نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره2، جلد9، خرداد - تیر 1394، ص. 356-345

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 9, May.-Jun. 2015, p. 345-356

کاربرد الگوریتم فاخته در واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از مدل ریاضی

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

تاریخ دریافت: 1393/12/25 تاریخ پذیرش: 1394/3/20

چکیده

شبیه‌سازی رفتار آبخوان به‌منظور تعیین میزان بهر برداری و برنامه‌ریزی برای استفاده پایدار از این منابع بسیار مهم است. در این خصوص مدل‌های آب‌های زیرزمینی با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی اقدام به پیش‌بینی کمی و کیفی رفتار آبخوان می‌نمایند. از آنجا که شناخت صحیح این پارامترها می‌تواند منجر به افزایش دقت شبیه‌سازی آبخوان گردد، لذا تخمین مقادیر مناسب پارامترهای مدل از اهمیت بالایی برای برنامه‌ریزی در شرایط واقعی برخوردار است. در این تحقیق مدلی بر پایه روش‌های پیشرفته بهینه‌یابی به‌منظور واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان (k و Sy) در دشت بیرجند تدوین گردید. مدل پیشنهادی تلفیقی از مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی (الگوریتم بهینه‌سازی فاخته) در محیط برنامه-نویسی MATLAB می‌باشد. دوره واسنجی برای یک دوره یک ساله (سال آبی 90-1389) با 13 دوره تنش ماهیانه در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی مقادیر پارامترهای بهینه (دوره واسنجی)، دوره صحت سنجی نیز برای یک دوره یک ساله (سال آبی 91-1390) با 13 دوره تنش ماهیانه در نظر گرفته شد. ارزیابی دقت واسنجی و صحت سنجی مدل پیشنهادی با استفاده از معیارهای ارزیابی میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) انجام گرفت. مقادیر معیارهای فوق در دوره واسنجی به ترتیب برابر 0/48، 0/73 و 0/17 و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر 0/63، 0/89 و 0/32 حاصل گردید. با تحلیل نتایج حاصل از بکارگیری ساختار پیشنهادی می‌توان دریافت که رویکرد ارائه شده دقت بسیار بالایی در تخمین صحیح پارامترهای آبخوان دارد.

واژه‌های کلیدی : آبدهی ویژه، الگوریتم فاخته، هدایت هیدرولیکی، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی

مقدمه

به دلیل فراوانی خشکسالی‌ها و توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارندگی به همراه فقدان تکنولوژی‌های مدیریتی مناسب در عرصه منابع آب سطحی، فعالیت‌های توسعه‌ای صنعتی و کشاورزی جوامع تا حد بسیار زیادی به بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی وابسته است. هدف از مدیریت آب‌های زیرزمینی در یک محل، در واقع استفاده پایدار 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 این‌رو در سال‌های اخیر مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی به عنوان روشی ارزان و سریع در تعیین چگونگی حرکت، بیلان و مدیریت بهره‌برداری از آبخوان، پیشرفت قابل توجهی داشته است (Kersic, 1997). در حقیقت مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل می‌باشند که چگونگی جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌کنند (Prickett, 1975). دوپیت، تیم، بوسینسکیو و فرشهایمر اولین افرادی بودند که از مدل-های ریاضی برای شبیه‌سازی جریان آب‌زیرزمینی استفاده کردند (Zheng and Bennett, 2002). از جمله مدل‌هایی که دارای قابلیت‌های بسیار خوبی در مطالعات آب زیرزمینی می‌باشد و هم‌اکنون در بسیاری از کشورهای جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، رابط GMS[5] 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[6] کارتوگرافیکی کاربر دوست[7] (برنامه GMS) و تعدادی کدهای تحلیلی مستقل نظیر

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

5- Groundwater Modeling System
6- Interface
7- User friend

MODFLOW، MT3DMS، MODPATH و غیره می‌باشد. محتشم و همکاران (2011) به منظور پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی در دشت بیرجند از نرم افزار GMS استفاده کردند (Mohtasham et al, 2011). از معایب این نرم افزار و دیگر نرم-افزارهای مشابه عدم امکان دسترسی به کد برنامه است که ضرورت آن در بسیاری از مسائل مدل‌سازی مانند مدیریت آبخوان و بهینه-سازی کمی و کیفی بهره‌برداری از آن، اجتناب ناپذیر است. مدل‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از کد منبع باز، سبب انعطاف‌پذیری شبیه-سازی توسط این‌گونه مدل‌ها نسبت به سایر روش‌های شبیه‌سازی که تاکنون در زمینه آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است، می-گردد.

به‌منظور شبیه‌سازی و 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 اندازه گیری شده نمی‌توان به شناخت صحیحی از رفتار آبخوان دست یافت. برای این منظور واسنجی نمودن این پارامترها می‌تواند خطاهای شبیه‌سازی را حداقل نماید. فرآیند واسنجی در واقع حداقل نمودن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از یکی از روش‌های محاسباتی است (Tabari and Eil Beigi, 2014).

تحقیقات اولیه مطالعات مرتبط با تخمین پارامترهای آبخوان به منظور مدل‌سازی آن توسط کاررا و همکاران (1989) صورت گرفت که در آن مبانی تخمین پارامترهای آبخوان به صورت تئوری و کاربردی ارائه شده است (Carrera et al, 1989). در این مطالعه تمرکز اصلی بر روی مدل‌های معکوس برای دستیابی به مقادیر بهینه واسنجی بوده است. بررسی‌های تیری (1994) نشان داد که مدل‌سازی معکوس به دلیل ناپایداری زیاد در دستیابی به مقادیر واسنجی شده از دقت بالایی برخوردار نبوده و منجر به ارائه مقادیر غیر واقعی از پارامترهای مورد واسنجی می‌گردند (Thiery, 1994). این محقق برای واسنجی نمودن پارامترهای آبخوان، روش منطقه‌بندی محدوده مدل‌سازی و استفاده از الگوریتم‌های کلاسیک ریاضی را پیشنهاد نمود. با توسعه روش‌های تشریح شده، به‌کارگیری روش‌های سعی و خطا و الگوریتم‌های ابتدایی واسنجی خودکار در بسته‌های نرم‌افزاری همچون PMWIN، Modflow و غیره متداول و مرسوم گردید. این بسته‌های نرم‌افزاری قابلیت استخراج پارامترهای واسنجی شده را دارا می‌باشند. هم‌چنین می‌توان با استفاده از روش سعی و خطای دستی اقدام به استخراج مقادیر واسنجی شده نمود که این امر مستلزم صرف زمان زیاد بوده و در برخی موارد دستیابی به مقادیر بهینه واسنجی وجود ندارد. از دیگر روش‌های واسنجی مدل‌ها استفاده از روش‌های واسنجی خودکار (برای مثال الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی) است که نسبت به روش‌های سعی وخطا سریع‌تر و دقیق‌تر است. بسیاری از این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت بوده و بر اساس یکی از شیوه‌های گوناگون جستجوی تصادفی عمل می‌کنند و به الگوریتم-های فراکاوشی[1] معروف می‌باشند. اگرچه این الگوریتم‌ها دست‌یابی به بهینه مطلق را تضمین نمی‌نمایند، اما می‌توان با اطمینان بالایی به کسب جواب نزدیک به بهینه امیدوار بود. در الگوریتم‌های فراکاوشی فضای تصمیم به صورت هوشمندانه بررسی می‌شود. در این الگوریتم-ها تابع هدف برای مجموعه‌ای (ترکیبی) از متغیرهای تصمیم محاسبه می‌شود و از مقادیر تابع هدف به ازای ترکیب‌های مختلف، جهت رسیدن به بهترین حالت استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی به‌منظور واسنجی ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان را می‌توان در مطالعات هی و همکاران (2007) و بستانی و همکاران (2010) ملاحظه نمود (He et al, 2007, Bastani et al, 2010). ساموئل و جها با استفاده از الگوریتم ژنتیک به تخمین پارامترهای آبخوان برای استفاده در آزمایش‌های پمپاژ پرداختند (Samuel and Jha, 2003). اسکوپس و همکاران الگوریتم چندهدفه فراکاوشی را برای واسنجی مدل جریان آب سطحی و زیرزمینی در اراضی کشاورزی واقع در مکزیکو استفاده نمودند (Schoups et al, 2005). بکل و نیکلو مدل نیمه گسترده حوضه‌ای که به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی منابع آب و خاک می‌باشد، را با استفاده از الگوریتم NSGA-II واسنجی نمودند (Bekele and Nicklow, 2007). افشار و همکاران با استفاده از الگوریتم PSO مدل دو بعدی هیدرودینامیکی کیفیت آب (CE-QUAL-W2) را واسنجی نمودند (Afshar et al, 2011). نتایج این مطالعه نشان دهنده دقت قابل قبول ضرایب بهینه واسنجی بود.

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته[2] نیز یکی از الگوریتم‌های نوین بهینه-سازی است که در تحقیقات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. حسینی طباطبایی و سالاری (1392) به بررسی کاربرد الگوریتم بهینه سازی فاخته در بهینه سازی سازه‌های قابی پرداختند. ایشان برای بررسی کارایی روش خود، المان‌های یک قاب یک دهنه هشت طبقه تحت قیود تغییر مکان و تنش را با استفاده از الگوریتم‌های بهینه-سازی فاخته، ژنتیک و سیستم مورچگان، بهینه‌سازی و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج به‌دست آمده حاکی از دقت بالاتر الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نسبت به سایر روش‌ها در یافتن سطح مقاطع بهینه بود. ابوذری خویی و حاتملو (1393) در تحقیقی به بررسی و مرور تعدادی از مسائلی که توسط الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (COA) حل شده‌اند، پرداختند. آن‌ها ابراز داشتند که نتایج بررسی و مرور مقالات مختلف نشان‌گر برتری الگوریتم فاخته در مقایسه با سایر روش‌های بهینه سازی تکاملی است که در زمینه‌های مختلف

1- Evolutionary Optimization Methods
2- Cuckoo Optimization Alg. (COA)

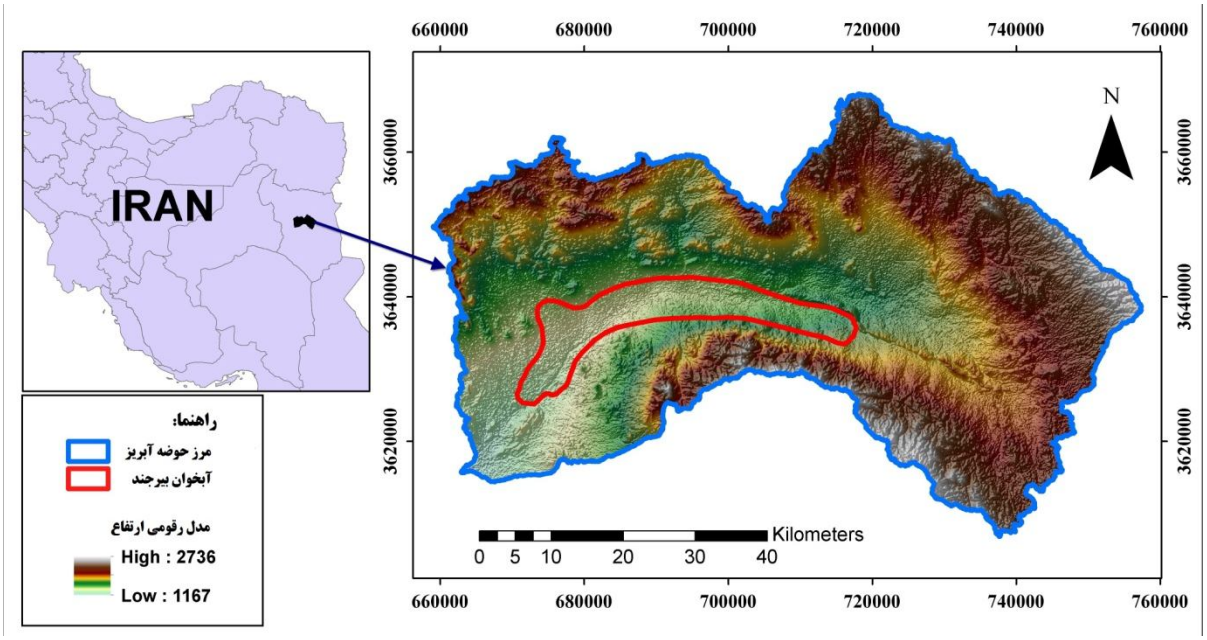
مهندسی عمران، صنعت، نیروگاه‌ها و تشخیص بیماری‌ها کاربرد فراوان دارد. هم‌چنین همگرایی سریع‌تر، سرعت بیش‌تر، دقت بسیار بالاتر، توانایی جستجوی محلی در کنار جستجوی کلی، احتمال بسیار کم‌تر گیرافتادن در نقاط بهینه محلی، جستجوی با جمعیت متغیر (به دلیل نابودی جمعیت در مناطق نامناسب)، حرکت کلی جمعیت به سمت نقاط بهتر با نابود شدن جواب های نامناسب‌تر و توانایی حل سریع مسایل بهینه‌سازی با ابعاد بالا، از جمله ویژگی‌های الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در مقایسه با سایر الگوریتم‌های مشابه برشمرده شده است.

با توجه به این‌که دقت شبیه‌سازی آبخوان نیازمند شناخت صحیح مقادیر پارامترهای هیدرودینامیکی متناسب با آبخوان می‌باشد، لذا استفاده از ابزاری که بتواند در مقیاس وسیع به واسنجی این پارامترها بپردازد، درخور توجه است. به‌همین دلیل در این تحقیق واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از الگوریتم فراکاوشی فاخته که یکی از روش‌های نوین بهینه‌سازی می‌باشد، انجام گرفت. به‌عنوان 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 مختصات32 و 34́ تا 33 و 8́ عرض شمالی و 58 و 41́ تا 59 و 44́ طول شرقی 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 طبقه بندی اقلیمی دومارتن جزء مناطق خشک محسوب می شود. از نظر توپوگرافی حداکثر ارتفاع دشت بیرجند 2736 متر و حداقل ارتفاع آن 1167 متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد است. شیب زمین در قسمت‌های شرقی زیاد بوده و هرچه به سمت غرب و قسمت های انتهایی دشت حرکت می‌کنیم شیب آن کم شده و سطح زمین تقریباً حالت مسطح دارد.



شکل 1- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

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

1- Continuum Approach

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 به‌کار 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:

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

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.

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:

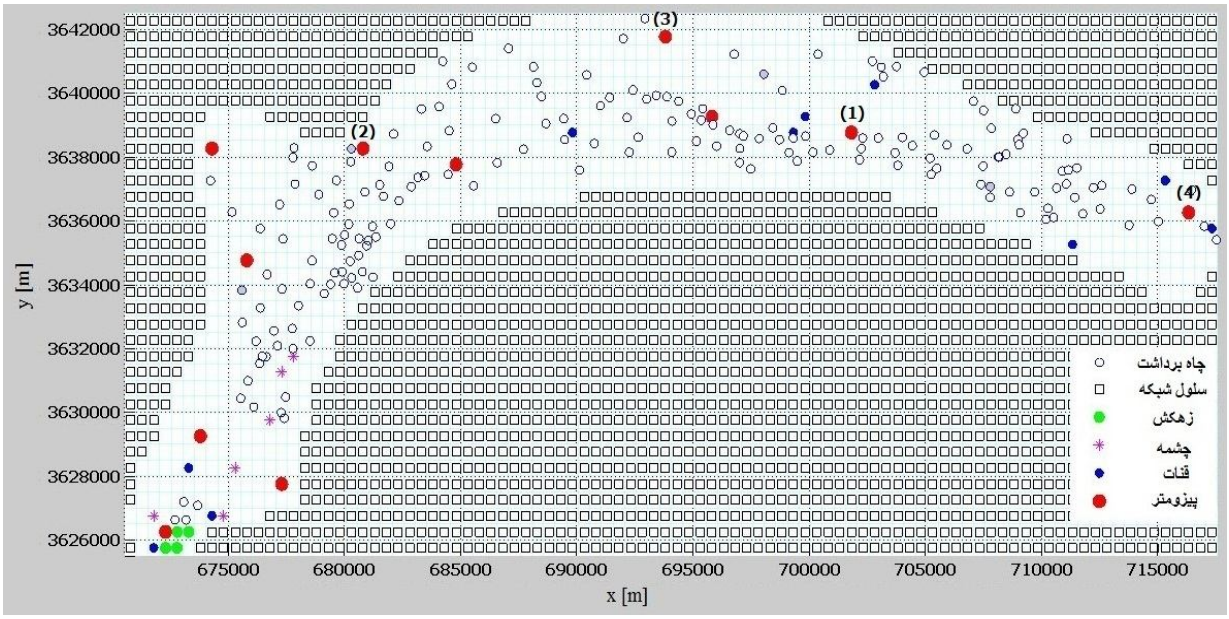
$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x h \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y h \frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z h \frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

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.

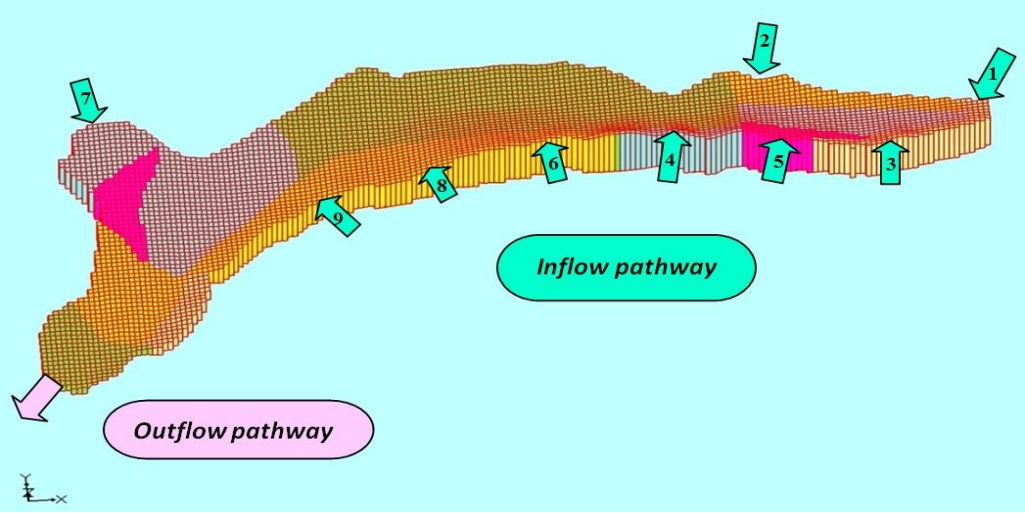
مدل کمی آبخوان

در این تحقیق برای ساخت مدل جریان در منطقه مورد مطالعه، از هفت لایه اطلاعاتی 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 زیرزمینی به صورت زهکش است. 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. همچنین تعداد 6 عدد چشمه و 11 حلقه قنات موجود در آبخوان در مدل گنجانده شد (شکل 2).

با توجه به اقلیم خشک منطقه و بارش ناچیز نزولات جوی، تغذیه سطحی در مدل تنها ناشی از آب برگشتی مصارف شهری (80 درصد) و کشاورزی (10 درصد) بوده و همچنین جبهه‌های آب ورودی و خروجی مطابق شکل (3) در مدل گنجانده شد.



شکل 2- شبکه بندی آبخوان و موقعیت چاه‌ها، پیزومترها و زهکش منطقه مورد مطالعه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB



شکل 3- موقعیت جبهه‌های آب ورودی و خروجی در آبخوان منطقه مورد مطالعه

جهت اعمال مقادیر هدایت هیدرولیکی (k) و ضریب ذخیره (S_y)، سطح سفره آب زیرزمینی به 17 منطقه همگن تقسیم گردید. 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 x500 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). مدل‌سازی جریان دشت بیرجند برای یک سال، از مهر 1389 تا مهر 1390 انجام گرفت. جهت انجام مدل‌سازی از 13 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[3]) با استفاده از ابزار درون‌یابی در محیط GIS[4] به روش کریجینگ[5] درون یابی و به تمامی سلول‌های شبکه اختصاص داده شد.

1- Stress Period
2- Time Step
3- Initial Condition
4- Geographical Information System
5- Kriging

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

الگوریتم تکاملی فاخته یا *COA*[6] برای اولین بار توسط رامین رجبیون در سال 2011 ارائه گردید. این الگوریتم از زندگی پرنده‌ای به نام فاخته الهام می‌گیرد. نحوه تخم‌گذاری و رشد خاص فاخته، ایده اصلی طرح این الگوریتم است. برخی از پرندگان خود را از دردسر هرگونه لانه‌سازی و وظایف والدین رهانیده و به نوعی زیرکی جهت پرورش جوجه‌های خود متوسل می‌شوند. این پرندگان در اصطلاح پارازیت‌های اولاد[7] نامیده می‌شوند. فاخته مشهورترین پارازیت اولادی می‌باشد.

فاخته یکی از تخم‌های پرنده میزبان را از بین می‌برد و تخم خود را لا به لای تخم‌های موجود در لانه میزبان قرار می‌دهد. بدین شکل نگهداری از تخم را بر عهده پرنده میزبان می‌گذارد. فاخته‌ها این کار را با تقلید از رنگ و الگوی تخم‌های موجود در هر لانه انجام می‌دهند تا تخم‌های جدید لانه شبیه تخم‌های قبلی و واقعی میزبان باشند. تخم‌های شبیه‌تر به تخم‌های لانه، فرصت رشد و بقای بیش‌تری دارند. فاخته‌های مورد استفاده در این مدل دو نوع‌اند: فاخته بالغ و تخم.

شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی در گام‌های زیر به طور خلاصه آمده است.

1- تعیین زیستگاه اولیه فاخته‌ها (جواب اولیه) با انتخاب چند نقطه تصادفی روی تابع.

2- اختصاص چند تخم به هر فاخته.

3- تعیین شعاع تخم‌گذاری یا *ELR*[8] برای هر فاخته.

- مقدار *ELR* برای هر فاخته با توجه به تعداد تخم‌ها و فاصله آن

6- Cuckoo Optimization Algorithm
7- Brood Parasite
8- Egg Laying Radius

تا مقصد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ELR = \alpha \times \frac{Number\ of\ current\ cuckoo's\ eggs}{Total\ number\ of\ eggs} \times (var_{hi} - var_{low}) \quad (3)$$

که در آن Var_{hi} و Var_{low} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر متغیرهای تصمیم هستند. α عددی صحیح است که کنترل‌کننده حداکثر ELR می‌باشد.

4- تخم‌گذاری فاخته‌ها در محدوده ELR مربوط به خودشان.

5- حذف تخم‌های با مقدار تابع هدف کم.

6- تعیین مقدار تابع هدف برای هر فاخته بالغ.

7- محدود کردن حداکثر تعداد فاخته‌های موجود در محیط.

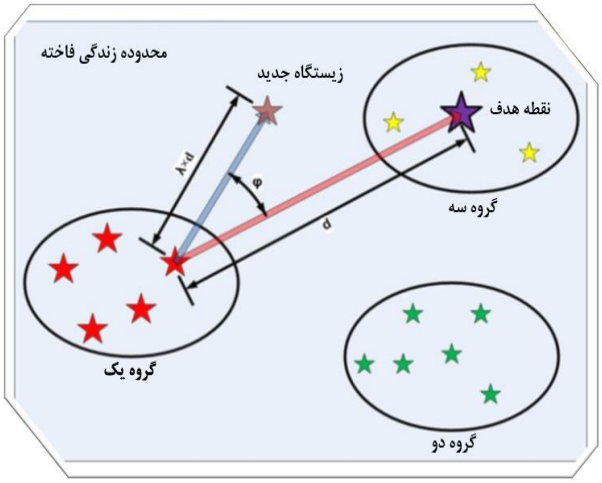
8- گروه‌بندی فاخته‌ها و تعیین زیستگاه برتر.

- گروه‌بندی آن‌ها با روش دسته بندی k میانگین[1] انجام می‌شود، بدین شکل که k (معمولاً 3 تا 5) گروه در نظر گرفته شده و بر اساس محدوده تغییرات تابع سود فاخته‌ها، میانگین سود هر گروه تعیین شده و هر فاخته به گروهی تعلق می‌گیرد که کم‌ترین فاصله را با میانگین آن گروه داشته باشد.

9- مهاجرت فاخته‌های جدید به سمت زیستگاه برتر.

- در حرکت به سمت زیستگاه هدف، فاخته تمام مسیر را طی نمی‌کند بلکه تنها $\lambda\%$ از مسیر را با انحراف φ رادیان می‌پیماید (شکل 4). این دو پارامتر باعث می‌شوند که نقاط بیش‌تری از فضای مسئله جستجو شوند. برای هر فاخته، λ عددی تصادفی بین صفر و یک و φ عددی تصادفی بین ω و $-\omega$ است. (ω) حدود $\pi/6$ مناسب است *(Rajabioun, 2011)*.

10- در صورت برقراری شرایط توقف، پایان الگوریتم و در غیر این صورت رفتن به گام دوم.



شکل 4- مهاجرت یک فاخته به سمت زیستگاه هدف

پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته که به صورت سعی و خطا تعیین گردیده است، در جدول(1) نشان داده شده است.

جدول 1- پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته

عنوان پارامترها	مقدار انتخابی
تعداد فاخته اولیه	50
حداقل تعداد تخم هر فاخته	2
حداکثر تعداد تخم هر فاخته	5
حداکثر تعداد فاخته‌های زنده	50
حداکثر تکرار	100
تعداد گروه‌ها یا دسته‌ها	3
$\pi/6$	ω
معیار همگرایی	1×10-10

تهیه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی جهت واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان

منظور از مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، تلفیق مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی است. پس از آماده‌سازی مدل شبیه‌ساز کمی آبخوان منطقه مورد مطالعه در محیط برنامه‌نویسی *MATLAB* با استفاده از برنامه *MF2005NWT*[2] که از تحلیل‌گر نیوتن-رافسون[3] برخوردار است، برای دست‌یابی به هدف اصلی این تحقیق (واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان)، نیاز به تلفیق مدل شبیه‌ساز با الگوریتم بهینه‌ساز(فاخته) می‌باشد. در نتیجه با نوشتن برنامه میانجی، ارتباط بین مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی (*COA*)، برقرار گردیده و مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز حاصل گردید.

معیارهای ارزیابی و سنجش مدل

جهت ارزیابی و سنجش مدل از معیارهای میانگین خطا (ME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید، که رابطه آن‌ها در زیر آمده است:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} (h_o - h_s)_i}{n} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |(h_o - h_s)_i|}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_o - h_s)_i^{\,2}}{n}} \quad (6)$$

1- K-Means Clustering Method

2- Modflow-2005-NWT

3- Newton-Raphson Solver

که در روابط فوق: h_o هد مشاهده‌ای، h_s هد شبیه‌سازی شده و n تعداد پیزومترها می باشد.

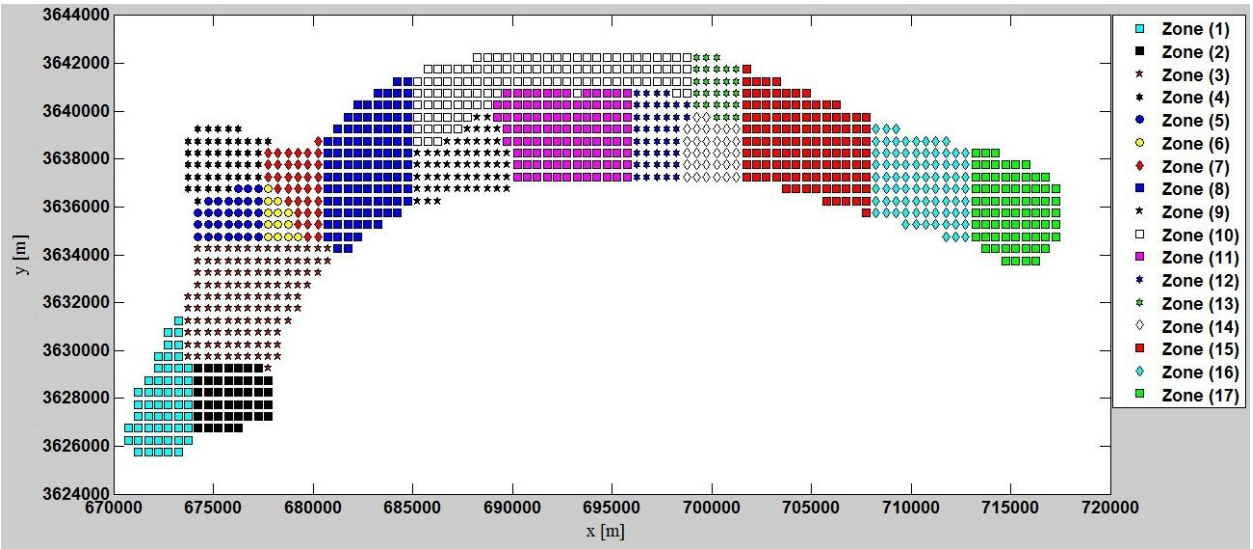
نتایج و بحث

پس از تهیه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، مدل برای یک دوره یک ساله (سال آبی 90-1389) با 13 دوره تنش ماهیانه جهت واسنجی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان به تعداد 2000 تکرار اجرا شد.

جهت تعیین مقادیر بهینه ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، ابتدا مقادیر تقریبی هدایت هیدلولیکی در حالت ماندگار در سطح دشت واسنجی اولیه گردید و سپس مقادیر نزدیک به هم در یک زون قرار گرفتند. پس از زون‌بندی، مقادیر بهینه پارامترهای آبخوان (k و Sy) در زون‌های مربوطه در حالت غیر ماندگار محاسبه گردید. که با توجه به شکل 5 در جدول2 نشان داده شده است. لازم به ذکر است

با توجه به مقادیر بدست آمده در جدول 2، شبیه‌سازی مقادیر سطح ایستایی توسط مدل در دوره واسنجی انجام شد. مقادیر سطح ایستایی محاسبه شده و سطح ایستابی مشاهداتی در انتهای دوره شبیه‌سازی برای چهار پیزومتر به عنوان نمونه در شکل 6 نشان داده شده است.

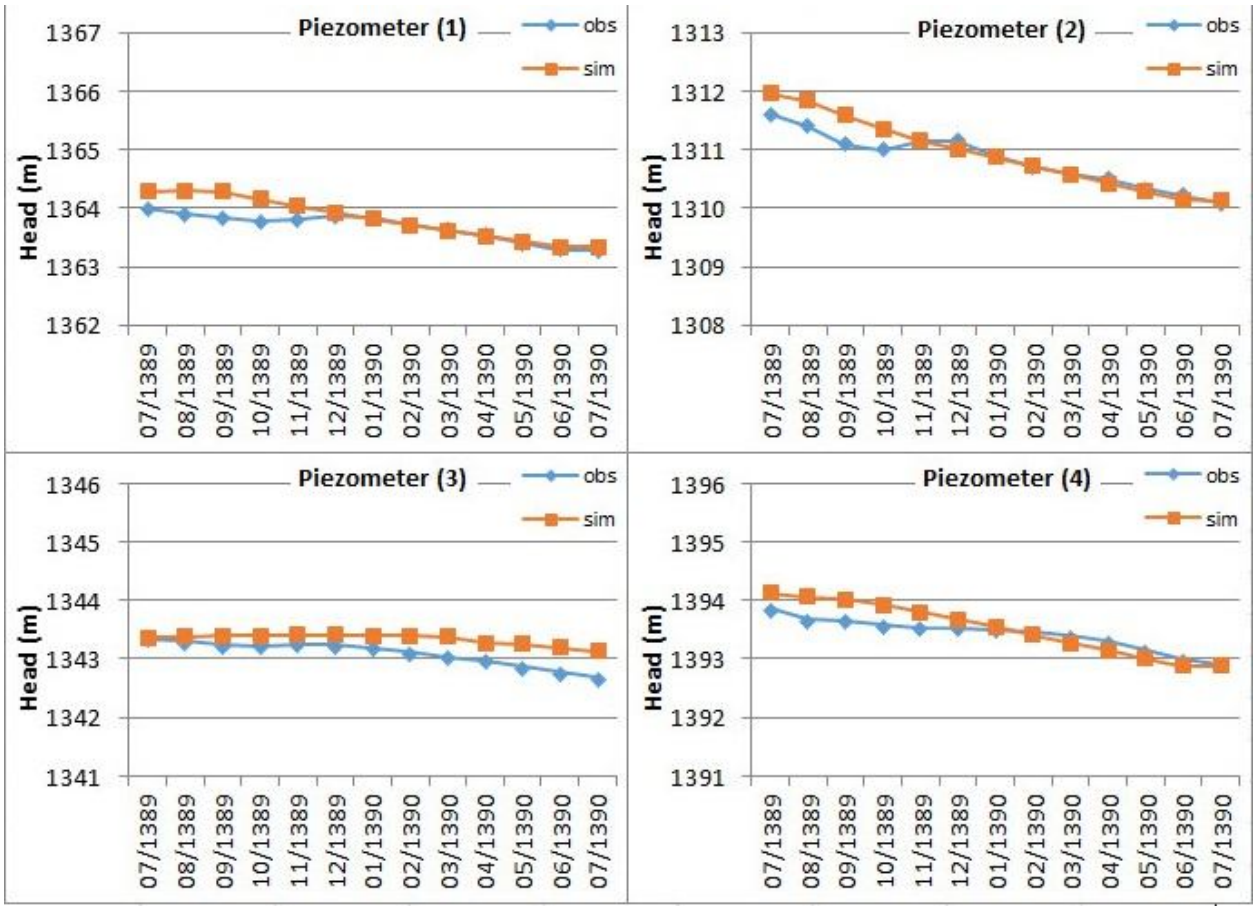
جهت ارزیابی مقادیر پارامترهای بهینه (دوره واسنجی)، دوره صحت سنجی برای یک دوره یک ساله (سال آبی 91-1390) با 13 دوره تنش ماهیانه در نظر گرفته شد. مقایسه مقادیر چشمی سطح ایستابی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در انتهای دوره صحت سنجی برای چهار پیزومتر منتخب در دوره واسنجی در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 5- طبقه بندی سطح سفره آب زیرزمینی به 17 منطقه همگن در محیط برنامه‌نویسی MATLAB

جدول 2- مقادیر بهینه پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان در 17 منطقه همگن مذکور

Sy	k(m/day)	Zones	Sy	k(m/day)	Zones
0/35	22/59	Zone (10)	0/29	1/21	Zone (1)
0/33	4/98	Zone (11)	0/34	1/11	Zone (2)
0/16	60/21	Zone (12)	0/01	30/05	Zone (3)
0/03	75/09	Zone (13)	0/21	69/21	Zone (4)
0/02	17/58	Zone (14)	0/35	20/07	Zone (5)
0/31	14/03	Zone (15)	0/01	37/51	Zone (6)
0/01	30/14	Zone (16)	0/37	5/11	Zone (7)
0/06	12/43	Zone (17)	0/03	20/05	Zone (8)
			0/07	52/57	Zone (9)



شکل 6- مقادیر سطح ایستایی محاسبه شده و مشاهداتی در انتهای دوره شبیه‌سازی برای چهار پیزومتر نمونه در دوره واسنجی

جهت بررسی میزان دقت مدل، مقایسه مقادیر هد شبیه سازی شده و مشاهده شده با کمک معیارهای سنجش مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی انجام گرفت (جدول 3).

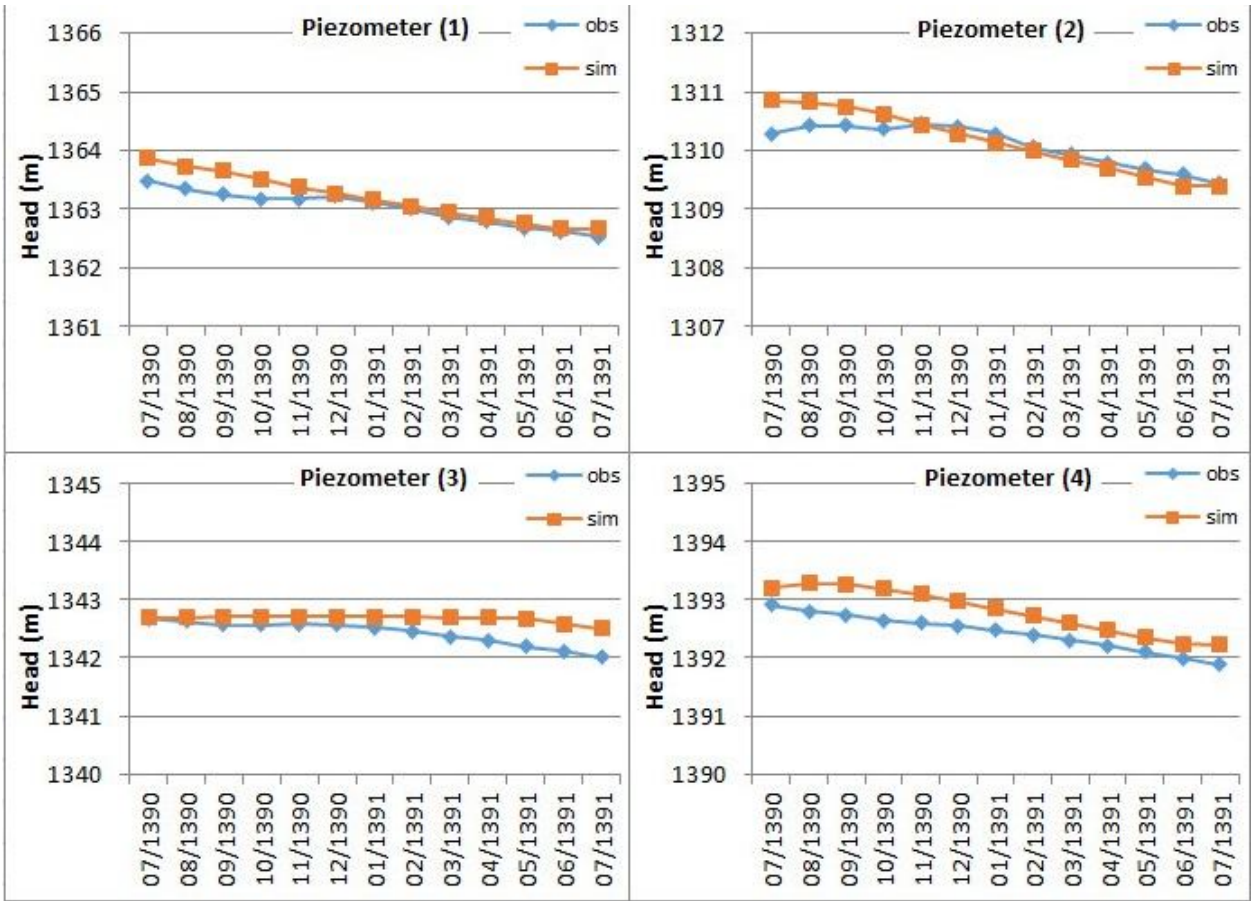
جدول 3- مقایسه مقادیر هد شبیه‌سازی شده و مشاهداتی با کمک معیارهای ارزیابی خطا در مدل ارائه شده

دوره	MAE(m)	RMSE(m)	ME(m)
واسنجی	0/48	0/73	0/17
صحت سنجی	0/63	0/89	0/32

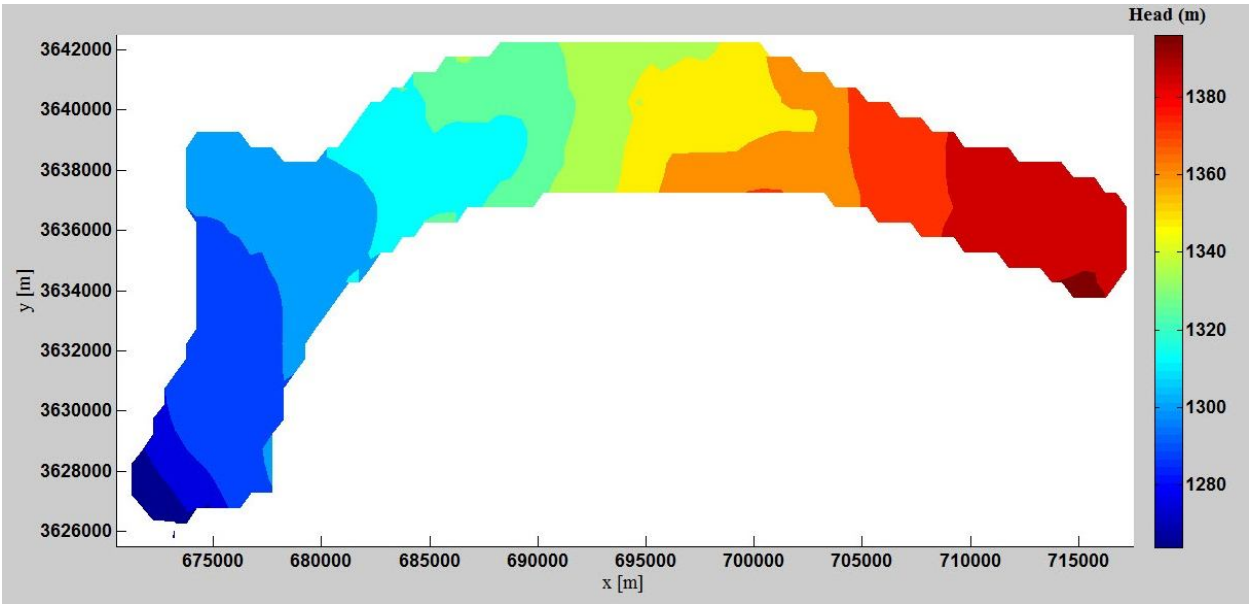
با توجه به مقادیر مناسب معیارهای خطا در جدول3 و اختلاف ناچیز هد محاسباتی و مشاهداتی برای چهار پیزومتر نمونه در دو دوره واسنجی و صحت سنجی (شکل‌های 6 و 7)، می‌توان دریافت مدل ارائه شده قادر به شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی آبخوان مورد مطالعه به شکل قابل قبولی می‌باشد. همچنین میزان خطای پایین شبیه‌سازی نشان از کارآیی بالای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در واسنجی پارامترهای مدل داشت.

مقادیر سطح ایستایی محاسبه شده توسط مدل در روز اول و انتهای دوره شبیه‌سازی در سطح سفره آب زیرزمینی در محیط *MATLAB* محاسبه گردید که به ترتیب در شکل‌های (8 و 9) نشان داده شده است.

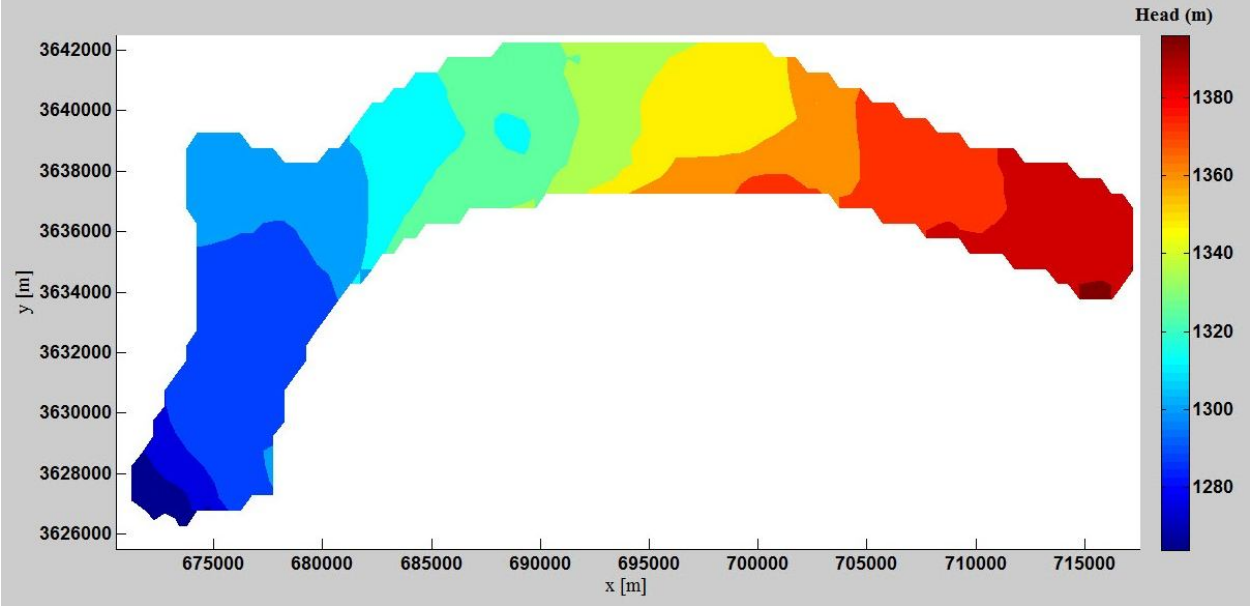
با توجه به شکل 9 ملاحظه شد ارتفاع سطح آب زیرزمینی از شرق به غرب و جنوب غربی آبخوان روند نزولی دارد و در نتیجه جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در دشت مربوطه نیز در همین راستا است. هم‌چنین با مقایسه شکل‌های (8 و 9) مشاهده شد، سطح آب زیرزمینی با ادامه روند برداشت کنونی، در طول دوره شبیه‌سازی افت نموده و مقدار افت سطح آب، در منطقه غربی آبخوان نسبت به سایر مناطق بیش‌تر است. این امر می‌تواند به دلیل عدم تغذیه سفره آب زیرزمینی در منطقه غربی آبخوان و نیز وجود زهکش‌های طبیعی در خروجی دشت (جنوب غربی آبخوان) باشد.



شکل 7- مقادیر سطح ایستایی محاسبه شده و مشاهداتی در انتهای دوره شبیه‌سازی برای چهار پیزومتر منتخب در دوره صحت سنجی



شکل 8- سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در انتهای دوره تنش اول در حالت غیر ماندگار با استفاده از نرم افزار MATLAB



شکل 9- سطح آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده در انتهای دوره شبیه‌سازی در حالت غیر ماندگار با استفاده از نرم افزار MATLAB

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. به منظور واسنجی مدل از الگوریتم بهینه‌سازی فاخته (یکی از روش‌های نوین بهینه‌سازی) استفاده گردید. مدل شبیه‌سازی با الگوریتم بهینه‌سازی تلفیق گردید و مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB ارائه گردید. دوره واسنجی مدل برای یک دوره یک ساله (سال آبی 90-1389) با 13 دوره تنش ماهیانه در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی مقادیر پارامترهای بهینه (دوره واسنجی)، دوره صحت سنجی نیز برای یک دوره یک ساله (سال آبی 91-1390) با 13 دوره تنش ماهیانه در نظر گرفته شد.

ارزیابی دقت واسنجی و صحت سنجی مدل پیشنهادی با استفاده از معیارهای ارزیابی میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) انجام گرفت. مقادیر معیارهای فوق در دوره واسنجی به ترتیب برابر 0/48، 0/73 و 0/17 و در دوره صحت سنجی به ترتیب برابر 0/63، 0/89 و 0/32 حاصل گردید. با تحلیل نتایج حاصل از به‌کارگیری ساختار پیشنهادی می‌توان دریافت که رویکرد ارائه شده دقت بسیار بالایی در تخمین صحیح پارامترهای آبخوان دارد. هم‌چنین ملاحظه شد ارتفاع سطح آب زیرزمینی از شرق به غرب و جنوب غربی آبخوان روند نزولی دارد و در نتیجه جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در دشت مربوطه نیز در همین راستا است. با مقایسه سطح آب زیرزمینی در ابتدا و انتهای دوره شبیه‌سازی، مشاهده شد سطح آب زیرزمینی با ادامه روند برداشت کنونی، در طول دوره شبیه‌سازی افت نموده و مقدار افت سطح آب، در منطقه غربی آبخوان نسبت به سایر مناطق بیش‌تر است. این امر می‌تواند به دلیل عدم تغذیه سفره آب زیرزمینی در منطقه غربی آبخوان و نیز وجود زهکش‌های طبیعی در خروجی دشت باشد. در نتیجه توصیه می‌شود با توجه به عمق کم آبخوان در این نواحی و غلظت نسبتاً بیش‌تر مواد آلاینده، برداشت جهت مصرف شرب از این ناحیه صورت نگیرد.

منابع

ابوذری خویی،ن و حاتم‌لو،ع. 1393. کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در حل مسائل مختلف بهینه سازی. همایش ملی مهندسی رایانه و مدیریت فناوری اطلاعات، تهران، 1-9.

حسینی طباطبایی،م.ر و سالاری،ع.ا. 1392. کاربرد الگوریتم بهینه سازی فاخته در بهینه سازی سازه های قابی. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، 1-9.

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

Study: Birjand Aquifer). Fourth Conference of Water Resources Management. Tehran. Iran.

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

Rajabioun, Ramin. 2011. Cuckoo optimization algorithm. Applied soft computing, 11.8: 5508-5518.

Samuel,M.P and Jha,M.K. 2003. Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 5.1: 348-359.

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,M.M.R., Eil beige,M. 2014. Auto-Calibration of Aquifer Parameters Using Aquifer Distributed Mathematical Models and Direct Searching Algorithm journal Water and Wastewater. 25.91:98-109.

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.

Resources Management. 25.10: 2613-2632.

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.

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.

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.

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.

Kersic,N. 1997. Quantitative Solution in Hydrology and Groundwater Modeling. Lewis Publishers.

Mohtasham,M., Dehghani,A.A., Akbarpour,A., Meftah Halaghi,M. and Etebari,B. 2011. Groundwater Level Determination by Using GMS Model (Case

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 2, Vol. 9, May.-Jun. 2015, p. 345-356

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره2، جلد9، خرداد - تیر 1394، ص. 356-345

Application of Cuckoo Optimization Algorithm in Automatic Calibration of Aquifer Hydrodynamic Parameters Using Mathematical Model

S. Sadeghi Tabas[*1], A. Akbarpour[2], M. Pourreza Bilondi[3] and S.Z. Samadi[4]
Recived: Mar.16, 2015 Accepted: Jan.10, 2015

Abstract

Simulation of Aquifer behavior has great importance in order to identifying the measurement of operation and planning for sustainable usage of these resources. That is why groundwater models predicts qualitative and quantitative aquifer behavior by hydrological, hydraulically and hydrogeological parameters. Since appropriate identification of these parameters increases aquifer simulating accuracy therefore estimating reasonable values of model parameters is crucial real situations planning. In this study one model is provided according to advanced optimization methods for calibrating aquifer hydrodynamics parameters (Sy and k) in Birjand plains. The recommended model is a combination of simulating and optimizing model (Cuckoo Optimization Algorithm) in MATLAB. Calibration period was one year (water year 2010-2011) with monthly13 Stress period. In order to evaluating the value of optimized parameter (calibration period) Validation period was one year period (water year 2011-2012) with 13 monthly Stress period. The accuracy of calibration and validation of model was evaluated by Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Error (ME) criteria. The amounts of these criteria were respectively 0.48, 0.73 and 0.17 in calibration period and these were respectively 0.63, 0.89 and 0.32 in validation period. Results revealed that presented approach has high accuracy for reasonable estimation aquifer parameters.

Keywords: COA, Simulator-Optimizer groundwater model, Birjand plains, Hydraulic conductivity, Specific yield, MATLAB

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