



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و سوم، شماره پنجم، ۱۳۹۵  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## ارائه مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز کمی و کیفی بهره‌برداری از آبخوان به منظور تعدیل غلظت آلاینده‌ها با استفاده از الگوریتم فاخته

\* حمید سعیدی<sup>۱</sup>، ابوالفضل اکبریور<sup>۲</sup>، اکبر باغوند<sup>۳</sup>، محمدحسین نیک‌سخن<sup>۴</sup> و صادق صادقی‌طپس<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند،

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران، استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه تهران،

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** رشد جمعیت و توسعه کشاورزی و صنعتی نیاز روزافزون به استفاده از منابع آب زیرزمینی را موجب می‌گردد. از این رو کیفیت این منابع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در برخی آبخوان‌ها به علت توزیع ناهمگون منابع آلاینده، برداشت متمرکز بی‌رویه در نقاط خاص و یا تفاوت جنس آبخوان، کیفیت آب آن در نواحی مختلف بسیار متغیر است. در این موارد در صورت عدم امکان حذف آلودگی، می‌توان با اجرای سیاست بهینه بهره‌برداری، غلظت آلاینده‌ها را تا حد امکان در سطح آبخوان یکنواخت کرد. هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، جهت تعیین دبی بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری به منظور به حداقل رساندن گرادیان غلظت آلاینده‌ها در نقاط متفاوت آبخوان بود، به گونه‌ای که نیاز آبی نیز تأمین شود. به عبارت ساده‌تر، دبی برداشت از چاه‌ها به گونه‌ای تعیین شود که کیفیت آب از لحاظ یک پارامتر کیفی خاص در تمام سطح آبخوان یکسان باشد.

**مواد و روش‌ها:** ابتدا مدل شبیه‌ساز کمی و کیفی آبخوان در محیط نرم‌افزار *GMS* ایجاد گردید. برای دستیابی به هدف اصلی این پژوهش (تعیین دبی بهینه چاه‌ها جهت کمینه نمودن گرادیان غلظت *EC* در سطح آبخوان)، نیاز به تلفیق مدل شبیه‌ساز با الگوریتم بهینه‌ساز (فاخته) می‌باشد. با توجه به این که نرم‌افزار *GMS* تنها یک رابط گرافیکی بین کاربر و مدل‌های شبیه‌سازی آبخوان (*MODFLOW* و *MT3DMS*) بوده و منبع باز نمی‌باشد، امکان تلفیق مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز وجود نداشت. بنابراین برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی *MATLAB* نوشته شد که توانایی اجرای مدل‌های *MODFLOW* و *MT3DMS* را داشت. با توجه به منبع باز بودن کد مربوطه، امکان تلفیق الگوریتم بهینه‌ساز و مدل‌های شبیه‌ساز کمی و کیفی به وجود آمد. در نهایت با ترکیب مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی (*COA*)، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز حاصل گردید.

**یافته‌ها:** پس از تهیه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز، مدل به تعداد ۱۵۰۰ بار در یک دوره ۵ ساله اجرا و همگرایی پس از ۱۰۰۰ بار اجرای آن حاصل شد. مقدار تابع هدف (میانگین قدرمطلق اختلاف غلظت‌های محاسباتی در محل چاه‌ها)

\* مسئول مکاتبه: [hamid.saeedi85@hotmail.com](mailto:hamid.saeedi85@hotmail.com)

بر اساس دبی‌های بهینه در انتهای دوره شبیه‌سازی برابر ۱۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر محاسبه گردید که این مقدار بر اساس شبیه‌سازی مدل برای پنج سال آینده، در صورت نادیده گرفتن دبی‌های بهینه (ادامه روند برداشت کنونی) برابر ۲۰۵۵ میکروموس بر سانتی‌متر خواهد گردید.

**نتیجه‌گیری:** نتایج نشان داد گرادیان غلظت *EC* در چاه‌های منتخب، در صورت اعمال سیاست برداشت بهینه نسبت به عدم اجرای این سیاست، به میزان ۱۲ درصد کاهش دارد. به علاوه با مقایسه مقادیر غلظت *EC* اولیه و مقادیر غلظت پس از بهینه‌سازی، مشاهده شد این مقادیر در محل چاه‌ها کاهش چشم‌گیری داشته است. بنابراین می‌توان بیان نمود که اعمال سیاست برداشت ارائه شده، علاوه بر تعدیل گرادیان غلظت، در کاهش غلظت *EC* آبخوان نیز مؤثر است.

**واژه‌های کلیدی:** آب‌های زیرزمینی، گرادیان غلظت، هدایت الکتریکی، روش‌های بهینه‌سازی هوشمند

### مقدمه

آب‌های زیرزمینی همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ذخایر آب شیرین قابل استفاده انسان مطرح بوده است. این منابع به‌طور عمده از طریق حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق، چشمه‌ها و قنوت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند (دی‌ویست، ۱۹۶۵). هدف از مدیریت آب‌های زیرزمینی در یک محل، در واقع بیش‌ترین استفاده ممکن از این منابع برای رفع نیازهای استفاده‌کنندگان در منطقه می‌باشد. نحوه مدیریت باید 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 (چیانگ و کینزلباش، ۲۰۰۱). از این‌رو در سال‌های اخیر مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی به‌عنوان روشی ارزان و سریع در تعیین چگونگی حرکت، بیلان و مدیریت بهره‌برداری از آبخوان، پیشرفت قابل‌توجهی داشته است (کرسیک، ۱۹۹۷).

در حقیقت مدل‌های ریاضی آب‌های زیرزمینی، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل می‌باشند که چگونگی جریان آب زیرزمینی را تحت حاکمیت خود دارند (پری‌کیت، ۱۹۷۵). دوپیت<sup>۱</sup>، تیم<sup>۲</sup>، بوسینسکیو<sup>۳</sup>

و فرشهایمر<sup>۴</sup> اولین افرادی بودند که از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی استفاده کردند (ژنگ و بنت، ۲۰۰۲). از جمله مدل‌هایی که دارای قابلیت‌های بسیار خوبی در مطالعات آب زیرزمینی می‌باشد و هم‌اکنون در بسیاری از کشورهای جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل *GMS*<sup>۵</sup> است که به‌طور عمده 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<sup>۶</sup> کارتوگرافیکی کاربر دوست<sup>۷</sup> (برنامه *GMS*) و تعدادی کدهای تحلیلی مستقل نظیر *MODFLOW*، *MODPATH*، *MT3DMS* و غیره می‌باشد.

در ایران کاربرد مدل‌های ریاضی به‌طور مستقیم به سال ۱۹۶۷ میلادی برمی‌گردد و اولین آبخوانی که مدل آن تهیه گردید، آبخوان ورامین بوده است (چیت‌سازان و ساعت‌ساز، ۲۰۰۵). اعتباری و یعقوب‌زاده (۲۰۰۸) بررسی مدل مفهومی آبخوان دشت تبریز را با استفاده از نرم‌افزار *GMS* انجام دادند. پس از واسنجی نتایج به‌دست آمده از مدل به دو روش

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

1- Dupit  
2- Theim  
3- Boussinesq

پژوهش، تلفیقی از مدل‌های عددی شبیه‌سازی آب زیرزمینی و مدل مدیریت منابع آب انجام گرفت و سیاست تخصیص بهینه ارائه گردید.

بهینه‌سازی یکی از روش‌ها و ابزارهای اساسی اقتصاد و مدیریت در حال حاضر است، چرا که از یک سو منابع و امکانات موجود ثابت بوده و حتی در مواردی رو به کاهش می‌باشد و از سوی دیگر نیازها و درخواست‌ها رو به افزایش است. بسیاری از این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت بوده و بر اساس یکی از شیوه‌های گوناگون جستجوی تصادفی عمل می‌کنند و به الگوریتم‌های فراکاوشی<sup>۱</sup> معروف می‌باشند. الگوریتم بهینه‌سازی فاخته<sup>۲</sup> نیز یکی از الگوریتم‌های نوین در این زمینه است که در پژوهش‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است. حسینی طباطبایی و سالاری (۲۰۱۳) به بررسی کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی فاخته در بهینه‌سازی 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 بهینه‌سازی فاخته، ژنتیک و سیستم مورچگان، بهینه‌سازی و نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. نتایج به دست آمده بیانگر دقت بالاتر الگوریتم بهینه‌سازی فاخته نسبت به سایر روش‌ها در یافتن سطح مقاطع بهینه بود. ابوذری خوبی و حاتملو (۲۰۱۴) در پژوهشی 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 بهینه‌سازی تکاملی است که در زمینه‌های مختلف مهندسی عمران، صنعت، نیروگاه‌ها و تشخیص بیماری‌ها کاربرد فراوان دارد.

مستقیم و معکوس، نتایج مشخص نمود که تفاوت اندکی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط مدل وجود دارد. نجاتی جهرمی و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر خشکسالی سال ۲۰۰۷-۲۰۰۸ را بر روی دشت عقیلی با استفاده از مدل ریاضی تفاضل محدود در محیط GMS انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده صحت بسیار بالای پیش‌بینی مدل بود. ملکی و همکاران (۲۰۱۱) مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی دشت شاهرود را با استفاده از نرم‌افزار GMS برای یک دوره یک‌ساله انجام دادند و ضرایب هیدرودینامیک آبخوان مذکور را اصلاح کردند. انصاری‌مهابادی و همکاران (۲۰۱۱) مدل‌سازی تغییرات سطح ایستابی سفید دشت را به وسیله مدل GMS انجام دادند. نتایج نشان داد که با به کارگیری مدل GMS، پاسخ آب زیرزمینی در یک منطقه دارای اقلیم سرد و خشک به خوبی شبیه‌سازی شده و پیش‌بینی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر تغییر در شرایط تغذیه، براساس سناریوهای مختلف صورت گرفت. محتشم و همکاران (۲۰۱۱) نیز به منظور پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی در دشت بیرجند از نرم‌افزار GMS استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با استفاده از مدل ریاضی GMS تا ۲۴ ماه آینده و با دقت مناسبی می‌توان تغییرات سطح آب را پیش‌بینی نمود. نیکفر (۲۰۱۱) به بررسی گزینه‌های مدیریت بهره‌برداری از آبخوان کرج با رویکرد حفظ آلودگی نترات در حد مجاز پرداختند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد با کاهش میزان برداشت در آبخوان آلوده کرج، می‌توان از افزایش غلظت نترات در نواحی بحرانی جلوگیری نمود. قوچانیان‌حقوقردی (۲۰۱۲) با استفاده از مدل تلفیقی MODFLOW-WEAP به بررسی مسائل مدیریتی آبخوان دشت بیرجند در جهت پیش‌بینی میزان تقاضا و تخصیص بهینه منابع آب در سال‌های آتی پرداخت. در این

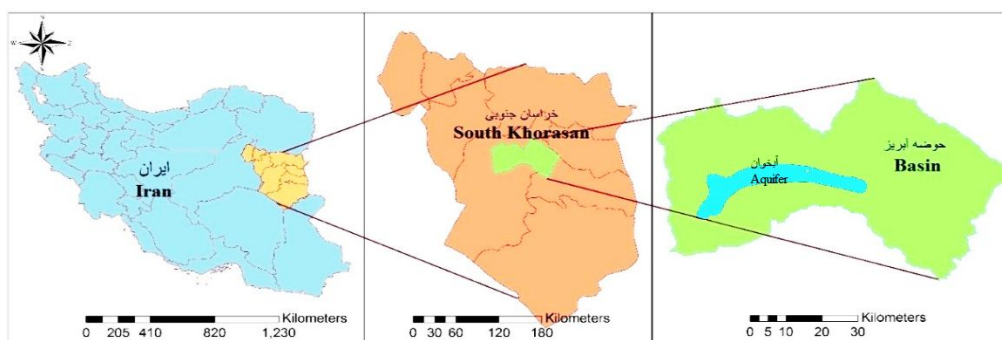
1- Evolutionary Optimization Methods

2- Cuckoo Optimization Alg. (COA)

### مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه: آبخوان دشت بیرجند با مساحت ۲۶۵ کیلومترمربع و متوسط ضخامت اشباع ۳۰ متر، در مختصات ۳۲° و ۳۴° تا ۳۳° و ۸° عرض شمالی و ۵۸° و ۴۱° تا ۵۹° و ۴۴° طول شرقی در استان خراسان جنوبی واقع گردیده است (شکل ۱). وسعت کل حوضه آبریز دشت بیرجند در حدود ۳۴۰۸ کیلومترمربع بوده که از این میزان حدود ۱۳۸۳ کیلومترمربع را دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. دشت بیرجند طبق طبقه بندی اقلیمی دومارتن جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. از نظر توپوگرافی حداکثر ارتفاع دشت بیرجند ۲۷۸۷ متر و حداقل ارتفاع آن ۱۲۴۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد است. شیب زمین در قسمت‌های شرقی زیاد بوده و هرچه به سمت غرب و قسمت‌های انتهایی دشت حرکت می‌کنیم شیب آن کم شده و سطح زمین تقریباً حالت مسطح دارد (فوجانیان و همکاران، ۲۰۱۳).

هدف از این پژوهش، ارائه یک مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، جهت تعیین دبی بهینه پمپاژ چاه‌های بهره‌برداری به‌منظور به حداقل رساندن گرادیان غلظت آلاینده‌ها در نقاط متفاوت آبخوان بود، به‌گونه‌ای که نیاز آبی نیز تأمین شود. به‌عبارت ساده‌تر، دبی برداشت از چاه‌ها به‌گونه‌ای تعیین شود که کیفیت آب از لحاظ یک پارامتر کیفی خاص در تمام سطح آبخوان یکسان باشد. مدل مذکور از تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی کمی و کیفی آبخوان با الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند فاخته، در محیط برنامه‌نویسی *MATLAB* حاصل شد. گرچه پارامتر کیفی مبنا در این پژوهش *EC* است اما روش به‌کار گرفته شده، برای سایر پارامترهای کیفی آب مانند فلزات سنگین، آنیون‌ها و کاتیون‌ها، آلاینده‌های شیمیایی و غیره نیز قابل استفاده می‌باشد. همچنین در این پژوهش کارایی الگوریتم هوشمند فاخته که یکی از الگوریتم‌های نوین در حوضه بهینه‌سازی است، در مسائل بهینه‌سازی منابع آب بررسی گردید.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Geographical location of the study area.

می‌شود و سپس به محدوده‌های مجاور تعمیم داده می‌شود. تحت این شرایط معادله بیلان به فرم یک معادله دیفرانسیل جزئی در می‌آید. هر جمله در این معادله معرف مقدار خاص یک پارامتر در واحد سطح، حجم یا زمان می‌باشد. به‌طور خلاصه یک مدل ریاضی که برای شبیه‌سازی جریان آب‌های زیر زمینی

مبانی مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی: مدل ریاضی آب‌های زیرزمینی در واقع فرم ریاضی معادله بیلان را در یک منطقه حل می‌کند و به‌طورکلی با فرض پیوستگی محیط<sup>۱</sup> ساخته می‌شود. با این نگرش، معادلات بیلان برای یک محدوده از آبخوان نوشته

#### 1- Continuum Approach

به کار می‌رود، مجموعه‌ای از مقادیر عددی پارامترهای مختلف در معادله بیان می‌باشد (خلقی، ۲۰۰۳).

**معادلات حاکم بر جریان و انتقال در آب‌های زیرزمینی:** فرم کلی معادله حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی عبارت است از:

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

که در آن،  $k_x$ ،  $k_y$  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 (اندرسون و سنر، ۱۹۹۲).

در آبخوان‌های آزاد ضخامت لایه اشباع با تغییر ارتفاع سطح آب زیرزمینی تغییر می‌کند. برای حل معادله جریان در این حالت دوپویی در سال ۱۸۶۳ 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 سه‌بعدی 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 آن،  $S_y$  آب‌دهی ویژه است (شمسایی، ۱۹۹۸).  
معادله دیفرانسیل جزئی انتقال-پخشیدگی برای  $k$  آلاینده، در حالت جریان غیرماندگار و سه‌بعدی در آب زیرزمینی بدین طریق می‌باشد:

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n$$

که در آن،  $\theta$  تخلخل مفید رسوبات،  $C^k$  غلظت آلاینده محلول  $k$  ام،  $t$  زمان،  $q_s$  نرخ جریان حجمی بر

حجم واحد که نشان‌دهنده تغذیه یا تخلیه می‌باشد،  $X_{ij}$  فاصله در طول محور مختصات کارترین متناظر،  $D_{ij}$  تانسور ضریب پخش هیدرودینامیکی،  $v_i$  سرعت آب منفذی خطی،  $C_s^k$  غلظت شار تغذیه یا تخلیه برای گونه  $k$  ام و در نهایت  $\sum R_n$  ترم واکنش شیمیایی می‌باشد (ژنگ و پریکت، ۱۹۹۹).

معادله ۳ بیان موازنه جرم می‌باشد، یعنی تغییرات در ذخیره جرم در هر زمانی، با اختلاف جرم جریان ورودی و خروجی به دلیل پخش، انتقال، تغذیه/تخلیه و واکنش‌های شیمیایی معادل است.

معادله انتقال-پخشیدگی با معادله جریان از طریق قانون دارسی در ارتباط است:

$$V_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{k_i}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (4)$$

برای حل این معادلات از روش شبکه‌بندی تفاضل محدود در  $GMS$  استفاده می‌شود (شمسایی، ۱۹۹۸).  
مدل کمی و کیفی آبخوان: جهت شبیه‌سازی آبخوان از نرم‌افزار  $GMS7.1$  استفاده گردید. شبیه‌سازی مدل جریان با استفاده از ماژول  $MODFLOW$  و شبیه‌سازی مدل انتقال با استفاده از ماژول  $MT3DMS$  در نرم‌افزار  $GMS$  انجام گرفت. مراحل شبیه‌سازی به‌طور خلاصه در ادامه تشریح می‌شود.

**تهیه مدل مفهومی جریان:** برای ایجاد مدل جریان در نرم‌افزار  $GMS$  از روش مدل مفهومی<sup>۱</sup> استفاده شد. هدف از تهیه مدل مفهومی، ساده کردن شرایط واقعی مورد مطالعه و سازماندهی داده‌های صحرائی است به‌گونه‌ای که با استفاده از آن، سیستم موردنظر راحت‌تر مورد تحلیل و تجزیه قرار گیرد (اندرسون و سنر، ۱۹۹۲). هر چقدر اطلاعات و داده‌های مربوط به منطقه مورد مطالعه جامع و کامل‌تر باشد، فرآیند ساده‌سازی مدل<sup>۲</sup> از دقت بیش‌تری برخوردار و مدل

1- Conceptual Model Approach

2- Simplification

نمود باید محیط را به اجزای کوچک‌تری که اصطلاحاً شبکه می‌نامند، تقسیم نمود. شبکه‌بندی دشت با ۳۸ سطر و ۹۶ ستون از سلول‌هایی مربعی شکل در ابعاد  $500 \times 500$  متر در یک لایه طراحی شد. پس از ایجاد شبکه، سلول‌هایی که خارج از مرز آبخوان قرار داشته و نیاز به محاسبات در آن‌ها نبود، غیرفعال گردیدند. در نهایت تعداد ۱۰۷۷ سلول از سلول‌های شبکه، فعال در نظر گرفته شدند (شکل ۲). مدل‌سازی جریان دشت بیرجند برای یک سال، از مهر ۱۳۸۹ تا شهریور ۱۳۹۰ انجام گرفت. جهت انجام مدل‌سازی از ۱۲ 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 به دست آمده از مطالعات زمین‌شناسی تنها یک لایه آبدار و آن هم از نوع آزاد در دشت بیرجند وجود دارد. در مدل‌سازی جریان معمولاً از مرزهای با بار آبی ثابت (بار آبی مشخص) یا به عبارت دیگر از نوع شرط مرزی دیریکله<sup>۴</sup> استفاده می‌گردد. در بعضی مدل‌سازی‌ها از مرزهای  $GHB^5$  برای اعمال شرایط مرزی استفاده می‌شود. در این مطالعه از این‌گونه مرزها استفاده نشد. بلکه حجم آب ورودی برآورد شده به آبخوان، ناشی از جبهه‌های ورودی آب زیرزمینی به صورت تغذیه سطحی<sup>۶</sup> در سلول‌های مرزی آبخوان به مدل وارد شد. در انتها جهت تکمیل مدل عددی، مقادیر ارتفاع مطلق سنگ کف، توپوگرافی و سطح آب اولیه مشاهده‌ای در ۱۱ پیزومتر موجود (شرایط اولیه<sup>۷</sup>) با استفاده از ابزار درون‌یابی در محیط  $GMS$  به روش کریجینگ<sup>۸</sup> درون‌یابی و به تمامی سلول‌های شبکه اختصاص داده شد (شکل ۲).

مذکور به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. در این روش ابزارهای  $GIS$  و ماژول  $Map$  به کار برده شدند.

در این پژوهش برای ساخت مدل مفهومی جریان، از هفت لایه اطلاعاتی<sup>۱</sup> برای ورود داده‌های مرز آبخوان، پیزومترها، چاه‌ها، تغذیه سطحی، زهکش، هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره استفاده شد.

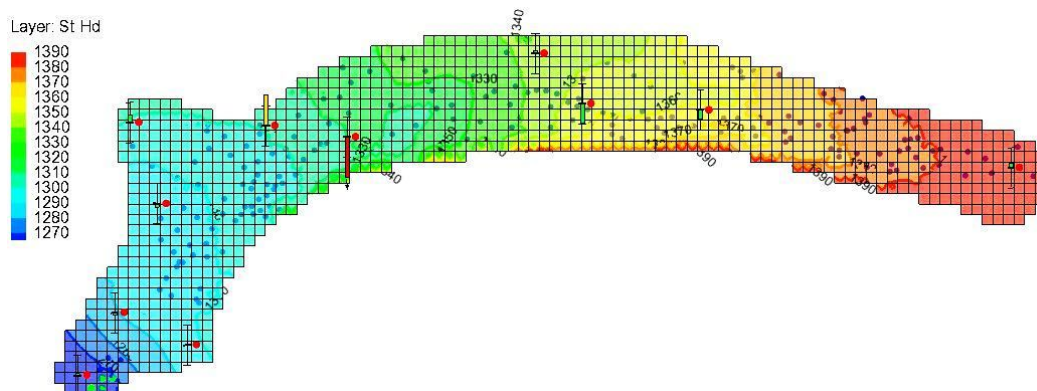
آبخوان مورد مطالعه فاقد مرز فیزیکی و تنها دارای مرز هیدرولیکی بود. این مرزها شامل ۹ جبهه ورودی و یک جبهه خروجی آب زیرزمینی به صورت زهکش بود. نوسانات سطح آب مشاهداتی در ۱۱ پیزومتر موجود در آبخوان، مورد استفاده قرار گرفت. تعداد ۱۹۰ حلقه چاه شامل ۱۳۹ چاه کشاورزی، ۳۱ چاه شرب و ۲۰ چاه صنعتی در مدل مفهومی گنجانده شد (شکل ۲). با توجه به اقلیم خشک منطقه و بارش ناچیز نزولات جوی، تغذیه سطحی در مدل مفهومی تنها ناشی از آب برگشتی شرب و کشاورزی در زون‌های مربوطه در نظر گرفته شد. جهت اعمال مقادیر هدایت هیدرولیکی ( $k$ ) و ضریب ذخیره ( $S_p$ )، سطح دشت به زون‌های مختلف تقسیم و مقادیر اولیه به صورت تخمینی به آن‌ها اختصاص داده شد. این مقادیر پس از ساخت مدل عددی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، واسنجی و صحت‌سنجی گردید.

**تهیه مدل عددی جریان:** مرحله بعد شامل طراحی مدل عددی است، بدین صورت که مدل مفهومی به شکل مناسب و قابل استفاده برای مدل عددی تبدیل شود. این مرحله شامل طراحی شبکه مدل، انتخاب دوره‌های تنش<sup>۲</sup> و گام‌های زمانی<sup>۳</sup>، تعیین شرایط اولیه و مرزی، تعیین نوع و تعداد لایه آبدار و غیره است.

برای اینکه بتوان معادلات دیفرانسیل جزئی را حل

4- Dirichlet  
5- General Head Boundary  
6- Recharge  
7- Initial Condition  
8- Kriging

1- Coverage  
2- Stress Period  
3- Time Step



شکل ۲- مدل کمی آبخوان منطقه مورد مطالعه در نرم افزار GMS.  
Figure 2. Quantitative model of the aquifer area in GMS.

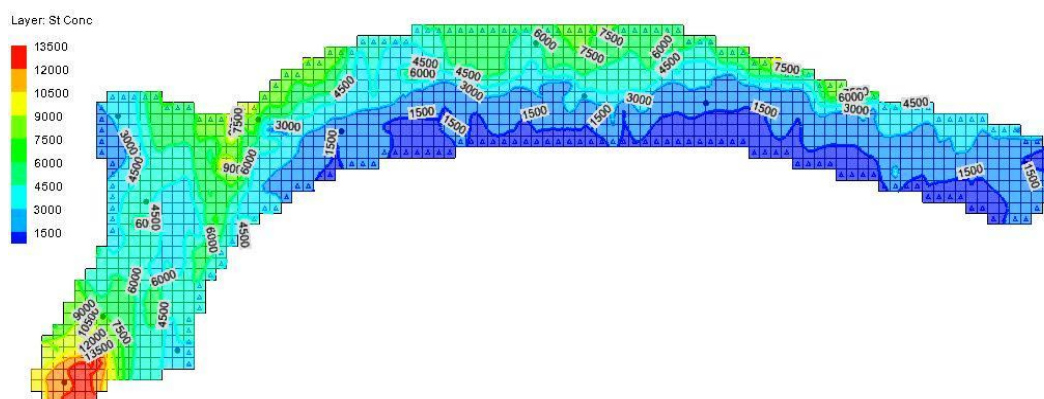
غلظت محلول در آبهای زیرزمینی را برای حالت غیرماندگار توصیف می‌کند. بنابراین شرایط اولیه برای حل معادله حاکم ضروری است. شرط اولیه در مدل کیفی، مقدار غلظت در ابتدای دوره شبیه‌سازی در سلول‌هاست که بدین منظور مقادیر  $EC$  مهر ۸۹ به‌عنوان غلظت اولیه برای تمام سلول‌ها درون‌یابی و به آن‌ها اختصاص داده شد (شکل ۳). برای تعیین شرایط مرزی مدل عددی انتقال، به هر سلول فعال (سلول‌هایی که مقادیر غلظت آن‌ها نسبت به زمان تغییر می‌نماید) مقدار مثبت یک و برای هر سلول غیرفعال مقدار صفر و برای سلول‌هایی که غلظت آن‌ها در طول دوره شبیه‌سازی ثابت می‌باشد، مقادیر منفی یک تخصیص یافت. جبهه‌های مختلف آب ورودی به آبخوان دارای  $EC$  مختص به خود می‌باشند. از آن‌جا که آب ورودی از این جبهه‌ها به‌صورت تغذیه سطحی در سلول‌های مرزی به مدل وارد شد، به‌منظور در نظر گرفتن شوری آب ورودی، غلظت  $EC$  در این سلول‌ها ثابت در نظر گرفته شد. سلول‌های دارای غلظت ثابت در شکل ۳ با علامت مثلث نشان داده شده است.

با تهیه مدل مفهومی جریان و انتقال آبخوان و تبدیل آن‌ها به مدل عددی، مدل شبیه‌سازی آبخوان تکمیل گردید.

**تهیه مدل مفهومی انتقال:** برای ایجاد مدل انتقال نیز از روش مدل مفهومی استفاده شد. برای ساخت مدل مفهومی انتقال از سه لایه اطلاعاتی جهت ورود داده‌های غلظت مشاهداتی در چاه‌ها (پیزومترها)، ضریب پخشیدگی طولی ( $\alpha_L$ ) و تخلخل ( $\theta$ ) استفاده شد.

برای ایجاد لایه اطلاعاتی غلظت مشاهداتی، مقادیر غلظت  $EC$  ماهیانه بر حسب میکروموس بر سانتی‌متر به هر پیزومتر اختصاص داده شد. جهت اعمال مقادیر ضریب پخشیدگی طولی و تخلخل، سطح دشت به زون‌های مختلف تقسیم و مقادیر اولیه به آن‌ها اختصاص داده شد. این مقادیر پس از ساخت مدل عددی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، واسنجی گردید.

**تهیه مدل عددی انتقال:** با توجه به مطالعات اندرسون (۱۹۷۹)، مقدار تخمینی اولیه پخشیدگی طولی ( $\alpha_L$ ) بین ۳۰ تا ۱۰۰ متر و همچنین با توجه به پژوهش‌های بنجاکول (۲۰۱۰)، مقادیر تخمینی اولیه نسبت‌های  $(\alpha_{TV})$  و  $(\alpha_{TH})$  به ترتیب ۰/۱ و ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. از آن‌جا که دوره‌های تنش و گام‌های زمانی در مدل کمی ایجاد شده‌اند، نیاز به ساخت مجدد آن‌ها نیست. محدوده، شبکه‌بندی، توپوگرافی سطح و سنگ کف مدل انتقال، شبیه مدل جریان در نظر گرفته شد. معادله حاکم در مدل انتقال، تغییرات



شکل ۳- مدل کیفی آبخوان منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار GMS.

Figure 3. Qualitative model of the aquifer area in GMS.

شبه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی در گام‌های زیر به‌طور خلاصه آمده است.

- ۱- تعیین زیستگاه اولیه فاخته‌ها (جواب اولیه) با انتخاب چند نقطه تصادفی روی تابع.
- ۲- اختصاص چند تخم به هر فاخته.
- ۳- تعیین شعاع تخم‌گذاری یا  $ELR^3$  برای هر فاخته.
- مقدار  $ELR$  برای هر فاخته با توجه به تعداد تخم‌ها و فاصله آن تا مقصد از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{تعداد تخم‌های موجود فاخته}}{\text{تعداد کل تخم‌ها}} \times (var_{hi} - var_{low}) \quad (5)$$

که در آن،  $Var_{low}$  و  $Var_{hi}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر متغیرها هستند.  $\alpha$  عددی صحیح است که کنترل‌کننده حداکثر  $ELR$  می‌باشد.

- ۴- تخم‌گذاری فاخته‌ها در محدوده  $ELR$  مربوط به خودشان.
- ۵- حذف تخم‌های با مقدار تابع هدف کم.
- ۶- تعیین مقدار تابع هدف برای هر فاخته بالغ.
- ۷- محدود کردن حداکثر تعداد فاخته‌های موجود در محیط.
- ۸- گروه‌بندی فاخته‌ها و تعیین زیستگاه برتر.

الگوریتم بهینه‌سازی فاخته: الگوریتم تکاملی فاخته یا  $COA^1$  توسط رامین رجبیون در سال ۲۰۱۱ ارائه گردید (رجبیون، ۲۰۱۱). 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 دردمس هر گونه لانه‌سازی و وظایف والدین رها کرده و به نوعی زیرکی جهت پرورش جوجه‌های خود متوسل می‌شوند. این پرندگان در اصطلاح پارازیت‌های اولاد<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. فاخته مشهورترین پارازیت اولادی می‌باشد. فاخته یکی از تخم‌های پرنده میزبان را از بین می‌برد و تخم خود را لابه‌لای 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.

1- Cuckoo Optimization Algorithm

2- Brood Parasite

3- Egg Laying Radius



پارامتر باعث می‌شوند که نقاط بیشتری از فضای مسأله جستجو شوند. برای هر فاخته،  $\lambda$  عددی تصادفی بین صفر و یک (با توزیع یکنواخت) و  $\varphi$  عددی تصادفی بین  $\omega$  و  $-\omega$  است. ( $\omega$  حدود  $\pi/6$  مناسب است).

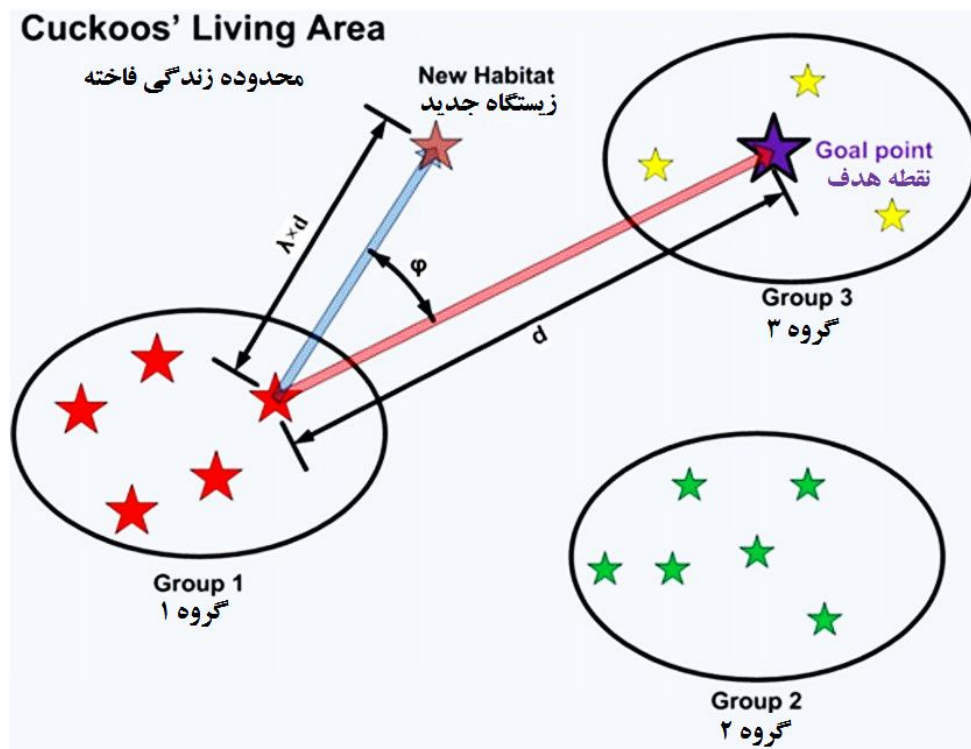
۱۰- در صورت برقراری شرایط توقف، پایان الگوریتم و در غیر این صورت رفتن به گام دوم.

پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم بهینه‌سازی فاخته که به صورت سعی و خطا تعیین گردیده است، در جدول ۱ نشان داده شده است.

- گروه‌بندی آن‌ها با روش دسته‌بندی  $k$  میانگین<sup>۱</sup> انجام می‌شود، بدین شکل که  $k$  (معمولاً ۳ تا ۵) 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.

۹- 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  $\varphi$  رادیا می‌پیماید (شکل ۴). این دو



شکل ۴- مهاجرت یک فاخته به سمت زیستگاه هدف.

Figure 4. Immigration of a sample cuckoo toward goal habitat.

جدول ۱- پارامترهای الگوریتم بهینه‌سازی فاخته.

Table 1. Cuckoo optimization algorithm parameters.

مقدار انتخابی (Selective value)	عنوان پارامترها (Parameters)
50	تعداد فاخته اولیه (Initial number of cuckoo)
2	حداقل تعداد تخم هر فاخته (Minimum egg of each Cuckoo)
5	حداکثر تعداد تخم هر فاخته (Maximum egg of each Cuckoo)
50	حداکثر تعداد فاخته‌های زنده (Maximum number of alive Cuckoo)
100	حداکثر تکرار (Maximum number of iteration)
3	تعداد گروه‌ها یا دسته‌ها (Number of groups or clusters)
$\pi/6$	$\omega$
$1*10^{-10}$	معیار همگرایی (The convergence criterion)

لازم به ذکر است تابع هدف و قیود در قالب یک فایل با فرمت نرم‌افزار *MATLAB* گنجانده شد تا الگوریتم بهینه‌سازی در روند اجرا بتواند آن را فراخوانی نماید.

تلفیق مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی: منظور از مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز آب‌های زیرزمینی، تلفیق مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی است. پس از ایجاد مدل شبیه‌ساز کمی و کیفی آبخوان در محیط نرم‌افزار *GMS*، برای دستیابی به هدف اصلی این پژوهش (تعیین دبی بهینه چاه‌ها جهت کمینه نمودن گرادیان غلظت *EC* در سطح آبخوان)، نیاز به تلفیق مدل شبیه‌ساز با الگوریتم بهینه‌ساز (فاخته) می‌باشد. با توجه به این‌که نرم‌افزار *GMS* تنها یک رابط گرافیکی بین کاربر و مدل‌های شبیه‌سازی آبخوان (*MODFLOW* و *MT3DMS*) بوده و منبع باز نمی‌باشد، امکان تلفیق مدل شبیه‌ساز و بهینه‌ساز وجود نداشت. بنابراین

تابع هدف و قیود مسأله بهینه‌سازی: تابع هدف و قیود مسأله بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف و به الگوریتم بهینه‌سازی وارد گردید:

$$MIN (MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{c} - c_i|}{n}) \quad (6)$$

Sub. to.

$$\begin{cases} (Q_{\min})_i < Q_i < (Q_{\max})_i \\ \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{demand} \end{cases}$$

که در آن،  $n$  تعداد چاه‌های منتخب (چاه‌های پتانسیل)،  $c_i$  غلظت موجود در محل هر چاه،  $\bar{c}$  میانگین غلظت در چاه‌های منتخب،  $Q_i$  متغیر تصمیم (دبی پمپاژ)،  $Q_{\min}$  و  $Q_{\max}$  دبی حداقل و حداکثر هر چاه و  $Q_{demand}$  نیاز آبی کل دشت.

مبنای کمی از خطای قابل قبول باشد که این مقدار، دامنه‌ای را برای توقف واسنجی در اختیار می‌گذارد. در مدل‌سازی آب زیرزمینی تفاوت بین بارهای هیدرولیکی اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده را تا حدود یک متر (معیار واسنجی) می‌توان تحمل کرد.

پس از تهیه مدل عددی جریان، مدل اجرا شد و واسنجی هدایت هیدرولیکی در حالت ماندگار و آبدهی ویژه در حالت غیرماندگار برای یک سال به روش‌های استوکستیک و سعی و خطا انجام گرفت. تغییرات هدایت هیدرولیکی با متوسط ۲۵ متر بر روز و در محدوده ۳ تا ۶۰ متر بر روز و مقدار آبدهی ویژه در محدوده ۰/۰۲ تا ۰/۱۷ و با متوسط ۰/۰۶ به‌دست آمد. بیش‌ترین مقدار هدایت هیدرولیکی در غرب محدوده مطالعاتی (خروجی آبخوان) مشاهده شد.

برای ارزیابی نتایج واسنجی از امکانات نرم‌افزار *GMS* مانند میله رنگی<sup>۱</sup>، خطای میانگین<sup>۲</sup>، خطای میانگین مطلق<sup>۳</sup>، جذر میانگین مربعات خطاها<sup>۴</sup>، استفاده شد. ناگفته نماند در بیش‌تر پیرومترها خطای باقی‌مانده کم و دقت نتایج بیش‌تر از معیار واسنجی است.

بعد از واسنجی مدل در حالت ناپایدار، مدل نیازمند صحت‌سنجی است تا بتوان به آن اطمینان کرد. در صورتی که مدل با دقت مناسبی واسنجی شده باشد، چنان‌چه تحت تنش‌های مختلف غیر از تنش‌های دوره واسنجی قرار گیرد باید نتایج قابل‌قبولی را ارائه کند. برای این منظور، مدل برای یک دوره یک‌ساله (مهر ۹۰ تا شهریور ۹۱) با تنش‌های ماهانه صحت‌سنجی شد. مقادیر معیارهای خطا در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۲ نشان داده شده است که نشانگر دقت نسبتاً قابل‌قبول شبیه‌سازی آبخوان می‌باشد.

برنامه‌ای در محیط برنامه‌نویسی *MATLAB* نوشته شد که توانایی اجرای مدل‌های *MODFLOW* و *MT3DMS* را داشت. با توجه به منبع باز بودن کد مربوطه، امکان تلفیق الگوریتم بهینه‌ساز و مدل‌های شبیه‌ساز کمی و کیفی به وجود آمد. در نتیجه برای آماده‌سازی مدل شبیه‌ساز مذکور، همه اطلاعات شبیه‌سازی مورد استفاده در نرم‌افزار *GMS* پس از واسنجی، به محیط کد نوشته شده انتقال یافت. در نهایت با ترکیب مدل شبیه‌ساز و الگوریتم بهینه‌سازی (*COA*)، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز حاصل گردید.

پس از تهیه مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز، برای دستیابی به جواب مطلوب باید تغییراتی در آن اعمال می‌شد، اولاً طول دوره شبیه‌سازی مدل اصلی یک سال است و این مدت برای پدیدار شدن تغییرات زیاد کیفی کوتاه است. بنابراین طول دوره شبیه‌سازی به پنج سال شامل ۶۰ دوره تنش یک‌ماهه افزایش یافت تا اثر تغییر دبی برداشت بر تغییرات کیفی محسوس‌تر گردد. ثانیاً تعداد چاه‌های بهره‌برداری در مدل اولیه ۱۹۰ حلقه بود که اگر قرار باشد دبی همه آن‌ها بهینه شود، تعداد متغیرهای تصمیم (دبی مربوط به هر چاه) مسأله بهینه‌سازی بسیار افزایش یافته و بنابراین دستیابی به جواب مطلوب دور از انتظار می‌گردید. در نتیجه تعداد ۱۰ چاه دارای پراکندگی مناسب در سطح آبخوان، به‌عنوان چاه پتانسیل در نظر گرفته شد، به‌طوری‌که مجموع دبی برداشتی آن‌ها بتواند نیاز آبی کل دشت را تامین نماید.

### نتایج و بحث

**واسنجی مدل جریان و انتقال:** واسنجی عبارت است از فرآیند پیدا کردن مجموعه‌ای از شرایط مرزی، تنش‌ها و پارامترهای هیدروژئولوژیک به‌طوری‌که نتایج به‌دست آمده از مدل به‌صورت بسیار نزدیکی بر مقادیر مشاهداتی در صحرا برآزش پیدا کند (کرسیک، ۱۹۹۷). هر مدل پیش از واسنجی باید دارای یک

- 1- Color Bar
- 2- Mean Error (ME)
- 3- Mean Absolute Error (MAE)
- 4- Root Mean Squared Error (RMSE)

جدول ۲- مقادیر معیارهای خطا در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل جریان.

**Table 2. Values of error evaluating criteria of flow model during calibration and validation periods.**

<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	
1.252	0.908	0.042	مرحله واسنجی (Calibration period)
2.124	1.453	1.039	مرحله صحت‌سنجی (Validation period)

۴۰ تا ۱۰۰ متر و با متوسط ۶۲ متر تغییر نمود و نیز نسبت ضریب پخشیدگی عرضی به طولی برابر با ۰/۱ حاصل شد. در بیشتر چاه‌های مشاهداتی کیفی خطای باقی‌مانده کم و دقت نتایج بیشتر از هدف واسنجی است (جدول ۳).

پس از تهیه مدل عددی انتقال، مدل اجرا و واسنجی ضریب پخشیدگی طولی، نسبت ضریب پخشیدگی عرضی به طولی و تخلخل برای دوره شبیه‌سازی به روش سعی و خطا انجام گرفت. بر اساس نتایج واسنجی، میزان تخلخل در محدوده ۰/۳ تا ۰/۴۵ و با متوسط ۰/۴ و ضریب پخشیدگی طولی در محدوده

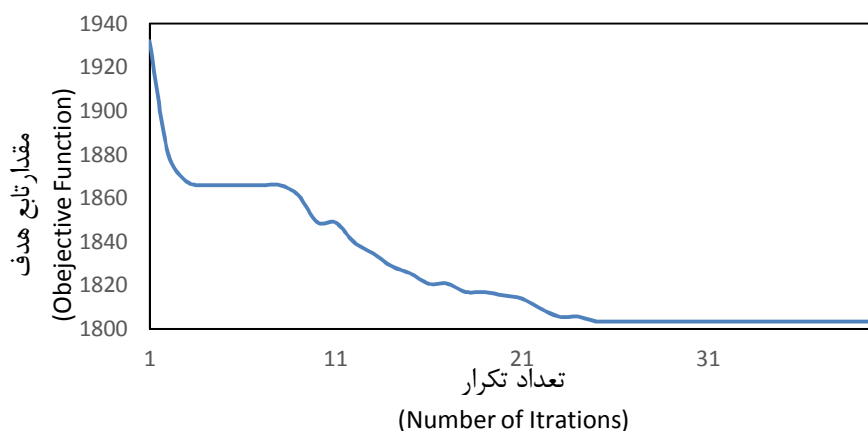
جدول ۳- مقادیر معیارهای خطا در مرحله واسنجی مدل انتقال.

**Table 3. Values of error evaluating criteria of transformation model during calibration period.**

<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>ME</i>	
28.27	21.38	10.78	مرحله واسنجی (Calibration period)

اجرای آن حاصل شد. روند همگرایی در شکل ۵ نشان داده شده است.

پس از تهیه مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز، مدل به تعداد ۱۵۰۰ بار اجرا و همگرایی پس از ۱۰۰۰ بار



شکل ۵- روند همگرایی مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز.

**Figure 5. The convergence process of simulation-optimization model.**

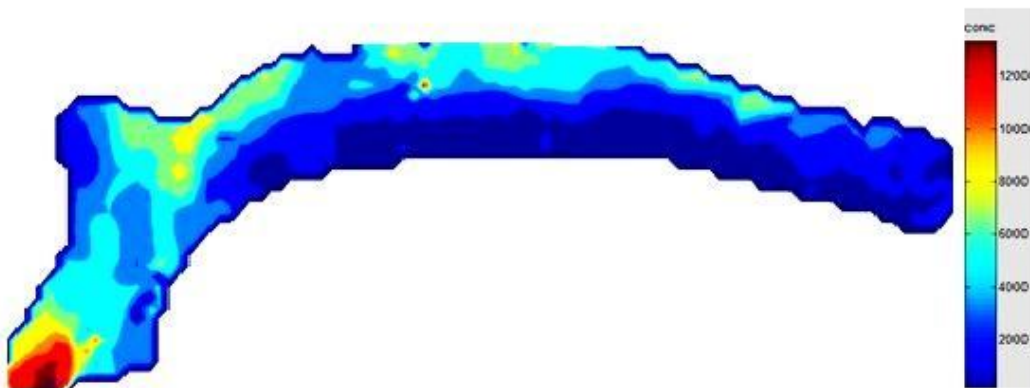
سیاست برداشت بهینه، به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

همچنین مقادیر سطح ایستابی و غلظت  $EC$  در سطح آبخوان در پایان دوره شبیه‌سازی با اعمال



شکل ۶- سطح ایستابی با اعمال سیاست برداشت بهینه در پایان دوره شبیه‌سازی.

Figure 6. Groundwater level at the end of simulating period with applying optimal policy discharge.



شکل ۷- غلظت  $EC$  با اعمال سیاست برداشت بهینه در پایان دوره شبیه‌سازی.

Figure 7.  $EC$  concentration level at the end of simulating period with applying optimal policy discharge.

گرادیان غلظت آلاینده در سطح آبخوان گردد. این نتیجه منطبق با نتایج پژوهش مشابه انجام شده توسط آبایی و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد. ایشان در پژوهش خود با استفاده از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و نرم‌افزار شبیه‌ساز آب‌های زیرزمینی *Visual MODFLOW* الگوی بهره‌برداری بهینه از آبخوان را تهیه و در یک آبخوان فرضی برای تعدیل گرادیان غلظت یک آلاینده فرضی مورد استفاده قرار دادند.

مقدار تابع هدف (میانگین قدرمطلق اختلاف غلظت‌های محاسباتی در محل چاه‌ها) بر اساس دبی‌های بهینه در انتهای دوره شبیه‌سازی برابر ۱۸۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر محاسبه گردید که این مقدار بر اساس شبیه‌سازی مدل برای پنج سال آینده، در صورت نادیده گرفتن دبی‌های بهینه (ادامه روند برداشت کنونی) برابر ۲۰۵۵ میکروموس بر سانتی‌متر خواهد گردید. بنابراین ملاحظه می‌گردد، اعمال الگوی بهره‌برداری مناسب می‌تواند منجر به کاهش

به‌استثنای چاه شماره ۸، مقادیر غلظت برای سایر چاه‌ها کاهش چشم‌گیری داشت. در حالی‌که معمولاً انتظار می‌رود با برداشت از آبخوان در درازمدت، غلظت افزایش یابد. بنابراین می‌توان دریافت که اعمال سیاست برداشت ارائه شده، علاوه بر تعدیل گرادیان غلظت، در کاهش مقادیر غلظت *EC* آبخوان نیز مؤثر است.

مقادیر دبی بهینه برای ۱۰ چاه مورد نظر در جدول ۴ آورده شده است. ملاحظه می‌گردد که مقادیر دبی بهینه برای چاه‌های شماره دو و شش برابر صفر حاصل شده و بنابراین هشت چاه از میان ده چاه پتانسیل برگزیده شد. علاوه بر این با مقایسه مقادیر غلظت *EC* اولیه و غلظت بهینه در انتهای دوره شبیه‌سازی برای هر یک از چاه‌ها، مشاهده شد

جدول ۴- موقعیت چاه‌های پتانسیل به همراه مقادیر دبی برداشت بهینه، غلظت اولیه و نهایی پس از ۵ سال برداشت.

**Table 4. Location of potential wells, optimal discharge and initial and final concentration of EC after 5 years.**

دبی بهینه برداشت optimal discharge (m <sup>3</sup> /day)	میزان تغییر غلظت <i>EC</i> (Change the concentration of EC) (%)	غلظت <i>EC</i> پس از ۵ سال برداشت (Final concentration of EC after 5 years) ( $\mu\text{mho/cm}$ )	غلظت اولیه <i>EC</i> (Initial concentration of EC) ( $\mu\text{mho/cm}$ )	<i>UTM</i> (Y)	<i>UTM</i> (X)	شماره چاه (Wells number)
27261	-44	1364	2432	3636250	713750	1
0.00	-4	1920	2000	3638250	706250	2
30000	-53	825	1750	3638750	699250	3
26000	-35	3270	5000	3640250	625250	4
30000	-41	3800	6400	3640750	690250	5
0.00	-42	870	1500	3638250	688750	6
30000	-45	2110	3800	3637750	682750	7
23400	+55	5270	3400	3632250	677250	8
30000	-7	5485	5900	3636750	676250	9
6000	-5	7290	7700	3628750	674250	10

محیط برنامه‌نویسی *MATLAB* نوشته شد. با توجه به منبع باز بودن برنامه شبیه‌سازی، الگوریتم بهینه‌سازی فاخته با مدل شبیه‌سازی تلفیق گردید و مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی ارائه شد. مدل شبیه‌سازی- بهینه‌سازی برای یک دوره پنج‌ساله اجرا گردید. نتایج نشان داد اختلاف غلظت *EC* در چاه‌های منتخب، پس از اجرای سیاست برداشت بهینه ارائه شده نسبت به حالت اولیه، به مقدار ۲۵۰ واحد (۱۲ درصد) کاهش داشته و تا حدودی گرادیان غلظت *EC* در سطح آبخوان تعدیل گردید. با مقایسه مقادیر غلظت *EC* اولیه و غلظت بهینه در انتهای دوره شبیه‌سازی،

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا مدل شبیه‌سازی جریان و انتقال آب‌های زیرزمینی در لایه آبدار آزاد دشت بیرجند در استان خراسان جنوبی برای سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ با استفاده از نرم‌افزار *GMS7.1* تهیه گردید. پس از واسنجی مدل در دو حالت ماندگار و غیرماندگار، صحت‌سنجی مدل انجام و براساس نتایج به‌دست آمده از صحت‌سنجی، مشاهده گردید که مدل تهیه شده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است و تفاوت اندکی بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه شده توسط مدل وجود داشت. جهت شبیه‌سازی جریان و انتقال، برنامه‌ای در

مشاهده شد مقادیر غلظت در محل چاه‌ها کاهش چشم‌گیری دارد. بنابراین می‌توان گفت که اعمال سیاست برداشت ارائه شده، علاوه بر تعدیل گرادیان غلظت، در کاهش مقادیر غلظت *EC* آبخوان نیز مؤثر است. در نهایت با توجه به کارایی الگوریتم هوشمند فاخته در این پژوهش و عدم استفاده از آن در مسائل بهینه‌سازی و مدیریت منابع آب، به‌کارگیری آن در این حوضه توصیه می‌گردد.

### منابع

1. Abaei, A., Ghaheri, A., and Saeedi, M. 2011. Optimal Aquifer Pumping Policy to Reduce Contaminant Concentration. *J. Water Wastewater*. 22: 80. 132-138. (In Persian)
2. Abouzari Khouei, N., and Hatamlou, A. 2014. Application of Cuckoo Optimization Algorithm in Different Optimization Problems. National Conference on Computer Engineering and IT Management. Tehran, Iran. (In Persian)
3. Anderson, M.P. 1979. Using Models to Simulate the Movement of Contaminants through Groundwater Flow Systems. *Critical Reviews in Environmental Controls*. 9: 2. 97-156.
4. Anderson, M.P., and Woessner, W.W. 1992. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press Inc. 381p.
5. Ansari, M.S., Shamsai, A., and Massah, B.A. 2011. Groundwater Level Modeling in Sefiddasht by GMS Model. Second National Conference on Applied Research in Water Resources. Zanjan, Iran. (In Persian)
6. Benjakul, R. 2010. Simulating Dioxane Transport in a Heterogeneous Glacial Aquifer System (Michigan) Using Publicly Available Models and Data. M.Sc. Thesis. Michigan Technological University. 66p.
7. Chiang, W., and Kinzelbach, W. 2001. *Processing Modflow a Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Springer Verlag, Berlin.
8. Chitsazan, M., and Saatsaz, M. 2005. Application of Mathematical Model MODFLOW on Water Resources Management Options of Ramhormoz Plain. *J. Irrig. Sci. Engin.* 14: 1-15. (In Persian)
9. De Wiest, R.J.M. 1965. *Geohydrology*. First Edition. John Wiley and Sons Inc, New York. 366p.
10. Etebari, B., and Yaghob Zadeh, M. 2008. Importance of the Conceptual Models in Developed Of Mathematical Model in Aquifers (Case Study: Tabriz Plain). Fifth National Conference on Engineering Sciences and Watershed. Gorgan, Iran. (In Persian)
11. Ghochanian, H.E. 2012. Groundwater Resources Assessment and Planning of Birjand Plain Using WEAP-MODFLOW. M.Sc. Thesis. Department of Water Engineering, University of Birjand, 117p. (In Persian)
12. Ghoochian, M., Etebari, B., and Akbarpour, A. 2013. Integrating Groundwater Management with WEAP and MODFLOW Models (Case Study: Birjand Plain, East of Iran). MODFLOW and More 2013: Translating Science Into Practice Conference, Colorado.
13. Hoseini Tabatabaei, M.R., and Salari, A.A. 2013. Application of Cuckoo Optimization Algorithm in Frame Structures Optimization. 7<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering, Zahedan, Iran. (In Persian)
14. Kholgi, M. 2003. *Mathematical Models Workshop of Groundwater Pollution From Theory to Application*. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran. (In Persian)
15. Kresic, N. 1997. *Quantitative Solution in Hydrology and Groundwater Modeling*. CRC Press LLC. 115p.
16. Maliki, R., Karami, G.H., Dolati Ardejani, F. and Hoseini, H. 2011. Optimization of Hydrodynamic Coefficients of Shahroud Plain by Using GMS6.5. Fourth Conference of Water Resources Management. Tehran, Iran. (In Persian)

17. Mohtasham, M., Dehghani, A.A., Akbarpour, A., Meftah Halghi, M., and Etebari, B. 2011. Groundwater Level Determination by Using GMS Model (Case Study: Birjand Aquifer). Fourth Conference of Water Resources Management. Tehran, Iran. (In Persian)
18. Nejati Jahromi, Z., Chitsazan, M., and Mirzaii, S.Y. 2009. Effects of Drought of 2007-2008 Year on Aghili Plain by Using Finite Difference Mathematical Model in GMS6.5 Environment. First International Conference on Water Resources Management. Shahrood, Iran. (In Persian)
19. Nikfar, S. 2011. Management of Urban Aquifers in Order to Nitrate Pollution Control (Case Study: Karaj City). M.Sc. Thesis. Department of Water Engineering, University of Birjand. 120p. (In Persian)
20. Prickett, T.A. 1975. Modeling Techniques for Groundwater Evaluation. J. Adv. Hydrosoci. 10: 1-143.
21. Rajabioun, R. 2011. Cuckoo Optimization Algorithm. J. Appl. Soft Comp. 11: 8. 5508-5518.
22. Shamsaei, A. 1998. Hydraulic Flow in Porous Media, Vol (2), Groundwater Engineering. Amirkabir University of Technology, 560p. (In Persian)
23. Zheng, C., and Bennett, G.D. 2002. Applied Contaminant Transport Modeling. Second Edition. John Wiley and Sons Inc, United States. 366p.
24. Zheng, C., and Patrick, W. 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide. Contract Report SERDP-99-1. 220p.





Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(5), 2017*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Presetting a Simulation-Optimization Quantitative and Qualitative Model Operation of Aquifer in Order to Adjust Pollutant Concentrations Using Cuckoo Algorithm**

**\*H. Saedi<sup>1</sup>, A. Akbarpour<sup>2</sup>, A. Baghvand<sup>3</sup>, M.H. Niksokhan<sup>4</sup> and S. Sadeghi Tabas<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Student, Dept. of Environment Engineering, University of Tehran, <sup>2</sup>Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Birjand, <sup>3</sup>Associate Prof., Dept. of Environment Engineering, University of Tehran, <sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of Environment Engineering, University of Tehran, <sup>5</sup>M.Sc. Student, Dept. of Water Resources Engineering, University of Birjand

Received: 04/26/2014; Accepted: 02/28/2015

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Population growth and agricultural development and industrialization causes the increasing need to use groundwater resources. Hence, the quality of these resources has particular importance. In some aquifers, due to the heterogeneous distribution of pollution resources, excessive centralized harvest in particular areas or gender difference in the aquifer, the water quality in different areas is highly variable. In these cases, if there is no way to eliminate contaminant, the concentration of pollutant can be uniformed by optimal policy operation in the aquifer. The aim of this study was presenting a Simulation-Optimization model of groundwater in order to determine the optimum discharge of operation wells so as the gradient of pollutant concentration was minimized and water needs to be provided. On the other hand, the discharge of wells extractions can be determined in a way that water quality, as a specific qualitative parameter, is same in all over the aquifer.

**Materials and Methods:** The simulation qualitative and quantitative model of aquifer was produced in GMS environment. In order to achieve the main aim of this study (determining the optimum discharge of wells in order to minimize the gradient of EC concentration in aquifer), it is required to combine the simulation model with optimization algorithm (cuckoo). Since GMS is only the graphical interface between user and aquifer simulation models (such as MODFLOW and MT3DMS) and it is not open source code so a code was written in the Matlab environment that could run MODFLOW and MT3DMS models. Since that code was open source, it was possible to combine optimization algorithm and qualitative and quantitative model. Finally simulation optimization model was produced by combining simulation model and optimization algorithm (COA).

**Results:** After providing simulation- optimization model, model was executed in a 5 year period and 1500 times, the mentioned model was converged after 1000 times executing. The amount of objective function (the mean of absolute difference of computed concentration in the wells) was computed according to the optimum discharges at the end of simulation period that was 1800 micro mohs/cm that this amount will be 2055 micro mohs/cm for the next 5 year according to the model simulations if optimum discharges (continuing the current extraction trend) is overlooked.

**Conclusion:** Results show that if optimum extraction policy was applied compared to overlooking that, the gradient of EC concentration in selected wells decreases 12 percent in addition to this, by comparing the amount of initial concentration of EC and the amount of concentration after simulation, it was obvious that these amounts was decreased significantly in the wells so it can be said that applying the policy of extraction not only normalized the concentration gradient but also was effective in reducing EC concentration.

**Keywords:** Groundwater, Concentration gradient, Electric conductivity, Intelligent optimization Approaches

---

\* Corresponding Author; Email: hamid.saeedi85@hotmail.com

