کالیبراسیون خودکار پارامترهای آبخوان با استفاده از مدل ریاضی گسترده آبخوان و الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم

محمود محمدرضاپور طبری[1] مهدی ایل‌بیگی[2]

(دریافت ۹۱/۷/۲۶ پذیرش ۹۲/۱/۲۹)

چکیده

شبیه‌سازی رفتار آبخوان به‌منظور تعیین میزان بهره‌برداری و برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از این منابع بسیار مهم است. در این خصوص مدل‌های آب زیرزمینی با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی اقدام به پیش‌بینی کمّی و کیفی پارامترهای آبخوان می‌نمایند. از آنجا که شناخت صحیح این پارامترها می‌تواند منجر به افزایش دقت شبیه‌سازی آبخوان گردد، لذا تخمین مقادیر متناسب با پارامترهای ورودی مدل از اهمیت بالایی برای برنامه‌ریزی در شرایط واقعی برخوردار است. لذا در این مطالعه مدلی بر پایه روشهای پیشرفته بهینه‌یابی به‌منظور کالیبره نمودن پارامترهایی با دقت پایین (ضرایب هیدرودینامیکی، مقادیر برداشت و تغذیه آبخوان) تدوین گردید. در مدل پیشنهادی، حداقل نمودن مجموع میزان اختلافات بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی تراز سطح آب زیرزمینی در طول دوره شبیه‌سازی به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. بازه مجاز تغییرات پارامترهای مورد کالیبراسیون به‌عنوان محدودیتهای مسئله لحاظ گردید. برای تعیین مقدار تراز در هر سلول، از روابط حاکم بر محیطهای متخلخل استفاده شد که بر اساس روش اختلاف محدود این روابط حل شدند. با اجرای مدل پیشنهادی مقدار بهینه پارامترها در هر سلول تعیین گردید. بررسی مقادیر تراز شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده دقت بالای رویکرد ارائه شده در تخمین صحیح پارامترهای آبخوان است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی ریاضی، کالیبراسیون خودکار، آبخوان، بهینه‌سازی، مدل گسترده، پارامترهای مدل

Auto-Calibration of Aquifer Parameters Using Aquifer Distributed Mathematical Models and Direct Searching Algorithm

M. Mohammad Rezapour Tabari[1] *M. Eil beigi*[2]

(Received Oct. 17, 2012 Accepted Apr. 18, 2013)

Abstract

Simulation of behavior of aquifers into determining groundwater exploitation rate and planning for sustainable use of groundwater is very important. In this regard, groundwater models using hydraulic, hydrological and hydro-geological parameters were developed to predict the quality and quantity of aquifer parameters. Good knowledge of these parameters can be increase the accuracy of aquifer simulation. For this purpose, a structure based on advance optimization methods for calibration of parameters with low accuracy (coefficient of hydrodynamic, aquifer recharge and withdrawal rates) were developed. In the proposed model, minimizing the sum of the square differences between simulated and observed groundwater level was considered as the objective function. Allowable range of calibration parameters has been considered as constraints. The governing flow equations of the aquifer used to determine the groundwater level in each cells. These equations were solved by the finite difference method. by runing the proposed model, the optimal values of parameters were determined in each cell. The comparison between simulated and observed groundwater level shows the capability of the proposed approach in accuratey estimation of the aquifer parameters.

Keywords: Mathematical Model, Auto-Calibration, Aquifer, Optimization, Distributed Model, Model Parameters.

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد
(نویسنده مسئول) ۰۹۱۲۲۴۹۲۶۱۵ mrtabari@eng.sku.ac.ir
۲- دانشجوی دکترای هیدروژئولوژی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز

1. Assist. Prof. of Civil Eng., Dept. of Eng., Shahrekord University, Shahrekord
(Corresponding Author) 09122492615 mrtabari@eng.sku.ac.ir
2. Ph.D. Student of Hydrogeology, Faculty of Sciences, Shahid Chamran University, Ahwaz

۱- مقدمه

محدودیت منابع آب منجر به بهره‌برداری بیش از ظرفیت آبخوان‌ها شده که این امر خسارات جبران‌ناپذیری را به منابع آبی وارد نموده است. لذا مدیریت آبهای زیرزمینی باید به‌عنوان یک اصل در برنامه‌ریزی‌های کشور قرار گیرد. بدون شک بهترین حالت شناخت رفتار یک سیستم آب زیرزمینی، انجام تحقیقات طویل مدت برای هر منطقه است که عملاً امکان‌پذیر نیست. لذا با شبیه‌سازی می‌توان با دقت قابل قبولی شرایطی مشابه آنچه در طبیعت موجود است را به وجود آورد. هدف از این شبیه‌سازی‌ها، انطباق شرایط مدل با شرایط طبیعی بوده و بر اساس آن می‌توان با تغییر در محل، مقدار و زمان برداشت، به بررسی اثرات بهره‌برداری از سفره پرداخت.

تهیه مدل ریاضی این امکان را فراهم می‌سازد که بر اساس آمار و اطلاعات موجود رفتار سفره آب زیرزمینی مورد نظر را شبیه‌سازی نموده و با استفاده از مدل، در صورت اعمال هر گونه تغییر در شرایط تخلیه، تغذیه و شرایط مرزی، وضعیت آینده سفره را در هر نقطه و هر زمان تعیین نمود. به‌منظور شبیه‌سازی و یا پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی پارامترهای هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و هیدروژئولوژیکی بسیاری دخیل می‌باشند که به‌دلیل نبود اطلاعات صحیح از این پارامترها و یا عدم دقت در داده‌های اندازه‌گیری شده نمی‌توان به شناخت صحیحی از رفتار آبخوان دست یافت. برای این منظور کالیبره نمودن این پارامترها می‌تواند خطاهای شبیه‌سازی را حداقل نماید. فرایند کالیبراسیون در واقع حداقل نمودن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی با استفاده از یکی از روشهای محاسباتی است.

تحقیقات اولیه مطالعات مرتبط با تخمین پارامترهای آبخوان به‌منظور مدل‌سازی آن توسط کررا و همکارن در سال ۱۹۸۹ صورت گرفت که در آن مبانی تخمین پارامترهای آبخوان به‌صورت تئوری و کاربردی ارائه شده است. در این مطالعه تمرکز اصلی بر روی مدل‌های معکوس برای دستیابی به مقادیر کالیبره شده بوده است [۱].

بررسی‌های تیری در سال ۱۹۹۴ نشان داد که مدل‌های معکوس به‌دلیل ناپایداری زیاد در دستیابی به مقادیر کالیبره شده از دقت بالایی برخوردار نبوده و منجر به ارائه مقادیر غیر واقعی از پارامترهای مورد کالیبره می‌گردند. این محقق برای کالیبراسیون، روش منطقه‌بندی محدوده مدل‌سازی و استفاده از الگوریتم‌های کلاسیک ریاضی را پیشنهاد نمود [۲].

با توسعه روشهای تشریح شده، به‌کارگیری روشهای سعی و خطا و الگوریتم‌های ابتدایی کالیبراسیون خودکار در بسته‌های نرم‌افزاری همچون Modflow، PMWIN و غیره متداول و مرسوم گردید. این بسته‌های نرم‌افزاری قابلیت استخراج پارامترهای کالیبره شده را دارا می‌باشند. با توجه به دقت پایین این نرم‌افزارها در تعیین مقادیر بهینه پارامترها، می‌توان با استفاده از روش سعی و خطای دستی اقدام به استخراج مقادیر کالیبره شده نمود که این امر مستلزم صرف زمان زیاد بوده که در برخی موارد دستیابی به مقادیر بهینه کالیبره وجود ندارد [۳].

بنابراین استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی در مدل‌های بهینه‌سازی به‌منظور کالیبراسیون پارامترهای آبخوان توصیه گردیده است. روشهای برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی به‌عنوان یکی از روشهای بهینه‌سازی عمومی برای تعیین مقادیر بهینه بر اساس مقدار گرادیان تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند که با افزایش تعداد متغیرهای تصمیم و همچنین غیرخطی شدن تابع هدف و محدودیتهای مسئله، کارایی خود را از دست می‌دهند [۴ و ۵].

نمونه‌هایی از کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی غیرخطی به‌منظور کالیبره نمودن ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان را می‌توان در مطالعات هی و همکاران در سال ۲۰۰۷ و بستانی و همکاران در سال ۲۰۱۰ ملاحظه نمود [۶ و ۷].

الگوریتم مبتنی بر جستجو به‌عنوان یکی از ابزارهای مفید برای حل مسائل پیچیده درتعیین مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مورد استفاده قرار می‌گیرند. اگرچه این الگوریتم‌ها به‌طور قطع، یافتن مقدار بهینه کلی را تضمین نمی‌کنند اما مقادیر بهینه ارائه شده توسط این الگوریتم‌ها با احتمال بالایی نزدیک به بهینه محلی می‌باشد.

الگوریتم‌های مبتنی بر جستجوی مختلفی برای حل مسائل کالیبراسیون در مهندسی آب و آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان نمونه ساموئل و جها در سال ۲۰۰۳ با استفاده از الگوریتم ژنتیک[1] به تخمین پارامترهای آبخوان برای استفاده در آزمایش‌های پمپاژ پرداخته‌اند [۸].

اسکوپوس و همکاران در سال ۲۰۰۵ الگوریتم چندهدفه فراکاوشی را برای کالیبره نمودن مدل جریان آب سطحی و زیرزمینی در اراضی کشاورزی واقع در مکزیکو استفاده نموده‌اند [۹]. بکل و نیکلو در سال ۲۰۰۷ مدل نیمه‌گسترده حوضه‌ای را که به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی منابع آب و خاک می‌باشد با استفاده از الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیرپست (NSGA-II)[2] کالیبره نموده‌اند [۱۰]. افشار و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از الگوریتم PSO[3] مدل دوبعدی هیدرودینامیکی کیفیت آب (CE-QUAL-W2) را کالیبره کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده دقت قابل قبول ضرایب کالیبره شده می‌باشد [۱۱].

داخلاویی در سال ۲۰۱۲ با استفاده از روش بهینه‌سازی فراکاوشی ترکیبی اصلاح شده اقدام به کالیبره نمودن مدل بارش-

[1] Genetic Algorithm (GA)
[2] Non-Dominate Sorting Genetic Algorithm-II
[3] Particle Swarm Optimization (PSO)

رواناب نموده‌اند [۱۲]. سان و همکاران در سال ۲۰۱۲ نشان دادند که الگوی تغییرات ذخیره منطقه‌ای آب زیرزمینی که از تغییرات اقلیمی و وضعیت شتاب ثقل متأثر می‌شود می‌تواند به‌عنوان مکانیسمی برای کالیبره نمودن مدل‌های منطقه‌ای آب زیرزمینی به‌کارگرفته شود. نتایج نشان داده‌اند که استفاده از تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده و مکانیسم فوق می‌تواند به نحوه مطلوبی برای کالیبراسیون مدل‌های منطقه‌ای آب زیرزمینی با استفاده از ابزار بهینه‌سازی NSGA-II به‌کار گرفته شود [۱۳].

باکر و همکاران در سال ۲۰۰۸ اقدام به توسعه روشی برای کالیبره نمودن ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان برای سیستم‌های خطی نمودند. این روش بر اساس سری زمانی پارامترهای ورودی به مدل عمل کرده و تابع پاسخ متناسب با هر پارامتر را در هر چاه مشاهده‌ای در قالب معادلاتی برای شرایط پایدار و ناپایدار ارائه می‌نماید. این معادلات که با معادلات دیفرانسیلی آب زیرزمینی در شرایط پایدار و ناپایدار هم‌خوانی دارد در دو مرحله اقدام به کالیبره نمودن ضرایب هیدرودینامیکی می‌نماید. نتایج استفاده از این روش برای نمونه‌های متعدد نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عمدتاً برای شرایط پایدار مناسب است [۱۴].

با توجه به اینکه دقت مدل شبیه‌سازی کالیبره شدن از اهمیت بالایی در مدل‌های مدیریت منابع آب برخوردار است لذا استفاده از ابزاری که بتواند در مقیاس وسیع به تعیین پارامترهای مؤثر در شناخت رفتار آبخوان بپردازد درخور توجه است. به‌همین دلیل در این تحقیق ساختاری بر پایه روابط حاکم بر شبیه‌سازی کمّی آبخوان تدوین گردید. با توجه به اینکه سوابق مطالعاتی قبل نشان‌دهنده عدم در نظر گرفتن پارامترهای برداشت و تغذیه آبخوان است که غالباً نیز از دقت بسیار پایینی برخوردارند، در فرایند کالیبراسیون، این دو پارامتر نیز علاوه بر ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان برای کالیبره نمودن در نظر گرفته شدند. همچنین شبیه‌سازی گسترده[1] آبخوان که در ارتباط با مدل بهینه‌سازی است به‌عنوان یکی دیگر از جنبه‌های قابل توجه مطالعه حاضر می‌باشد که در مطالعه قبلی این امر به‌صورت شبیه‌سازی توده‌ای و یا شبیه‌سازی منطقه‌ای انجام شده است. با تحلیل نتایج حاصل از به‌کارگیری ساختار پیشنهادی می‌توان دریافت که روش ارائه شده در این تحقیق دقت بسیار بالایی در تخمین صحیح پارامترهای آبخوان دارد.

۲- معادلات ریاضی حاکم بر رژیم جریان آب زیرزمینی و روشهای حل آن

معادله اساسی جریان سه بعدی آب زیرزمینی در شرایط جریان غیردائم از ترکیب معادلات حرکت و پیوستگی و در نظر گرفتن اصل بقاء انرژی نتیجه می‌شود. این معادله به روشهای متداول ریاضی قابل حل نبوده و برای حل آنها از روش عددی[2] تفاضل محدود[3] استفاده می‌شود. در این روش، ابتدا سطح آبخوان مورد مطالعه به شبکه‌هایی با ابعاد و تراز سطح آب مشخص تقسیم‌بندی می‌شود. با جانشین کردن مشتقات جزئی توسط تفاضل‌های محدود در معادله جریان، یک دستگاه معادلات خطی شامل N معادله و N مجهول به‌دست می‌آید که با حل آن، مقدار تراز سطح آب در N سلول شبکه حاصل می‌گردد. بر این اساس می‌توان مقادیر تراز سطح آب شبیه‌سازی شده در هر سلول را مطابق رابطه ۲ و با توجه به ضرایب مشخص شده تعیین نمود [۱۵].

(۱)

$$A_{i,j}=\frac{(T_{i+1,j}+T_{i,j})\times BC_{i+1,j}}{2(\Delta x)^2}\quad,\quad B_{i,j}=\frac{(T_{i-1,j}+T_{i,j})\times BC_{i-1,j}}{2(\Delta x)^2}$$

$$,\quad C_{i,j}=\frac{(T_{i,j+1}+T_{i,j})\times BC_{i,j+1}}{2(\Delta y)^2}$$

$$D_{i,j}=\frac{(T_{i,j-1}+T_{i,j})\times BC_{i,j-1}}{2(\Delta y)^2}\quad,\quad E_{i,j}=\frac{W_{i,j}}{\Delta x\times\Delta y}+\frac{Sy_{i,j}}{\Delta t}\times h_{i,j}^{t-1}$$

$$,\quad F_{i,j}=\frac{Sy_{i,j}}{\Delta t}$$

(۲)

$$h_{i,j}^{t}=\frac{A_{i,j}h_{i+1,j}^{t}+B_{i,j}h_{i-1,j}^{t}+C_{i,j}h_{i,j+1}^{t}+D_{i,j}h_{i,j-1}^{t}+E_{i,j}}{A_{i,j}+B_{i,j}+C_{i,j}+D_{i,j}+F_{i,j}}$$

به‌منظور شبیه‌سازی تراز با استفاده از رابطه ۲، از روش غیرصریح مستقیم متناوب[4] (IADI) استفاده می‌شود (شکل ۱). مطابق این روش، ابتدا محدوده مورد مطالعه، بازه زمانی شبیه‌سازی و معیار همگرایی تعریف می‌شود. سپس طول دوره شبیه‌سازی به گام‌های زمانی[5] مشخصی تقسیم می‌شود. با تعیین شرایط اولیه تراز سطح آب زیرزمینی و استفاده از رابطه ۲، تراز در انتهای گام زمانی اول شبیه‌سازی می‌شود. این مقدار شبیه‌سازی شده به‌عنوان شرایط اولیه برای همین بازه زمانی در نظر گرفته می‌شود. این روند برای بازه زمانی اول تا دستیابی به معیار خطای تعریف شده ادامه می‌یابد. با تعیین مقدار تراز سطح آب زیرزمینی در انتهای گام زمانی اول، مراحل تشریح شده برای یافتن تراز در گام‌های زمانی بعد تکرار می‌شود. روند فوق تا زمانی ادامه می‌یابد که کل دوره زمانی مورد نظر برای شبیه‌سازی سفره پوشش داده شود. به‌عبارت دیگر به‌منظور شبیه‌سازی آبخوان، دو حلقه کنترلی برای تعیین تراز سطح آب زیرزمینی وجود دارد که عبارت‌اند از: کنترل میزان خطای ناشی

[1] Distributed

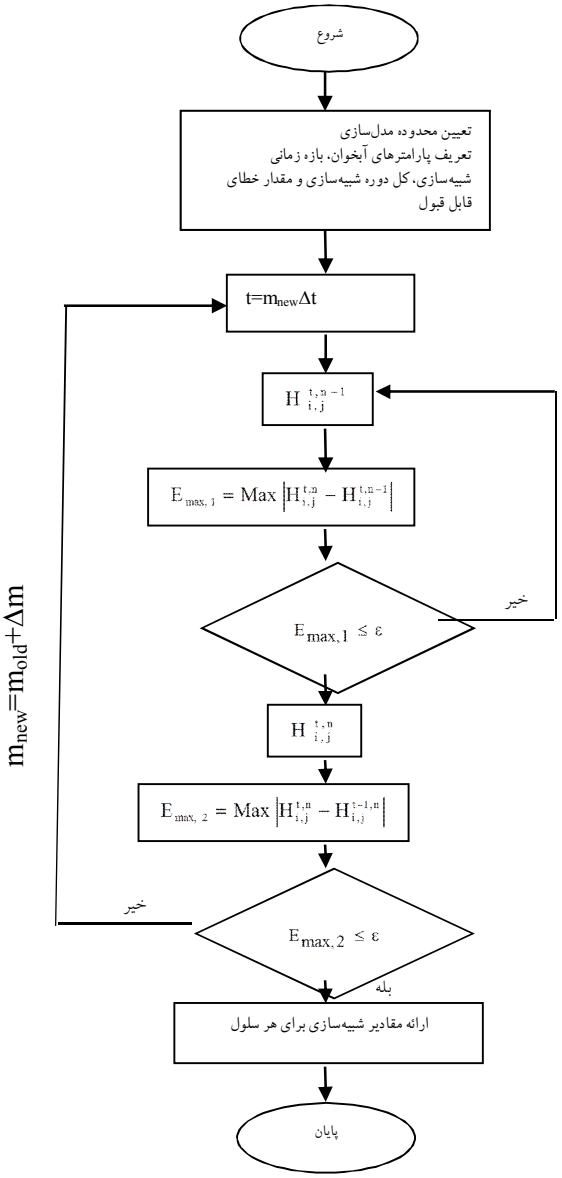
[2] Numerical Methods
[3] Finite Difference
[4] Iterative Alternating Direction Implicit Method
[5] Time Steps

از شبیه‌سازی تراز سطح آب زیرزمینی در هر گام زمانی و تنظیم طول دوره زمانی شبیه‌سازی رفتار سفره.

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، برای کاهش زمان اجرای مدل شبیه‌سازی آبخوان در نتیجه استفاده از نرم‌افزارهای موجود، کد مدل عددی آبخوان در محیط MatlabR2010a تهیه گردید. به‌منظور کنترل صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از کد عددی تدوین شده در این تحقیق اقدام به تهیه مدل شبیه‌سازی آبخوان در محیط نرم‌افزار PMWIN8.0.12 نسخه ۲۰۱۱ شد.

۲-۲- صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی تهیه شده

با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش‌های قبل در خصوص نحوه حل معادلات حاکم بر سیستم جریان آب زیرزمینی، مدل عددی شبیه‌سازی آبخوان در محیط برنامه‌نویسی MatlabR2010a تهیه گردید. با استفاده از این مدل و اطلاعات مرتبط با آبخوان دشت تهران-کرج (به‌عنوان نمونه)، فرایند شبیه‌سازی آبخوان در گام زمانی روزانه و به‌صورت ماهانه انجام شد که نتایج مقایسه این دو مدل به‌عنوان نمونه برای ماههای آبان و اردیبهشت



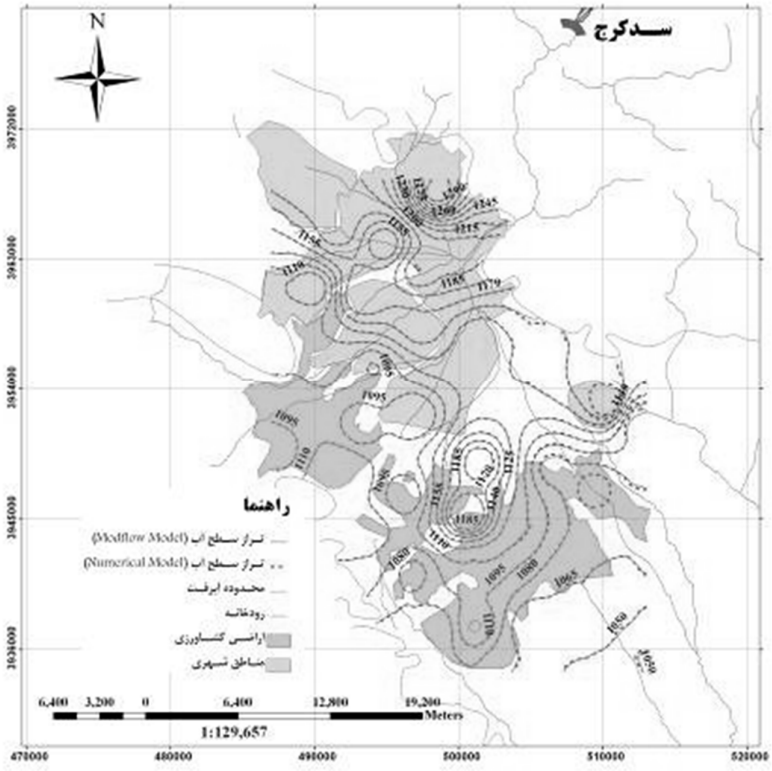
شکل ۱- مراحل شبیه‌سازی عددی آبخوان با استفاده از روش IADI [۱۶]

در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. علت انتخاب این محدوده، پیچیدگی مؤلفه‌های مختلف تأثیرگذار بر آبخوان است که اجرای کد عددی در مواجهه با چنین شرایطی می‌تواند تا حدودی زیادی دقت مدل را در بررسی رفتار آبخوان‌های نامتعادل نشان دهد و اطمینان لازم را برای استفاده از آن در مدل‌های مدیریتی فراهم آورد. با توجه به این شکل‌ها می‌توان دقت بسیار مناسب مدل عددی تهیه شده را در ارائه رفتار جریان آب زیرزمینی مشاهده نمود. بنابراین می‌توان از این مدل در فرایند کالیبراسیون به‌عنوان جایگزین مناسبی از مدل‌های آماده که به‌صورت بسته‌های نرم‌افزاری ارائه شده‌اند، استفاده نمود.

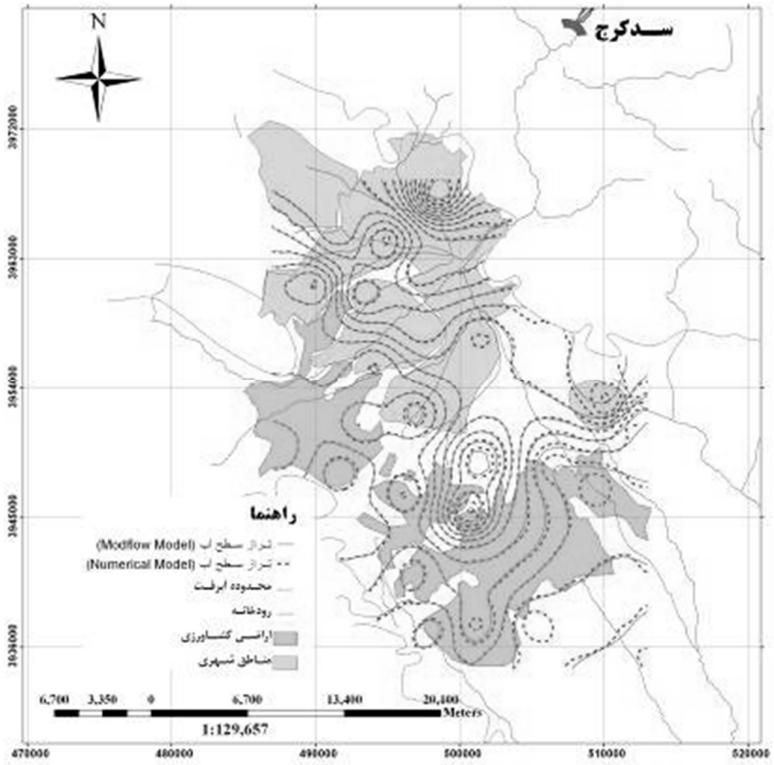
نکته قابل توجه اینکه در این بخش از مطالعات، هدف کالیبره نمودن پارامترها نبوده و صرفاً شبیه‌سازی تراز بر پایه آمار و اطلاعات موجود (که می‌تواند پارامترهای کالیبره نیز باشد) مد نظر بوده است. زیرا در این بخش تنها تعیین مدل جایگزین مدل PMWIN برای استفاده در ساختار پیشنهادی برای صرفه‌جویی در زمان اجرا مورد توجه بوده است. لازم به ذکر است که پارامترهای مدل‌سازی آبخوان در هر دو مورد یکسان و مشتمل بر پارامترهایی همچون ضرایب هیدرودینامیکی، مقادیر برداشت و تغذیه آبخوان، شرایط اولیه و مرزی آبخوان و غیره است.

۳- ساختار مدل کالیبراسیون خودکار

شبیه‌سازی صحیح رفتار آبخوان برای استفاده در مدل‌های مدیریتی یکی از اهداف مهم در برنامه‌ریزی منابع آب به‌شمار می‌رود. برای این منظور لازم است پارامترهای ورودی مدل شبیه‌سازی به‌درستی اندازه‌گیری و جمع‌آوری گردد. از آنجا که به‌طور معمول اندازه‌گیری این پارامتر برای کل محدوده مورد مطالعه امکان‌پذیر نبوده و مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی است لذا ساختاری که بتواند مقادیر صحیحی از پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی را مورد تخمین قرار دهد، لازم و ضروری است. برای این منظور در این تحقیق با توجه به کد عددی تهیه شده، ساختاری پیشنهادی گردید که در آن به‌دلیل فقدان داده و پایین بودن دقت اطلاعات موجود، اقدام به کالیبره نمودن چهار پارامتر ضریب انتقال، ضریب ذخیره، مقادیر برداشت و مقادیر تغذیه آبخوان شد. با توجه به این پارامترها که به‌عنوان مجهولات مسئله (متغیرهای تصمیم) در نظر گرفته شدند، مقدار مجموع اختلافات بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری



شکل ۲- مقایسه تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی ماه آبان ۸۲ توسط دو مدل Modflow و کد عددی



شکل ۳- مقایسه تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی ماه اردیبهشت ۸۳ توسط دو مدل Modflow و کد عددی

شده تراز سطح آب زیرزمینی در هر سلول واقع در محدوده مورد مطالعه به‌عنوان تابع هدف حداقل می‌شود. برای مشخص شدن ساختار پیشنهادی و اجزای حاکم در آن، بیان ریاضی تابع هدف و محدودیت‌های مسئله به‌صورت زیر ارائه می‌گردد

تابع هدف

$$\text{Minimize} \quad Z=\sum_{t=1}^{12}\sum_{i=1}^{row_i}\sum_{j=1}^{col_i}\left(\text{hreal}_{i,j}^{t}-\text{hsim}_{i,j}^{t}\right)^2 \quad (۳)$$

$$nr_i=\max\left(\frac{y_0-y_i}{\Delta x},0\right) \quad (۴)$$

$$\text{nc}_i=\max\left(\frac{x_0-x_i}{\Delta y},0\right) \quad (۵)$$

(۶)

$$row_i=nr_i \ , \quad col_i=nc_i \ , \quad if\ nr_i\le nrow \ \ and \ \ nc_i\le ncol$$

$$A_{i,j}=\frac{\left(T_{i+1,j}+T_{i,j}\right)\times BC_{i+1,j}}{2(\Delta x)^2} \quad (۷)$$

$$B_{i,j}=\frac{\left(T_{i-1,j}+T_{i,j}\right)\times BC_{i-1,j}}{2(\Delta x)^2} \quad (۸)$$

$$C_{i,j}=\frac{\left(T_{i,j+1}+T_{i,j}\right)\times BC_{i,j+1}}{2(\Delta y)^2} \quad (۹)$$

$$D_{i,j}=\frac{\left(T_{i,j-1}+T_{i,j}\right)\times BC_{i,j-1}}{2(\Delta y)^2} \quad (۱۰)$$

$$E_{i,j}=\frac{W_{i,j}}{\Delta x\times\Delta y}+q_{i,j}+\frac{Sy_{i,j}}{\Delta t}\times \text{hsim}_{i,j}^{t-1} \quad (۱۱)$$

$$F_{i,j}=\frac{Sy_{i,j}}{\Delta t} \quad (۱۲)$$

(۱۳)

$$\text{hsim}_{i,j}^{t}=\frac{A_{i,j}\times\text{hsim}_{i+1,j}^{t}+B_{i,j}\times\text{hsim}_{i-1,j}^{t}+C_{i,j}\times\text{hsim}_{i,j+1}^{t}+D_{i,j}\times\text{hsim}_{i,j-1}^{t}+E_{i,j}}{A_{i,j}+B_{i,j}+C_{i,j}+D_{i,j}+F_{i,j}}$$

محدودیت‌ها

$$0\le T_{i,j}\le 2000 \ \ m^2/day \quad (۱۴)$$

$$0.5\le Sy_{i,j}\le 6 \quad (۱۵)$$

$$100 \ \ m^3/day\le W_{i,j}\le 1000 \ \ m^3/day \quad (۱۶)$$

$$0\le q_{i,j}\le 10^{-3} \ \ m/day \quad (۱۷)$$

$$x_0=694866.9 \quad , \quad y_0=3740657 \quad (۱۸)$$

$$\Delta x=\Delta y=1000 \ m \quad (۱۹)$$

$$nrow=17 \ , \ ncol=18 \quad (۲۰)$$

در روابط بالا متغیرها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$\text{hreal}_{i,j}^{t}$: تراز سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شده توسط پیزومتر واقع در سلول ردیف iام و ستون jام در ماه t

$hsim^{t}_{i,j}$: تراز سطح آب زیرزمینی محاسبه شده در سلول واقع در ردیف iام و ستون jام در ماه t توسط مدل تدوین شده

row_i: شماره ردیف پیزومتر iام

col_i: شماره ستون پیزومتر iام

x_0: مختصات طولی ابتدای محدوده مدل‌سازی

y_0: مختصات عرضی ابتدای محدوده مدل‌سازی

y_i: مختصات عرضی پیزومتر iام

Δx: ابعاد شبکه مدل‌سازی در راستای طولی

Δy: ابعاد شبکه مدل‌سازی در راستای عرضی

x_i: مختصات طولی پیزومتر iام

nr_i: شماره ردیف پیزومتر iام

nc_i: شماره ستون پیزومتر iام

nrow: تعداد کل ردیف‌های محدوده مدل‌سازی آبخوان

ncol: تعداد کل ستون‌های محدوده مدل‌سازی آبخوان

$A_{i,j}, B_{i,j}, C_{i,j}, D_{i,j}, F_{i,j}$: ضرایب مرتبط با تراز سطح آب زیرزمینی محاسباتی که از خلاصه نمودن معادله اختلاف محدوده آب زیرزمینی به‌دست می‌آید.

$T_{i,j}$: ضریب انتقال سلول واقع در ردیف iام و ستون jام

$BC_{i,j}$: مشخص‌کننده نوع شرایط مرزی سلول واقع در ردیف iام و ستون jام آبخوان می‌باشد که مقادیر صفر و یک به‌ترتیب نشان‌دهنده مرز نفوذناپذیر و مرز دارای جریان زیرزمینی می‌باشد.

$Sy_{i,j}$: ضریب ذخیره سلول واقع در ردیف iام و ستون jام

Δt: گام زمانی شبیه‌سازی آبخوان (لازم به ذکر است دوره زمانی شبیه‌سازی از تعداد مشخصی گام زمانی تشکیل شده است)

$W_{i,j}$: مقدار برداشت از سلول واقع در ردیف iام و ستون jام (متر مکعب در روز)

$q_{i,j}$: مقدار تغذیه سلول واقع در ردیف iام و ستون jام (متر در روز)

با توجه به ساختار تشریح شده، متغیرهای تصمیم‌های در نظر گرفته شده عبارت‌اند از: مقادیر ضریب انتقال و ذخیره برای هر سلول فعال واقع در محدوده مدل‌سازی، مقادیر برداشت و تغذیه به هر سلول فعال واقع در محدوده مدل‌سازی.

از آنجا که در محدوده مورد مدل‌سازی، تعداد سلول‌های فعال برابر با ۱۳۷ بود لذا تعداد متغیرهای تصمیم با توجه به اینکه ضرایب ذخیره و انتقال در طی مدت شبیه‌سازی ثابت می‌باشند و مقادیر برداشت و تغذیه برای هر ماه متفاوت در نظر گرفته شده است برابر با ۳۵۶۲ بود. از این تعداد، ۱۳۷ تا مرتبط با ضریب ذخیره، ۱۳۷ تا مرتبط با ضریب انتقال و ۱۳۷ برای تخلیه و ۱۳۷ برای تغذیه سلول‌ها در هر ماه که با احتساب ۱۲ ماه برابر با ۳۲۸۸ خواهد شد. لذا تعداد کل متغیرهای تصمیم برابر است با ۳۵۶۲=۳۲۸۸+۱۳۷+۱۳۷.

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای تصمیم و پیچیده بودن مسئله، لازم است از روشهای تکاملی برای حل ساختار پیشنهادی استفاده شود. در این بخش ساختار روش تکاملی بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم ارائه می‌گردد.

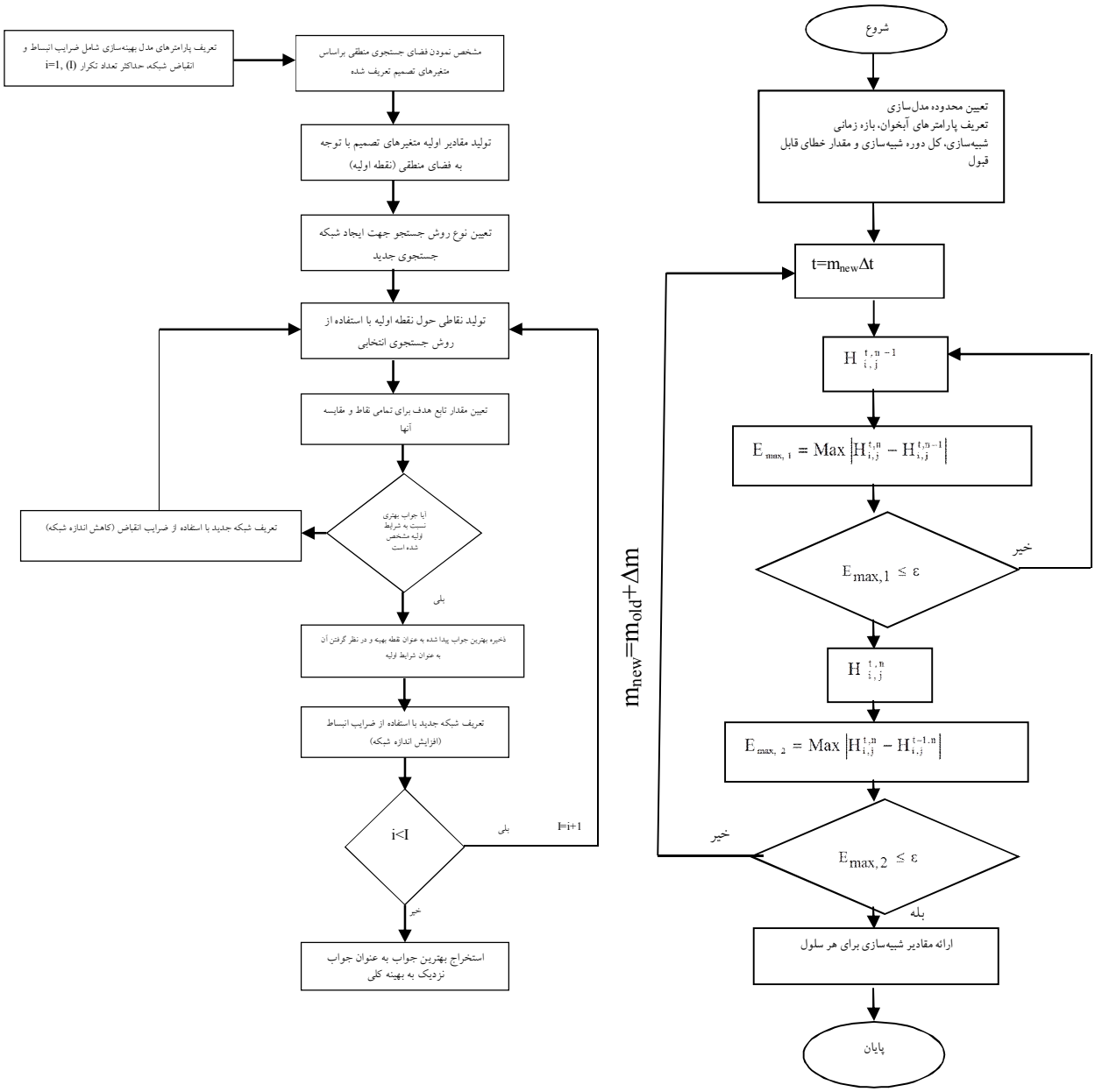
۳-۱- الگوریتم بهینه‌سازی مبتنی بر جستجوی مستقیم

در این الگوریتم تعیین مقدار بهینه به‌صورت جستجوی موضعی بوده و به‌دلیل سرعت اجرای بالا، دقت قابل توجه در دستیابی به جواب نزدیک به بهینه کلی و جستجوی تقریباًکامل فضای تصمیم موجه[1] در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته است. این روش با شروع از یک نقطه تصادفی در فضای موجه تصمیم آغاز شده و با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض به سمت جواب بهینه کلی حرکت می‌نماید. در این روش ابتدا فضای موجه، ضرایب انبساط و انقباض و تعداد تکرارهای لازم برای دستیابی به جواب نزدیک به بهینه کلی مشخص می‌شود. سپس با توجه به محدودیتهای مدل مدیریتی، جواب اولیه‌ایی به‌صورت تصادفی تولید می‌شود. با توجه به نقطه اولیه و نوع روش جستجو، نقاطی حول جواب اولیه تولید می‌شود. از روشهای جستجو در این الگوریتم می‌توان به روش جستجوی الگوی تعمیم یافته[2] و روش جستجوی مستقیم شبکه هیبریدی[3] اشاره نمود. با توجه به جوابهای تولیدی، مقدار تابع هدف برای هر یک محاسبه شده و با مقدار تابع هدف مرتبط با جواب اولیه مقایسه می‌شود. چنانچه جوابی بهتر از جواب اولیه در بین مجموعه جوابهای تولید شده وجود داشت مسیر حرکت مدل بهینه‌سازی از نقطه اولیه به نقطه‌ایی خواهد بود که از مطلوبیت بیشتری از نظر تابع هدف برخوردار می‌باشد. در این حالت اندازه شبکه با استفاده از ضریب انبساط افزایش می‌یابد و مدل فضای بیشتری را مورد جستجو قرار می‌دهد. اما اگر جواب بهتری در فضای اولیه مشخص شده، یافت نشد با استفاده از ضریب انقباض و نوع روش جستجو، تعداد نقاط دیگری که نزدیک‌تر به نقطه اولیه می‌باشند تولید می‌شود. این روند تولید مجموعه جواب‌ها با استفاده از ضرایب انبساط و انقباض تا زمانی ادامه می‌یابد که تغییری در جواب بهینه به‌دست آمده حاصل نشود [۱۷].

با توجه به مدل الگوریتم بهینه‌سازی مذکور، ساختاری که برای کالیبراسیون پارامترهای آبخوان در نظر گرفته شد مطابق شکل ۴ می‌باشد. بر این اساس برای تعیین مقادیر بهینه چهار پارامتر برداشت، تغذیه، ضرایب ذخیره و انتقال ابتدا با توجه به متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده برای یک دوره یک ساله و محدودیت‌های مسئله، که

[1] Feasible Decision Space
[2] Generalized Pattern Search (GPS)
[3] Mesh Adaptive Direct Search (MADS)

همان مقدار مجاز تغییرات هر یک از پارامترهای فوق می‌باشند، مقادیر تصادفی برای هر یک از متغیرهای تصمیم تولید می‌شود. این مقادیر برای محاسبه مقدار تابع هدف بر اساس ساختار مدل شبیه‌سازی آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرند. این عمل با توجه به تعداد ذراتی که برای یافتن مقادیر بهینه کلی در ابزار پیشنهادی مطرح می‌باشد، تکرار می‌شوند. با توجه به نحوه عملکرد ابزار بهینه‌یاب، مقدار تابع هدف هر یک از ذرات محاسبه و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. چنانچه در تکرارهای متوالی تغییری در بهترین جواب حاصله که همان مقدار حداقل تابع هدف می‌باشد، حاصل نشد، الگوریتم بهینه‌سازی متوقف شده و ذره‌ای که کمترین میزان تابع هدف را تولید می‌نماید، به‌عنوان جواب بهینه کلی در نظر گرفته می‌شود. بر اساس این جواب می‌توان مقادیر کالیبره شده پارامترهای آبخوان را استخراج نمود و برای شبیه‌سازی شرایط واقعی آینده مورد استفاده قرار داد.



شکل ۴- ساختار مدل کالیبراسیون خودکار پیشنهادی

۴- مطالعه موردی

مطالعه موردی این مقاله آبخوان دشت قائن با وسعت ۳۰۶ کیلومتر مربع بود که در حوزه آبریز دق پترگان خواف در شرق کشور واقع شده است. متوسط بارندگی در این محدوده با استفاده از منحنی‌های هم‌باران ۱۸۶/۱ میلی‌متر در سال می‌باشد. این حوضه فاقد رودخانه دائمی بوده که رواناب حاصله با تعدادی مسیل از ارتفاعات شمالی، غربی و جنوبی به سمت شرق محدوده در جریان است که از طریق رودخانه کال خونیک به محدوده اسفدن تخلیه می‌گردد و در خروجی نیز نقش زهکش را دارد. آبخوان محدوده قائن از نوع آبخوان آزاد بوده و از ارتفاعات شمال غرب، جنوب غرب تغذیه شده و از شرق به محدوده اسفدن منتهی می‌گردد.

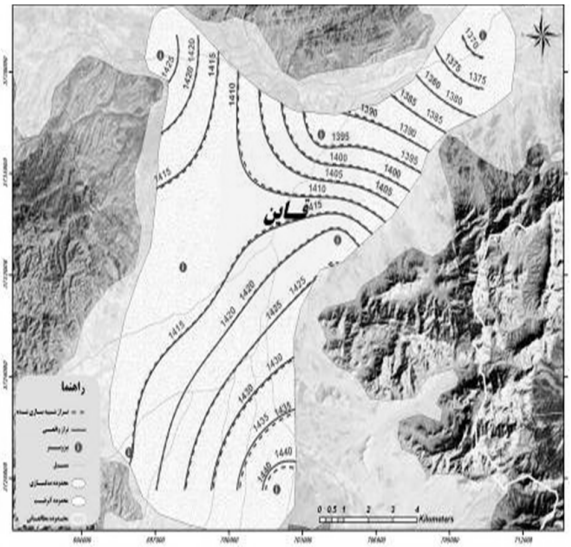
با توجه به سوابق حفاری‌های بهره‌برداری، مشخص می‌شود که قسمت غربی و جنوب غربی سفره دارای ضخامت بیشتر و نسبتاً با پتانسیل آبدهی غنی‌تر می‌باشد و به‌سمت شمال شرقی از ضخامت آن کاسته شده و جنس آن نیز ریزتر و از نظر کیفیت نیز نامناسب‌تر می‌شود. بررسی نقشه ایزوپیز نشان می‌دهد جهت کلی جریان آب زیرزمینی در دشت از شمال غرب و جنوب غرب به سمت مرکز آبخوان است و نهایتاً به شمال شرق در ناحیه خروجی دشت قاین ختم می‌شود. در مرکز آبخوان به‌دلیل تجمع چاههای بهره‌برداری و پمپاژ شدید، سطح ایستابی دچار افت شدید بوده و منحنی‌ها به‌صورت بسته در آمده‌اند، بنابراین به‌طور قطع در این قسمت گرادیان هیدرولیکی صفر و حداکثر آن در شمال غرب آبخوان ۱/۱ درصد و حداقل آن در جنوب غرب آبخوان ۰/۴ درصد است در سمت خروجی دشت (شمال شرق) نیز گرادیان به ۰/۶ درصد می‌رسد. هیدروگراف واحد آبخوان قائن در دوره آماری ۸۹-۶۵ نشان می‌دهد که سالانه به‌طور میانگین سطح ایستابی در این آبخوان حدود ۰/۳۴ متر افت داشته است. ضریب قابلیت انتقال با استفاده از نتایج آزمایش پمپاژ یک حلقه چاه اکتشافی در بخش جنوبی آبخوان برآورد شده که میزان آن برابر با ۷۶۲ متر مربع بر روز می‌باشد. همچنین متوسط ضریب ذخیره منظور شده در آبخوان، ۴/۵ درصد است. مطابق آمار شرکت مدیریت منابع آب ایران، میزان کل تخلیه منابع زیرزمینی محدوده مطالعاتی قائن در سال آبی ۸۹-۸۸ برابر با ۳۵/۷۸ میلیون مترمکعب بوده است. از این میزان، ۶۰ درصد را بخش کشاورزی، ۳۰ درصد را بخش شرب و ۱۰ درصد را بخش صنعت به خود اختصاص داده است.

۵- نتایج و بحث

بر اساس ساختار پیشنهادی و اجرای آن با استفاده از الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم، مقادیر بهینه پارامترهای مرتبط با ضریب ذخیره، ضریب انتقال، مقادیر برداشت و تغذیه از هر سلول برای یک دوره زمانی یکساله استخراج گردید. برای بررسی میزان دقت نتایج حاصل از ساختار پیشنهادی، مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از پارامترهای بهینه با مقادیر مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. برای این منظور هیدروگراف پیزومترها و منحنی هم‌تراز حاصل از ترسیم منطقه‌ای داده‌های پیزومتری مورد توجه قرار گرفت.

۵-۱- تطابق تراز سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای

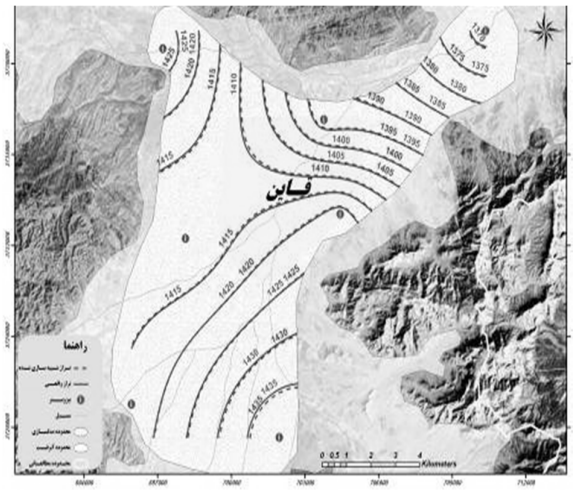
مهم‌ترین نشانه دقت و صحت مدل، میزان تطابق نوسان سطح آب زیرزمینی و روند تغییرات آن در مدل با نقاط مشابه در چاه‌های مشاهده‌ای است. به‌عبارت دیگر مدلی قابل قبول است که هم نتایج در نقاط اندازه‌گیری شده و هم به‌خصوص روند تغییرات سطح آب زیرزمینی با مقادیر و روند تغییرات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای اختلاف قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. با توجه به مقادیر شبیه‌سازی شده بر اساس پارامترهای بهینه آبخوان می‌توان توزیع مکانی تراز سطح آب زیرزمینی را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی در قالب منحنی‌های هم‌تراز ترسیم نمود. به‌عنوان نمونه منحنی‌های هم‌تراز در ماههای دی ۸۸ و خرداد ۸۹ در شکلهای ۵ و ۶ ترسیم شده است. مطابق این شکل‌ها می‌توان دریافت که توزیع مکانی مقادیر شبیه‌سازی شده نیز از دقت بالایی برخوردار است. همچنین شکلها، قابلیت ساختار پیشنهادی را در تخمین صحیح پارامترهای مؤثر در تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهند.



شکل ۵- تراز آب زیرزمینی واقعی و شبیه‌سازی شده در دی‌ماه سال ۸۸

جدول ۱- شاخص واریانس خطای ماهانه مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
شاخص MSE	۰/۶۰۶	۰/۶۰۹	۰/۶۳۶	۰/۶۱۸	۰/۶۰۵	۰/۶۴۱	۱/۰۵	۱/۷۷	۰/۹۶۷	۰/۹۷۳	۰/۹۹۴	۰/۹۷۶

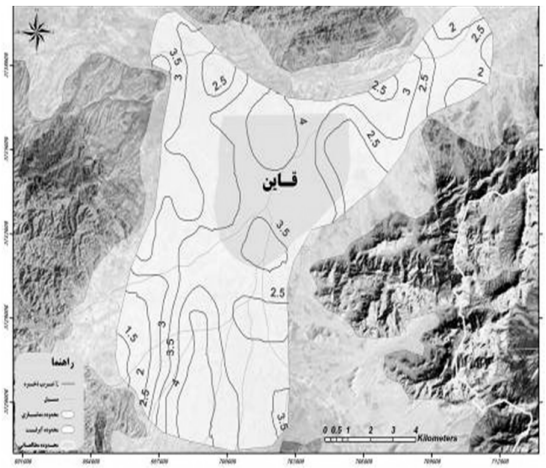


شکل ۶- تراز آب زیرزمینی واقعی و شبیه‌سازی شده در خردادماه ۸۹

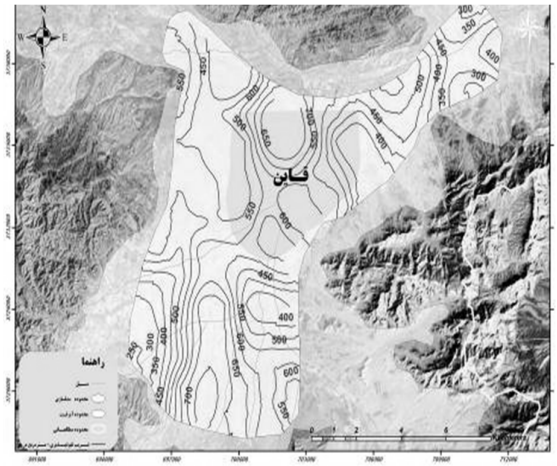
با توجه به مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده می‌توان به‌صورت ماهانه خطای مدل‌سازی را با استفاده از شاخص واریانس خطا به‌دست آورد (جدول ۱). همانطور که در این جدول نشان داده شده است مدل تهیه شده به‌خوبی قابلیت شبیه‌سازی آبخوان را دارا بوده و برای پیش‌بینی شرایط آتی آبخوان با توجه به مقادیر برداشت‌ها و تغذیه دشت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۲- بررسی پارامترهای کالیبره شده

همانطور که قبلاً ارائه شد پارامترهای ضریب ذخیره، ضریب انتقال، مقادیر برداشت و تغذیه به هر سلول از جمله پارامترهای مهمی می‌باشند که آمار جمع‌آوری شده آن‌ها معمولاً از دقت پایینی برخوردار بوده و لازم است به‌درستی مورد اندازه‌گیری قرار گرفته و یا با استفاده از روشهای ریاضی اقدام به تخمین آن‌ها نمود. نتایج بررسی‌های صورت گرفته بر پایه آمار چاههای مشاهده‌ای بیانگر دقت بالای مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی تخمین زده شده در شبیه‌سازی مقادیر واقعی تراز است. این امر در نتیجه ورود پارامترهای کالیبره بهینه در مدل شبیه‌سازی عددی تهیه شده می‌باشد. برای این منظور توزیع مکانی ضرایب ذخیره و انتقال کالیبره شده به‌صورت شکلهای ۷ و ۸ ارائه می‌شود. همچنین مقادیر بهینه برداشت و تغذیه با استفاده از ساختار پیشنهادی به‌ترتیب برابر با ۵۶/۱ و ۴/۵ میلیون متر مکعب است. مقایسه این مقادیر با مقادیر اندازه‌گیری شده (مقادیر برداشت و تغذیه اندازه‌گیری شده به‌ترتیب برابر با ۳۵/۷۸ و ۲/۳۷ میلیون متر مکعب است) نشان می‌دهد که به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه در سطح دشت و همچنین عدم تخمین صحیح از مقادیر برداشت و تغذیه طبیعی و مصنوعی آبخوان، نمی‌توان به نتایج مدل‌های شبیه‌سازی برای پیش‌بینی شرایط آینده اعتماد نمود. همچنین برای تهیه مدل‌های کالیبره شده آبخوان لازم است علاوه بر پارامترهای ضریب ذخیره و انتقال (به‌عنوان ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان) به‌صورت توأمان پارامترهای تخلیه و تغذیه نیز مورد کالیبراسیون قرار گیرد تا دقت مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی شرایط آینده به مقدار قابل قبولی افزایش یابد.



شکل ۷ - نقشه ضریب ذخیره محدوده مدل‌سازی
(به‌دست آمده از ساختار پیشنهادی)



شکل ۸- نقشه ضریب قابلیت انتقال محدوده مدل سازی
(به‌دست آمده از ساختار پیشنهادی)

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت شناسایی تراز سطح آب زیرزمینی به‌عنوان شاخصی از وضعیت پایداری آبخوان‌های آبرفتی، بررسی رفتار زمانی و مکانی آن در مدل‌های مدیریت منابع آب می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیمات درست مدیریتی برای بهره‌برداری از این منبع زیرزمینی گردد. از آنجاکه برای شبیه‌سازی شرایط کمّی آبخوان، در اختیار داشتن اطلاعات صحیح و با دقت از پارامترهای مؤثر بر تغییرات تراز سطح آب زیرزمینی نیاز است و امکان دستیابی به چنین اطلاعاتی هزینه‌بر و از طرفی مستلزم صرف زمان طولانی است لذا توسعه مدلی که بتواند در کوتاه‌ترین زمان، مقادیر صحیحی از این پارامترها را در اختیار مدل‌سازی قرار دهد امری ضروری و درخور توجه است. برای این منظور در این تحقیق مدلی پیشنهاد گردید که در آن پارامترهای ضریب ذخیره، ضریب انتقال، مقادیر برداشت و تغذیه آبخوان، به‌عنوان چهار پارامتر اساسی در شبیه‌سازی کمّی و کیفی آبهای زیرزمینی، با استفاده از ابزار بهینه‌سازی الگوریتم مبتنی بر جستجوی مستقیم و در محدوده مجاز تعریف شده، برای آن‌ها تعیین می‌شوند. برای اعمال ساختار پیشنهادی، ابتدا کد عددی مدل شبیه‌سازی آبخوان، به‌منظور تسریع در شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف پارامترهای آبخوان، تهیه گردید. پس از صحت‌سنجی کد تهیه شده، از آن به‌عنوان شبیه‌ساز در ساختار بهینه‌سازی پیشنهادی استفاده گردید. با توجه به اینکه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان معمولاً با ضخامت اشباع تغییر می‌نمایند و این تغییرات در طول یک سال آبی بسیار اندک است، مقدار این ضرایب در تمامی سلول‌های محدوده مورد مطالعه ثابت در نظر گرفته شده و پارامترهای تغذیه و تخلیه به‌عنوان پارامترهایی که دارای تغییرات ماهانه در هر سلول می‌باشند، مدنظر قرار گرفت. بر این اساس متغیرهای مجهول مسئله که به‌عنوان متغیرهای تصمیم در چنین مدل‌هایی در نظر گرفته می‌شوند برابر با ۳۵۶۲ بود که برای تعیین مقدار بهینه آنها از قابلیتهای روش فراکاوشی مبتنی بر جستجوی مستقیم استفاده گردید.

در واقع این مدل قادر است پارامترهای مذکور را به گونه‌ای ارائه نماید که کمترین میزان خطای بین مقادیر تراز شبیه‌سازی و مشاهداتی حاصل شود. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان‌دهنده کارایی بالای ساختار ارائه در تخمین پارامترهای آبخوان است. به‌طور خلاصه قابلیتهای ساختار پیشنهادی بر اساس نتایج به‌دست آمده از این بررسی را می‌توان در قالب موارد زیر بیان نمود:

۱- کاهش هزینه ناشی از آزمایش‌های پمپاژ و ژئوفیزیک برای تعیین ضخامت آبخوان و ضریب ذخیره؛

۲- کاهش مدت زمان دستیابی به پارامترهای کالیبره در مدل‌های شبیه‌سازی آبخوان؛

۳- عدم نیاز به کالیبراسیون به‌صورت سعی و خطا در مدل‌های شبیه‌سازی آبخوان؛

۴- برآورد پارامترهای آبخوان در نقاط فاقد اندازه‌گیری؛

۵- قابلیت به‌کارگیری روش پیشنهادی در مدل‌های شبیه‌سازی کیفی برای تعیین پارامترهایی همچون ضرایب پراکندگی طولی و عرضی و ضرایب پخش.

نکته قابل توجه در استفاده از ساختار ارائه شده این است که با توجه به الگوریتم فراکاوشی مورد استفاده، جواب بهینه حاصله نزدیک به بهینه کلی بوده و در واقع این جواب نوعی جواب بهینه موضعی است که باید با اجرای مدل توسط سایر الگوریتم‌های فراکاوشی و یا با اجرای چندباره مدل پیشنهادی، جواب بهینه مطلق را یافت. همچنین زمان اجرای ساختار پیشنهادی به‌دلیل زیاد بودن تعداد متغیرهای تصمیم نسبتاً بالاست اما در مقایسه با استفاده از مدل PMWIN در مدل بهینه‌سازی این زمان کوتاه می‌باشد. اعمال عدم دقت پارامترهای کالیبره شده از جمله مواردی است که می‌تواند در افزایش دقت کالیبراسیون پارامترهای آبخوان مؤثر باشد و این مهم لازم است در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد.

۷- مراجع

1. Carrera, J., Medina, A., Heredia, J., Vives, L., Ward, J., and Walters, G. (1989). "Parameter estimation in groundwater modelling: From theory to application." *Hydrogeo Chem, Inc*., Tucson, Arizona, USA.
2. Thiery, D. (1994). "Calibration of groundwater models by optimization of parameters in homogeneous geological zones." *Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering Water Science and Technology Library*, 10(4), 69-82.
3. Fallah-Mehdipour, E., Bozorg Haddad, O., and Mariño, M.A. (2013). "Developing reservoir operational decision rule by genetic programming." *J. of Hydroinformatics*, 15(1), 103-119.
4. Bozorg Haddad, O., Afshar, A., and Mariño, M.A. (2008a). "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm in deriving optimal operation rules for reservoirs." *J. of Hydroinformatics*, 10(3), 257-264.

5. Bozorg Haddad, O., Afshar, A., and Mariño, M.A. (2008b). "Design-operation of multi-hydropower reservoirs: HBMO approach." *Water Resources Management*, 22(12), 1709-1722.
6. He, H., Takase, K., and Wang, Y. (2007). "Regional groundwater prediction model using automatic parameter calibration SCE method for a coastal plain of Seto Inland Sea." *Water Resources Management*, 21(6), 947-959.
7. Bastani, M., Kholghi, M., and Rakhshandehroo, G.R. (2010). "Inverse modeling of variable-density groundwater flow in a semi-arid area in Iran using a genetic algorithm." *Hydrogeology Journal*, 18(5), 1191-1203.
8. Samuel, M.P., and Jha, M.K. (2003). "Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, 5(1), 348-359.
9. 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.
10. Bekele, E.G., and Nicklow, J.W. (2007). "Multi-objective automatic calibration of SWAT using NSGA-II." *J. of Hydrology*, 341(3-4), 165-176.
11. Afshar, A., Kazemi, H., and Saadatpour, M. (2011). "Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh reservoir, Iran." *Water Resources Management*, 25(10), 2613-2632.
12. Dakhlaoui, H., Bargaoui, Z., and Bardossy, A. (2012). "Toward a more efficient calibration schema for HBV rainfall–runoff model." *J. of Hydrology*, 445-446(11), 161-179.
13. Sun, A.Y., Green, R., Swenson, S., and Rodell, M. (2012). "Toward calibration of regional groundwater models using GRACE data." *J. of Hydrology*, 422-423(23), 1-9.
14. Bakker, M., Maas, K., and Von Asmuth, J. R. (2008). "Calibration of transient groundwater models using time series analysis and moment matching." *Water Resources Research*, 44(4), doi:10.1029/2007WR006239.
15. Todd, D.K., and Mays, L.W. (2005). *Groundwater hydrology*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y, USA.
16. Karahan, H., and Ayvaz, M.T. (2005). "Transient groundwater modeling using spreadsheets." *Advances in Engineering Software*, 36(6), 374-384.
17. Mohammad Rezapour Tabari, M. (2009). "Uncertainty based conjunctive use modeling in regional scale." Ph.D. Dissertation, Civil and Environmental Engineering Department, AmirKabir University of Technology, Tehran. (In Persian)