated and observed hydrographs in four observation wells in Abhar aquifer

شکل ۱۴- مقایسه تطابق هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در ۴ چاه مشاهده‌ای آبخوان ابهر

مطابق شکل ۱۴- b و c، در چاه‌های شماره ۲۶ و ۳۷، هیدروگراف محاسباتی بر اساس نتایج واسنجی الگوریتم ژنتیک تطابق بسیار خوبی با هیدروگراف مشاهداتی دارد؛ به‌طوری که RMSE در سلول متناظر چاه شماره ۲۶ به حدود یک متر و در چاه شماره ۳۷ به کمتر از ۰/۵ متر رسیده و به ترتیب بیش از ۹۰ و ۸۰ درصد نسبت به نتایج واسنجی با روش سعی و خطا، کاهش یافته است.

در چاه شماره ۱۴ مقدار RMSE بر اساس نتایج واسنجی با الگوریتم ژنتیک حدود یک متر می‌باشد؛ با این حال حدود ۳۰ سانتی‌متر (۲۵ درصد) نسبت به نتایج روش سعی و خطا افزایش دارد. روند کلی هیدروگراف محاسباتی مدلی که با الگوریتم ژنتیک واسنجی شده است به روند هیدروگراف مشاهداتی نزدیک‌تر است ولی کاملاً پایین‌تر از آن قرار گرفته و تراز سطح آب زیرزمینی در این چاه به‌طور متوسط حدود ۱/۵ متر کمتر برآورد شده است. به صورت نقطه‌ای به

www.SID.ir

Archive of SID

جز دو نقطه میانی و نقطه انتهایی، مقادیر محاسباتی با استفاده از مدل واسنجی شده با روش سعی و خطا اختلاف کمتری با مقادیر مشاهداتی متناظر دارند.

در اجرایی که نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت، مقادیر موجود در جدول ۳ برای پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب آبدهی ویژه مدل، برآورد شده است.

با در نظر گرفتن ناحیه این پارامترها در شکل ۱۰، مقادیر برآورد شده به لحاظ مکانی تا حدودی ناگهانی تغییر می‌کنند؛ یعنی تغییر تدریجی مقدار یک نوع پارامتر که معمولاً موجه‌تر می‌باشد و در واسنجی مدل آبخوان ابهر با روش سعی و خطا نیز دیده می‌شود (جدول ۲)، در این مقادیر تا حدودی ملاحظه نمی‌گردد. همچنین، مقدار Sy3 خارج از حدود معمول برای پارامتر آبدهی ویژه است. با توجه به معیار واسنجی (تابع هدف کمینه‌سازی RMSE) و تعریف مسأله، این موارد غیرقابل انتظار نبوده و از محدودیت‌های روش‌های حل معکوس مدل یا واسنجی خودکار، محسوب می‌شود.

Table 3 - Results of Abhar aquifer model calibration using MF2005GA_P

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل آبخوان ابهر با استفاده از MF2005GA_P

Hydraulic conductivity (m/day)		Specific yield	
HK 1	1.27	Sy 1	0.43
HK 2	30.34	Sy 2	0.056
HK 3	1.05	Sy 3	0.00137
HK 4	8.54	Sy 4	0.1
HK 5	10.32	RMSE = 1.98 meters	
HK 6	16.69		

از میان اجراهایی که در بخش مطالعه موردی انجام شده است، مقادیر برآورد شده برای ۹ پارامتر، تقریباً یکسان بوده است (با در نظر گرفتن عملکرد کلی الگوریتم و به‌جز مواردی که حدود پارامترها، مانع از تغییر آن‌ها شده باشند) و فقط پارامتر HK2 مقادیر متفاوتی را در اجراهای مختلف داشته است که نشان دهنده حساسیت کمتر نتایج واسنجی نسبت به مقدار این پارامتر می‌باشد. با توجه به عملکرد کلی الگوریتم ژنتیک بخش عمده بهبود جواب‌ها در بخش نزولی ابتدایی نمودار اتفاق می‌افتد ولی تغییر پارامترها مطابق تعریف مسأله به منظور کاهش حتی ۱ سانتی‌متر (۰/۰۱ متر) از RMSE در بازه مجاز تعیین شده برای آن‌ها تداوم می‌یابد. بر این اساس و به سبب گستردگی نسبی بازه مذکور که دلیل آن پیش‌تر بیان گردید، مقادیر بـــرخی پارامترها بیش از حد افزایش یا کاهش یافته است (مانند HK2 و Sy3).

الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به جوابی که موجب کمینه‌سازی RMSE شود، جواب‌های مختلفی را بررسی می‌کند. چاپ همه این جواب‌ها به برنامه اصلی افزوده شده است؛ بر این اساس با مرتب کردن جواب‌ها برحسب RMSE متناظر، جواب ارائه شده در جدول ۴ انتخاب گردیده است که با وجود RMSE بیش‌تر نسبت به بهترین جواب، به‌لحاظ توزیع مکانی پارامترها متناسب‌تر محسوب می‌شود.

Table 4 - Results of Abhar aquifer model calibration with MF2005GA_P; Using other reviewed solutions in the GA search trend

جدول ۴- نتایج واسنجی مدل آبخوان ابهر با MF2005GA_P ؛ استفاده از سایر جواب‌های بررسی شده در روند جستجوی الگوریتم ژنتیک

Hydraulic conductivity (m/day)		Specific yield	
HK 1	1.93	Sy 1	0.2
HK 2	7.99	Sy 2	0.044
HK 3	1.6	Sy 3	0.01
HK 4	8.37	Sy 4	0.1
HK 5	10.3	RMSE = 2 meters	
HK 6	16.1		

علاوه بر برخی محدودیت‌های کلی از جمله اطلاعات نادرست که ممکن است توسط مالکین چاه‌های بهره‌برداری ارائه شده باشند، وجود چاه‌هایی که دارای مجوز نیستند و وجود منابع تغذیه کننده و تخلیه کننده ناشناخته و نیز برخی از محدودیت‌های نرم‌افزاری (از جمله تفاوت تعریف چاه مشاهده‌ای در مادفلو نسبت به واقعیت)، با توجه به حدود تعریف شده برای پژوهش حاضر، تغییر ساختار مدل آبخوان ابهر مدنظر قرار نگرفته است. در برخی موارد تغییر ناحیه پارامترها، حذف تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای از تابع هدف، اضافه نمودن تعدادی چاه دیگر یا تعیین وزن یا ارزش متفاوت برای هر یک از داده‌های مشاهده‌ای، ممکن است تأثیر بیشتری بر بهبود نتایج واسنجی مدل داشته باشد.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، با تهیه برنامه MF2005GA_P، روش پیشنهادی در قالب یک مسأله فرضی مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به‌منظور ارزیابی آن در حل معکوس و تعیین پارامترهای مورد نظر (هدایت

www.SID.ir

Archive of SID

هیدرولیکی و آبدهی ویژه) در مقیاس بزرگ‌تر و واقعی، از اطلاعات مربوط به مدل آبخوان ابهر به‌عنوان مطالعه موردی استفاده شد.

عملکرد کلی برنامه با توجه به نزدیک بودن مقادیر برآورد شده به مقادیر مفروض پارامترهای هیدرودینامیکی در آبخوان فرضی و کاهش حدود ۴۰ درصدی RMSE نسبت به نتایج واسنجی با روش سعی و خطا در مطالعه موردی، مطابق تعریف معیار ارزیابی، مناسب است. مهم‌ترین نتایج حاصل، عبارتند از:

۱- رویکرد داخلی و استفاده از ویژگی کدباز بودن مادفلو، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته و در اکثر مطالعات قبلی یا مادفلو کنار گذاشته شده یا کد بهینه‌سازی به مادفلو متصل شده بود. در ساختار و رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، به‌دلیل تبادل داخلی متغیرهای اصلی (مانند RMSE)، کاهش محسوسی در مدت زمان اجرای برنامه نسبت به رویکرد اتصال کدهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حاصل گردیده است. مدت‌زمان اجرای کامل برنامه در حل معکوس مدل فرضی، ۳۹ دقیقه برای ۱۰۰۰۰۰ بار تکرار (اجرای مادفلو) و در بخش مطالعه موردی، ۷۰ دقیقه برای ۵۰۰۰۰ بار تکرار است.

۲- استفاده از آخرین نسخه مادفلو (MF2005) از دیگر موارد شاخص مطالعه حاضر می‌باشد. همچنین برنامه به‌گونه‌ای تنظیم شده است که قابلیت ارتقای نسخه مادفلو را داشته باشد.

۳- استفاده از مقدار واقعی مجهولات (پارامترها) به‌جای مقادیر کدگذاری شده در الگوریتم ژنتیک که علاوه بر افزایش سرعت همگرایی الگوریتم، معمولاً برای مسائلی با تعداد مجهولات زیاد و فضای جستجوی پیوسته عملکرد بهتری دارد. تکمیل و تهیه الگوریتم ژنتیک حقیقی یا پیوسته به زبان فرترن ۹۰ برای ارتباط با مادفلو از نکات مهم این مطالعه است و به‌نوعی از نوآوری‌های این کار محسوب می‌شود.

۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک در برآورد پارامترهای هدایت هیدرولیکی و آبدهی ویژه، متناسب با تابع هدف یا معیار واسنجی تعریف‌شده، مناسب ارزیابی می‌شود. خطای حدود ۶ سانتی‌متر در رسیدن به مقادیر مشاهداتی مفروض در مدل فرضی با برآورد مقادیری بسیار نزدیک به پارامترهای معلوم این مدل و کاهش ۴۰ درصدی RMSE نسبت به نتایج واسنجی با روش سعی و خطا، مشخصه‌هایی از این عملکرد می‌باشند.

۵- با وجود کاهش قابل‌قبول مقدار RMSE، تا حدودی مقادیر برآورد شده برای پارامترهای مطالعه موردی، نامتناسب می‌باشند. این مورد، با توجه به اینکه فقط RMSE به‌عنوان معیار ارزیابی بوده است، غیرقابل انتظار نبوده و از محدودیت‌های روش واسنجی خودکار می‌باشد. در مطالعه حاضر، از بررسی روند جستجوی الگوریتم ژنتیک در انتهای اجرای برنامه برای انتخاب جواب متناسب‌تر استفاده گردید.

۶- با وجود اینکه کاهش RMSE، موجب کاهش کلی خطا و نیز در اکثر چاه‌های مشاهده‌ای نسبت به استفاده از روش سعی و خطا شده است ولی وجود اختلاف ترازهایی در حدود ۵ یا ۶ متر، ضرورت بررسی‌های کامل‌تر و عدم اکتفا به کاهش RMSE را نشان می‌دهد.

۷- استفاده از روش واسنجی خودکار می‌تواند به درک کامل‌تر و رفع نواقص مدل تهیه‌شده کمک کند. ممکن است تغییر ناحیه‌بندی پارامترها، خارج کردن تعدادی از چاه‌های مشاهداتی از فرایند واسنجی و اضافه کردن تعدادی چاه جدید، به‌منظور رسیدن به مدل واسنجی‌شده ضرورت داشته باشد. البته، تعیین معیار واسنجی متناسب با تمامی اطلاعات موجود و صحت‌سنجی نتایج، دو گام مهم در واسنجی خودکار یا حل معکوس مدل محسوب می‌شود.

پی‌نوشت‌ها

1- Deterministic
2- MODFLOW
3- Calibration
4- Objective function
5- Traditional
6- Metaheuristic
7- John Holland
8- Noise
9- Link
10- Remediation
11- Local
12- Steady
13- Parallelization
14- Alternative
15- Open source
16- Zonation, Parameterization
17- Parameter identification
18- Inverse problem
19- Crossover, Recombination, Reproduction
20- Mutation
21- Binary
22- Compile
23- Tournament selection
24- Elitist
25- Finite Difference Method (FDM)
26- Gridding
27- Nodes

www.SID.ir

Archive of SID

28- Batch file
29- Compiler
30- Hydraulic Head
31- Compaq Visual Fortran (CVF)
32- Unsteady, Transient
33- Stress Period
34- Genes
35- Weighted Roulette Wheel

۵- مراجع

Abkhan Consulting Engineers (2003) Project of conjunctive use of Abhar plain water resources, vol. 9: Groundwater simulation model, Tehran, 72p (In Persian)

Ahmadi A (2015) Inverse solution for groundwater models using meta-heuristic algorithms, MSc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran (In Persian)

Alimohammadi S, Hosseinzadeh H (2010) Conjunctive use of surface water and groundwater resources in Abhar river basin. Journal of Water and Wastewater 21(3):75-87 (In Persian)

Anderson MP, Woessner WW (1992) Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport. Academic Press, New York, 381p

Delleur JW (2007) The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd Ed., CRC Press, Taylor and Francis, New York, Chapter 23:816-867

Dréo J, Candan C (2011) Metaheurisrics (access date: Sep. 10, 2014) <http://www.wikipedia.com/metaheuristics/>

Goldberg DE (2006) Genetic Algorithms. Addison-Wesley, New York, 412p

Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model—The ground-water flow process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 253p

Harbaugh AW, Hill MC (2013) Observations in MODFLOW-2005. USGS 9-21-2009, 32p

Haupt RL, Haupt SE (2004) Practical Genetic Algorithms. Wiley, New York, 253p

Hill MC, Tiedeman CR (2007) Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty. Wiley, New York, 455p

Ataie-Ashtiani B, Rajabi MM, Ketabchi H (2013) Inverse modelling for freshwater lens in small islands: Kish Island, Persian Gulf. Journal of Hydrogeological Processes 27(19): 2759-2773

Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015a) Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges, Journal of Hydrology 520:193-213

Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015b) Review: Coastal groundwater optimization - advances, challenges, and practical solutions. Hydrogeology Journal 23:1129-1154

Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B (2015c) Assessment of a parallel evolutionary optimization approach for efficient management of coastal aquifers. Journal of Environmental Modelling and Software 74:21-38

Kresic N. (1997) Hydrogeology and Groundwater Modeling. Taylor and Francis, London, 461p

Lingireddy S (1998) Aquifer parameter estimation using genetic algorithms and neural networks. Journal of Civil Engineering Systems 15(2):125-144

Madsen KM, Perry AE (2010) Using genetic algorithms on groundwater modeling problems in a consulting setting. In: Proc. of Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy, Oct., USA. 15(1):103-114

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

Nicklow J, Reed P, Savic D, Dessalegne T, Harrell L, Chan-Hilton A, Karamouz M, Minsker B, Ostfeld A, Singh A, Zechman E (2010) State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. Journal of Water Resources Planning and Management 136(4):412-432

Office of Groundwater (OGW), USGS (2011) Status of MODFLOW Versions and MODFLOW-related programs. 3p (access date: Nov. 5, 2014) <http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow-status/>

Poeter EP, Hill MC (1997) Inverse models: A necessary next step in ground-water modeling. Journal of Groundwater 35(2):250-260

Solomatine DP, Dibike YB, Kukuric N (1999) Automatic calibration of groundwater models using global optimization techniques. Journal of Hydrological Sciences 44(6):879-894

Sun NZ (1999) Inverse problem in groundwater modeling. Springer, New York, 337p

www.SID.ir

Archive of SID

Zahraie B, Hosseini S.M (2009) Genetic algorithm and engineering optimization, Gutenberg, Tehran, 260p (In Persian)

Zheng C. (1997) ModGA: Documentation and user's guide, Using Genetic Algorithms for parameter estimation. Technical Report to DuPont Company, Hydrogeology Group, University of Alabama, 6p (access date: Mar. 15, 2014) <http://hydro. geo.ua.edu/zheng/>

Wang M, Zheng, C (1996) Aquifer parameter estimation under transient and steady-state conditions using genetic algorithms. In: Proc. of ModelCARE 96 Conference, Colorado, Sep., IAHS Publications-Series and Reports, Hydrological Sciences 237:21-30

Yeh WWG (1986) Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem. Journal of Water Resources Research 22(2):95-108

www.SID.ir