



## Estimation of Hydraulic Parameters of Confined Aquifers Using Genetic Algorithm Optimization Technique

A. Asghari Moghaddam<sup>1</sup>, V. Norani<sup>2</sup>  
and M. Kord<sup>3</sup>

### Abstract

Sustainable development and optimized exploitation of the groundwater resources depend on accurate estimation of aquifer hydraulic parameters. Different methods exist for estimation of hydraulic parameters of aquifers. One of the classic methods for estimating these parameters is analyzing the pumping test data by graphical methods. Nowadays, probabilistic optimization methods, i.e. simulated annealing and genetic algorithm (GA), based on evolution rules, are taken into attention due to their high abilities. In this article, the efficiency of the GA is assessed in estimating confined aquifer parameters. For this purpose, hydraulic parameters of four confined aquifers are calculated by using GA and they are compared with results of graphical methods. The results indicate that intelligent GA technique is efficient, reliable and powerful method for estimation of confined aquifers hydraulic parameters.

**Keywords:** Hydraulic parameters, Pumping test, Optimization, Genetic algorithm, Graphical method.

## تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار بوسیله تکنیک بهینه سازی الگوریتم ژنتیک

اصغر اصغری مقدم<sup>۱</sup>، وحید نورانی<sup>۲</sup>  
و مهدی کرد<sup>۳</sup>

### چکیده

توسعه پایدار و بهره برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی بستگی به صحت تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان‌ها دارد. روشهای متفاوتی برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان وجود دارد. یکی از روشهای کلاسیک جهت تخمین این پارامترها آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ با روشهای گرافیکی است. امروزه روشهای بهینه‌سازی احتمالاتی از قبیل شبیه سازی آنیله، الگوریتم ژنتیک (GA) و... که برپایه قوانین تکامل بیولوژیکی استوار هستند، بواسطه قابلیت‌های فراوان با اقبال مجامع تحقیقاتی روبرو شده اند. در این مقاله کارایی روش GA در تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار از داده‌های آزمایش پمپاژ مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور با استفاده از GA پارامترهای چهار سفره تحت فشار برآورد و با نتایج حاصل از روشهای گرافیکی مقایسه گردیده است. مقایسه نتایج حاصله نشان می‌دهند که تکنیک هوشمند GA روشی کارا، قابل اعتماد و قوی جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره تحت فشار می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** پارامترهای هیدرولیکی، آزمایش پمپاژ، بهینه سازی، الگوریتم ژنتیک، روش گرافیکی.

1- Associate professor, geology department, University of Tabriz

2- Assistant professor, water engineering department, University of Tabriz

3- MSc. student, geology department, University of Tabriz

۱- دانشیار گروه زمین شناسی دانشگاه تبریز.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران آب دانشگاه تبریز.

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی دانشگاه تبریز.

۱- مقدمه

Zheng and Wang (1996) از ترکیب Tabu search و

Annealing برای تعیین ساختار پارامترهای سفره استفاده کردند.

مسائل مدیریت آب زیرزمینی در طبیعت غیر خطی و غیر محدب<sup>۸</sup> هستند (Sun, 1994). از طرفی GA یک روش متعارف و خوب برای بهینه سازی معادلات شدیداً غیر خطی و پیچیده (دارای بی نهایت نقاط مینیمم و ماکزیمم) می باشد (Davis, 1991). لذا در دو دهه اخیر محققین متعددی از GA برای حل مسائل مدیریتی منابع آب سطحی و زیرزمینی استفاده کرده اند که بیشتر این تحقیقات نیز در خصوص آبهای سطحی بوده است.

از تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد الگوریتم ژنتیک در آب زیرزمینی می توان موارد زیر را ذکر کرد :

Tai Kuoa et al. (2006) از ترکیب GA و ANN جهت مدیریت کیفی یک مخزن آبی در تایوان استفاده کردند. Prasad and Rastogi (2001) ترکیب GA با مدل اجزای محدود شبیه سازی جریان را برای تخمین هدایت هیدرولیکی (K)، قابلیت انتقال (T) و تغذیه سفره بکار بردند. Cheng et al. (2000) از GA برای بدست آوردن مقدار پمپاژ بهینه به شرط عدم نفوذ آب شور به چاه پمپاژ در سفره های ساحلی استفاده کردند.

Gentry et al. (2001) ترکیبی از GA و تکنیک مدل سازی عددی برای تعیین توزیع مکانی و جریان آب زیرزمینی در سفره های نشتی را ارائه کردند. Gentry et al. (2003) کارایی GA را در بررسی نشت در لایه های نیمه نفوذپذیر مورد بررسی قرار دادند. Giacobbe et al. (2002) از GA برای تخمین پارامترهای مدل انتقال آلودگی آب زیر زمینی استفاده کردند.

برتری ویژه GA غیر حساس بودن به حدسهای اولیه پارامترها برای بهینه سازی است (Samuel, 2002). لذا GA به درستی می تواند نقاط مینیمم کلی<sup>۹</sup> و یا نزدیک اپتیمم را برای مسائل بهینه سازی غیر خطی به دست آورد. در این مقاله کارایی GA به وسیله تخمین پارامترهای چهار آبخوان تحت فشار از طریق داده های آزمایش پمپاژ زمان - افت محک زده شده است.

آب زیرزمینی منبعی با ارزش جهت تامین آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی است. با افزایش جمعیت و تقاضای روز افزون آب، مدیریت صحیح منابع آب یک نیاز فوری و حیاتی محسوب می شود. مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی معمولاً براساس داده های مدل های مختلف اعمال می شود که صحت و دقت این مدلها نیاز به برآوردی دقیق از پارامترهای هیدرولیکی سفره دارد. روشهای متفاوتی برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی سفره ها وجود دارد، یکی از روشهای استاندارد، جهت تعیین آنها استفاده از داده های آزمایشات پمپاژ می باشد. داده های آزمایش پمپاژ زمان - افت بوسیله مدل های تحلیلی غیرخطی بر اساس نوع سفره و با استفاده از روشهای گرافیکی که بصورت روش کلاسیک در نظر گرفته شده اند آنالیز می شوند (Theis, 1935; Neuman, 1972). در روش گرافیکی انطباق داده ها به منحنی تیپ اغلب تقریبی بوده و انطباق کامل به دلیل اختلاف زیاد بین فرضیات در نظر گرفته شده در تئوری و شرایط واقعی میسر نیست. بعلاوه اینکه روشهای گرافیکی خیلی پر زحمت، زمان بر و سلیقه ای هستند.

مساله تخمین پارامترهای سفره با کمک مدل عددی که با استفاده از اطلاعات اولیه و مشاهداتی عمل می کند، اغلب بصورت مسأله معکوس<sup>۲</sup> انجام می گیرد. Cooley (1977)، Dagan and Rubin (1988)، Yeh (1986)، Carrera and Neuman (1986a) و Abbaspour et al. (1997) از جمله افرادی هستند که در این زمینه فعالیت داشته اند.

یکی از الگوریتم هایی که در تخمین پارامترهای سفره بکار برده شده است ANN<sup>۳</sup> می باشد. از مهمترین کارهای انجام گرفته بوسیله این الگوریتم می توان به روش ارایه شده توسط Samani et al. (2007) اشاره نمود. Lin and Cheng (2006) توانستند با استفاده از روش PCA<sup>۴</sup> الگوریتم آنها را ارتقا دهند. از افراد دیگری که در این زمینه کار کرده اند می توان از Garcia and Shigidi (2006)، Balkhair (2002) و Aziz and Wong (1992) نام برد.

Ayvaz (2007) از ترکیب الگوریتم های FCM<sup>۵</sup> و HS<sup>۶</sup> و Ayvaz et al. (2007) از ترکیب الگوریتم های KFCM<sup>۷</sup> و GA برای تعیین پارامترهای سفره و منطقه بندی مربوط به آنها با استفاده از سطوح پیرومتری ارائه نمودند.

## ۲- بحث و بررسی

### ۲-۱- مدل ریاضی آنالیز داده‌های آزمایش پمپاژ

برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار مدل‌های ریاضی مختلفی وجود دارد. معروفترین آنها معادله Theis می‌باشد که بصورت زیر بیان می‌شود (Freeze and Cherry, 1979):

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

که

$$u = \frac{r^2 \cdot S}{4Tt} \quad (2)$$

قسمت انتگرالی فرمول (۱) به عنوان تابع چاه یا  $W(u)$  شناخته می‌شود. بنابراین فرمول بالا را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3)$$

$s(r, t)$  مقدار افت اندازه گیری شده در پیرومتری در فاصله  $r$  از چاه پمپاژ و زمان  $t$  مقدار برداشت ثابت از چاه پمپاژ،  $T$  مقدار قابلیت انتقال سفره،  $W(u)$  تابع چاه،  $S$  ضریب ذخیره (بدون بعد) و  $t$  زمان سپری شده از شروع پمپاژ می‌باشد.

مقدار  $W(u)$  به ازای  $u$ های مختلف با استفاده از بسط سری تیلور<sup>۱۰</sup> (برای  $0 < u \leq 1$ ) و کوادراتور گوس-لاگر<sup>۱۱</sup> (برای  $u > 1$ ) محاسبه می‌شود (Tseng and Lee, 1998).

### ۲-۲- الگوریتم ژنتیک (GA)

GA شاخه‌ای از هوش مصنوعی است که بر اساس تئوری تکامل مطرح شده است. نظریه محاسبات تکاملی توسط Rechenberg در سال ۱۹۶۰ معرفی شد و این نظریه توسط محققان دیگر توسعه یافت تا در سال ۱۹۷۵ منجر به اختراع الگوریتم‌های ژنتیک توسط Holland و دانشجویانش گردید (Goldberg, 1989). روشهای بهینه سازی احتمالاتی مانند جستجوی تصادفی ساده، الگوریتم شبیه سازی آنیله و الگوریتم‌های تکاملی تقریباً روی همه نوع فضا طراحی و بدون هیچ محدودیتی می‌توانند روی متغیرهای آن کار کنند. روشهای بهینه یابی احتمالاتی که برپایه قوانین تکامل بیولوژیکی استوار هستند بواسطه قابلیت‌های فراوان با اقبال مجامع تحقیقاتی روبرو شده‌اند. در بین روشهای این گروه، GA بعنوان یک ابزار

قدرتمند جستجو بیشتر از سایر روشها مورد توجه قرار گرفته است و کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده است.

### ۲-۳- نحوه عملکرد GA

الگوریتم‌های ژنتیک با مجموعه‌های اولیه از راه حل‌های تصادفی که جمعیت نامیده می‌شود کار خود را آغاز می‌کنند. هر فرد در این جمعیت، کروموزوم نامیده می‌شود که نماینده راه حلی برای مسأله مورد نظر است. معمولاً یک کروموزوم رشته ای از بیت‌های باینری (۰،۱) است. هر کد یا عدد در این رشته یک ژن نامیده می‌شود. برای ایجاد کروموزومها باید اعداد را بصورت باینری کدگذاری<sup>۱۲</sup> کنیم.

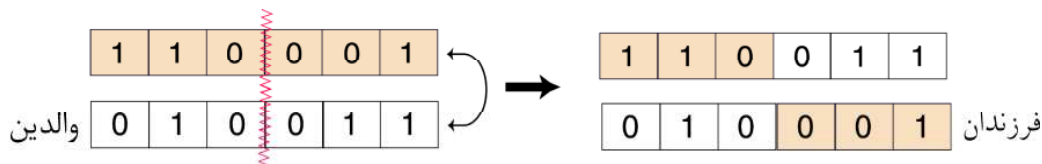
در هر نسل<sup>۱۳</sup> توسط پردازش جمعیت و بر اساس میزان برازش<sup>۱۴</sup> آنها، مجموعه‌ای از تخمین پارامترها در دامنه مسأله بدست می‌آید. این جمعیت به کمک عملگرهایی که شبیه سازی شده عملگرهای ژنتیکی هستند، طی نسل‌های متمادی تکامل می‌یابد. هدف از این کار، دقیقاً همانند سازش پذیری طبیعی ژنتیکی، ایجاد جمعیت‌ها یا نسلهایی از جمعیت قبلی است که نسبت به آنها با محیط تطابق بهتری دارند.

برای این منظور در ابتدا یک مجموعه تصادفی از رشته‌ها (جمعیت اولیه) برای رسیدن به نقطه بهینه مقدار دهی می‌شوند و سپس مقدار تابع هدف که معیاری برای سنجش کارایی و تطبیق رشته است، محاسبه می‌شود. حال اگر معیار رسیدن به حالت بهینه برآورده نشده باشد، تولید نسل جدید آغاز می‌شود. به این صورت که اعضای جمعیت بر طبق میزان برازش انتخاب شده و برای تولید نسل جدید<sup>۱۵</sup> انتخاب می‌شوند (Mitsuo and Cheng, 1997).

در ادامه، روند ایجاد فرزندان در نسل‌های بعدی از سه قانون کلی تبعیت می‌کند:

الف) فرزندان نخبه<sup>۱۶</sup>: ژنهایی که دارای بهترین برازندگی باشند برای نسل بعد انتخاب می‌شوند.

ب) فرزندان حاصل از ترکیب<sup>۱۷</sup>: ترکیب ایجاد یک یا چند کروموزوم از والدین دارای بهترین برازندگی است. شکل خیلی عمومی ترکیب، شامل دو والد است که ۲ فرزند را ایجاد می‌کنند. بدین گونه که یک نقطه بصورت تصادفی روی رشته کروموزومی انتخاب شده، بعد ناحیه‌های چپ یا راست آن نقطه، در رشته کروموزومی جایجا می‌شود (Haupt and Haupt, 2004). در شکل (۱) نمونه‌ای از ترکیب با یک نقطه انتخابی بصورت شماتیک نمایش داده شده است.



شکل ۱- ترکیب یک نقطه ای

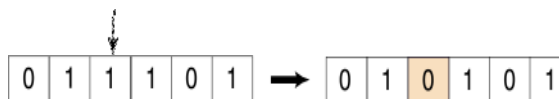
و ... باشد، باعث توقف الگوریتم شود. فلوجارت عملکرد GA را می توان مطابق شکل (۳) نشان داد.

#### ۲-۴- تابع آزمون<sup>۲۰</sup>

برای تعیین اینکه آیا یک الگوریتم بهینه سازی درست کار می کند یا خیر، انواع مختلفی از توابع آزمون را می توان بکار برد. در مقاله حاضر از تابع سینک<sup>۲۱</sup> بصورت معادله (۴) بعنوان تابع آزمون استفاده شده است (Haupt and Haupt, 2004). تابع سینک علاوه بر مینیمم های محلی دارای یک مینیمم کلی می باشد. شکل (۴) تابع سینک و مینیمم های محلی و مینیمم کلی را نشان می دهد.

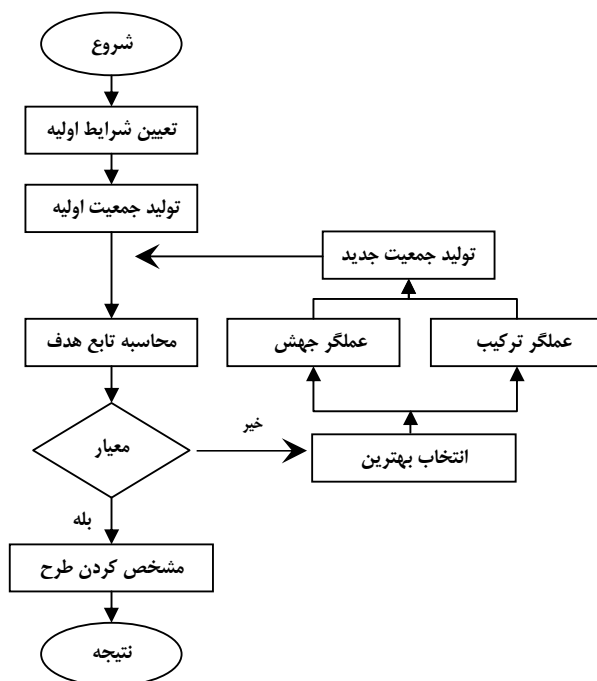
$$f(x, y) = I - \left[ \frac{\sin(x^2 + y^2)^{0.5}}{(x^2 + y^2)^{1.5}} \right] - 15(x, y) \quad (4)$$

ج) فرزندان حاصل از جهش<sup>۱۸</sup>: جهش یکی از مهمترین فرایندهایی است که اجازه می دهد ژنهایی جدید در کروموزومها ایجاد شود، بدین صورت که فرزندان را به وسیله ایجاد تغییر در ژنها بصورت تصادفی ایجاد می کند. شکل (۲) عمل جهش را نشان می دهد.

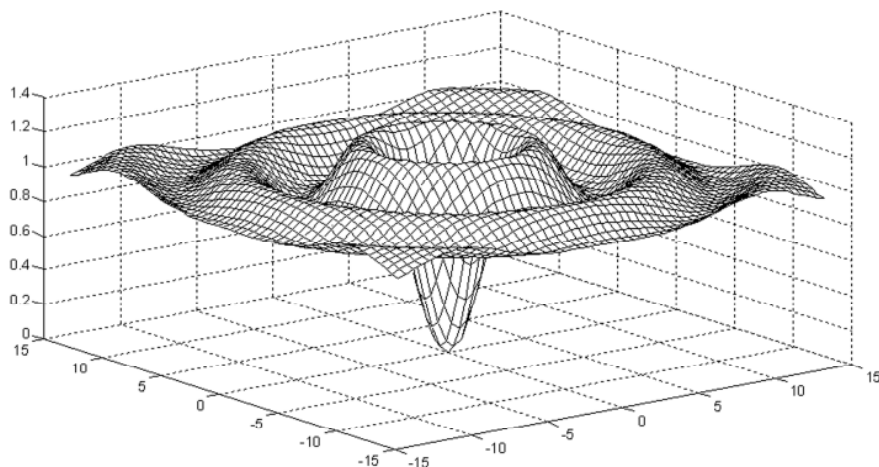


شکل ۲- ایجاد جهش در یک رشته

از نسل دوم به بعد پس از ایجاد فرزندان با نسبت های تعریف شده و معین، با استفاده از الگوریتم های انتخاب<sup>۱۹</sup> فرزندان نسل جدید گزینش و با قرار دادن این فرزندان در تابع هدف و امتیاز دهی به آنها الگوریتم تکرار شده تا وقتی که معیارهای پایان الگوریتم که می تواند تعداد نسل، زمان، عدم بهبود در میزان تابع هدف در چند نسل متوالی



شکل ۳- فلوجارت عمومی GA



شکل ۴- تابع سینک

جدول (۱) مقادیر تئوری و محاسباتی توسط GA، برای نقطه مینیمم کلی را نمایش می دهد.

جدول (۱). مقادیر تئوری و محاسباتی نقطه مینیمم کلی تابع

سینک

	x	y	f(x,y)
مقدار تئوری	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
مقدار محاسباتی	$10^{-11} \times -3/59$	$10^{-8} \times 4/315$	$10^{-6} \times 3/33$

## ۲-۵- فرمول بندی تابع هدف<sup>۲۲</sup>

همانطور که در قسمت قبلی شرح داده شد تابع هدف، تابعی است که قصد کمینه کردن آن را داریم. اگر افت مشاهداتی را در پیرومتری به فاصله  $r$  از چاه پمپاژ و زمان  $t$  نسبت به شروع پمپاژ با  $s_o$  نشان دهیم و  $s_c$  افت محاسباتی با استفاده از مدل ریاضی Theis در همان فاصله و زمان باشد، تابع خطا را می توانیم بصورت زیر نمایش دهیم:

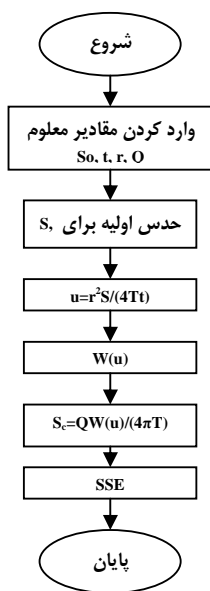
$$E = s_o - s_c \quad (5)$$

حال برای افتهای مختلف در فاصلههای زمانی مختلف می توان مجموع خطای مربعات<sup>۲۳</sup> (SSE) را محاسبه کرد:

$$SSE = \sum_{k=1}^n (s_{o_k} - s_{c_k})^2 \quad (6)$$

$$f(x) = SSE \quad (7)$$

که  $n$  تعداد افتهای مشاهداتی و  $f(x)$  تابع هدف می باشد.



شکل (۵). فلوجارت محاسبه تابع هدف

## ۲-۶- اعمال قیود

الگوریتم های ژنتیک، روشهای مستقیمی هستند که تنها با مسائل بدون قید سر و کار دارند. رایجترین روش برای تبدیل مسأله مقید به یک مسأله بدون قید استفاده از روش تابع جریمه<sup>۲۴</sup> می باشد. روابط زیر نحوه استفاده از تابع جریمه را نشان می دهند:

$$f_p(x) = f(x) + \alpha P(x) \quad (8)$$

$$g(x)^L \leq g(x) \leq g(x)^U \quad (9)$$

### ۳- تحلیل نتایج

در این تحقیق با استفاده از روش GA پارامترهای هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره برای چهار سفره تحت فشار، از داده‌های صحرائی آزمایش پمپاژ زمان-افت محاسبه گردید. این داده‌ها مربوط به چهار چاه مشاهده‌ای A<sub>۱</sub> (Todd and Mays, 2005)، A<sub>۲</sub> (Kruseman and De Ridder, 1983)، A<sub>۳</sub> (Raghunath, 1987) و A<sub>۴</sub> (Batu, 1998) می‌باشند. داده‌های آزمایش پمپاژ زمان-افت، فاصله چاه‌های مشاهده‌ای از چاه‌های پمپاژ و مقادیر دبی پمپاژ ثابت آنها در جدول (۲) آورده شده است.

$$P(x) = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{|g_i(x)|}{|g_i(x)|^a} - I \right)^+ \right]^2 \quad (10)$$

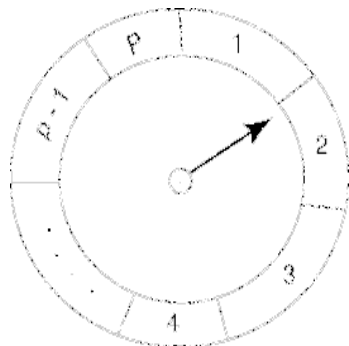
$$\left( \frac{|g_i(x)|}{|g_i(x)|^a} - I \right)^+ = \max \left( \frac{|g_i(x)|}{|g_i(x)|^a} - I, 0 \right) \quad (11)$$

$$\begin{cases} g_i(x)^a = g_i(x)^L & g_i(x) < 0 \\ g_i(x)^a = g_i(x)^U & g_i(x) \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

$f_p(x)$  تابع هدف با اعمال جریمه؛  $f(x)$  تابع هدف؛  $\alpha$  ضریب بزرگنمایی تابع جریمه؛ رابطه قید مسأله؛  $p(x)$  تابع جریمه؛  $g_i(x)$  پارامتر  $i$  ام؛  $g(x)^U$  مرز<sup>۲۵</sup> بالا و  $g(x)^L$  مرز پایین پارامتر می‌باشند (Adeli and Cheng, 1993; Chen and Chen, 1997).

جدول ۲- داده‌های زمان-افت چهار مجموعه مورد نظر

A <sub>۴</sub>				A <sub>۳</sub>		A <sub>۲</sub>				A <sub>۱</sub>	
Q = ۵۴۰ m <sup>۳</sup> /d r = ۷۵m				Q = ۲۲۷۰ m <sup>۳</sup> /d r = ۶۰m		Q = ۷۸۸ m <sup>۳</sup> /d r = ۹۰m				Q = ۲۵۰۰ m <sup>۳</sup> /d r = ۶۰m	
t (min)	s(m)	t (min)	s(m)	t (min)	s(m)	t (min)	s(m)	t (min)	s(m)	t (min)	s(m)
۳	-/۰.۲۲	۳۶۰	-/۰.۷۹۵	۱	-/۰.۲۰۱	۱/۵	-/۰.۱۵	۱۸۰	-/۰.۵۶۹	۱	-/۰.۲۰
۴	-/۰.۳	۵۰۰	-/۰.۸۳	۲	-/۰.۳۰۲	۲	-/۰.۲۱	۲۴۸	-/۰.۵۹۳	۱/۵	-/۰.۲۷
۴/۳	-/۰.۲۳	۶۱۰	-/۰.۸۶	۳	-/۰.۳۶۹	۲/۱۶	-/۰.۲۳	۳۰۱	-/۰.۶۱۴	۲	-/۰.۳۰
۵/۳	-/۰.۶۲	۷۳۰	-/۰.۸۹	۴	-/۰.۴۱۵	۲/۶۶	-/۰.۴۴	۳۶۳	-/۰.۶۳۶	۲/۵	-/۰.۳۴
۶	-/۰.۷۶	۸۵۰	-/۰.۹۲	۶	-/۰.۴۸۵	۳	-/۰.۵۴	۴۲۲	-/۰.۶۵۷	۳	-/۰.۳۷
۷	-/۱.۰۵	۱۱۰۰	-/۰.۹۵	۸	-/۰.۵۳۴	۳/۵	-/۰.۷۵	۵۴۲	-/۰.۶۷۹	۴	-/۰.۴۱
۸	-/۱.۲۶			۱۰	-/۰.۵۶۷	۴	-/۰.۹۰	۶۰۲	-/۰.۶۸۸	۵	-/۰.۴۵
۸/۷	-/۱.۴۶			۱۴	-/۰.۶۳۵	۴/۳۳	-/۱.۰۴	۶۸۰	-/۰.۷۰۱	۶	-/۰.۴۸
۱۱	-/۱.۸۶			۱۸	-/۰.۶۷	۵/۵	-/۱.۳۳	۷۸۵	-/۰.۷۱۸	۸	-/۰.۵۳
۱۲	-/۲.۱۴			۲۴	-/۰.۷۲	۶	-/۱.۵۳	۸۴۵	-/۰.۷۱۶	۱۰	-/۰.۵۷
۱۵	-/۲.۵			۳۰	-/۰.۷۶	۷/۵	-/۱.۷۸			۱۲	-/۰.۶۰
۱۸	-/۲.۸۸			۴۰	-/۰.۸۰۸	۹	-/۲.۰۶			۱۴	-/۰.۶۳
۲۷	-/۳.۵			۵۰	-/۰.۸۴۸	۱۳	-/۲.۵۰			۱۸	-/۰.۶۷
۳۱	-/۳.۸۵			۶۰	-/۰.۸۷۹	۱۵	-/۲.۷۵			۲۴	-/۰.۷۲
۳۵	-/۴.۲۷			۸۰	-/۰.۹۲۷	۱۸	-/۳.۰۵			۳۰	-/۰.۷۶
۵۰	-/۴.۸۷			۱۰۰	-/۰.۹۶۵	۲۵	-/۳.۴۸			۴۰	-/۰.۸۱
۶۰	-/۵.۱			۱۲۰	-/۱.۰	۳۰	-/۳.۶۴			۵۰	-/۰.۸۵
۸۰	-/۵.۶۶			۱۵۰	-/۱.۰۴۲	۴۰	-/۴.۰۴			۶۰	-/۰.۹۰
۱۰۶	-/۶.۰۲			۱۸۰	-/۱.۰۷	۵۳	-/۴.۲۹			۸۰	-/۰.۹۳
۱۲۰	-/۶.۲۲			۲۱۰	-/۱.۱	۶۰	-/۴.۴۴			۱۰۰	-/۰.۹۶
۱۵۰	-/۶.۵۴			۲۴۰	-/۱.۱۱۲	۷۵	-/۴.۶۷			۱۲۰	-/۱.۰۰
۱۸۰	-/۶.۹					۹۰	-/۴.۹۴			۱۵۰	-/۱.۰۴
۲۲۰	-/۷.۱					۱۰۵	-/۵.۰۷			۱۸۰	-/۱.۰۷
۲۴۵	-/۷.۴					۱۲۰	-/۵.۲۸			۲۱۰	-/۱.۱۰
۳۰۰	-/۷.۷۴					۱۵۰	-/۵.۵۰			۲۴۰	-/۱.۱۲



شکل ۷- چرخ رولت

چرخ رولت نمودار دایره ای است که محیط این دایره با مقادیر درصد احتمال برازش رشته‌ها نشانه گذاری شده است. مقدار مناسب بودن جمعیت پس از  $n$  بار چرخیدن چرخ بدست خواهد آمد، در هر زمان یک مورد از رشته‌ها توسط اشاره گر چرخ رولت انتخاب می شود (Rajasekaran and Vijayalakshmi Pai, 2005).

مقادیر احتمال  $P_i$  از تابع احتمال زیر بدست می آید:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j} \quad (14)$$

که  $n$  اندازه جمعیت و  $F_i$  مقدار برازش رشته  $i$  ام است. نوع ترکیب بکار رفته فرزندان را تولید خواهد کرد که میانگین حسابی وزنی دو والد هستند. جهش اعمال شده دارای دو مرحله است: در مرحله اول بخشی از کروموزوم انتخاب شده، که هر عضو آن دارای یک احتمال جهش است، این مقدار  $0.1$  در نظر گرفته شده است. در مرحله دوم الگوریتم هر یک از عضوهای انتخابی را بوسیله یک عدد تصادفی انتخابی از محدوده آن عضو، جایگزین می کند.

تعداد نخبه، تعداد کروموزومهایی که در هر جمعیت بعنوان نخبه انتخاب می شود را کنترل می کند. این کروموزومها که بر مبنای بهترین عملکرد انتخاب می شوند، بصورت کاملاً یکسان از جمعیت والد به جمعیت فرزندان منتقل می شود. در اینجا در هر مرحله ۸ عدد از کل ۵۰ کروموزومها بطور مستقیم به مرحله بعد منتقل می شود.

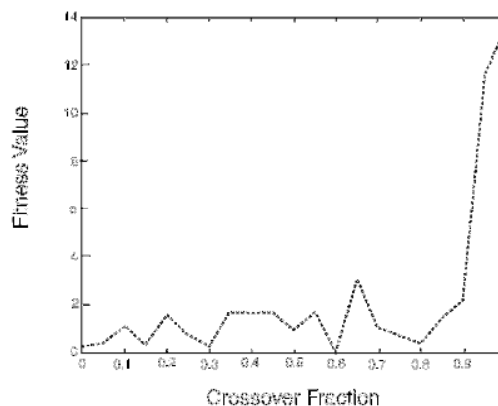
با در نظر گرفتن عدد  $0.6$  بعنوان کسر تولید فرزندان ترکیبی، نسبت  $0.6$  از ۴۲ کروموزوم باقی مانده را فرزندان ترکیبی و مابقی را فرزندان جهش یافته تشکیل خواهند داد. با این حساب تعداد فرزندان ترکیبی  $(0.6 \times 42 = 25.2)$  عدد و تعداد فرزندان جهش یافته ۱۷ عدد خواهد بود. جدول (۳) آرایش الگوریتم ژنتیک بکار گرفته شده را نشان می دهد:

اجرای موفق GA به گزینه‌های آن مانند اندازه جمعیت<sup>۲۶</sup>، ترکیب، جهش، تعداد نسل‌ها، نحوه انتخاب، نسبت بین تولید فرزندان و غیره بستگی دارد. بهترین حالت برای هر یک از آنها را می توان توسط آزمون و خطا، با ثابت نگهداشتن گزینه‌های دیگر بدست آورد. بعنوان مثال برای بدست آوردن کسر تولید فرزندان ترکیبی<sup>۲۷</sup> یعنی بهترین نسبت فرزندان حاصل از ترکیب به دیگر فرزندان، می توان الگوریتم را برای نسبت‌های مختلف از ۰ تا ۱ اجرا کرد و با توجه به مقدار برازش‌ها بهترین نسبت را بدست آورد (شکل ۶).

در این مقاله شاخص خاتمه الگوریتم<sup>۲۸</sup> (GASC) با استفاده از معادله (۱۳) تعیین شده است. در اینجا الگوریتم تا زمانی که تغییرات تجمعی مقادیر برازشها بر روی تعداد ۵۰ نسل کمتر از  $10^{-6}$  باشد، اجرا خواهد شد و یا به عبارت دیگر عدم بهبود در میزان تابع هدف در طی ۵۰ نسل سبب خاتمه الگوریتم خواهد شد.

$$GASC = \frac{\sum_{k=1+(n-50)}^n (fitness_{k-1} - fitness_k)}{50} \quad N \geq n \geq 50$$

$N$  حداکثر نسل‌های در نظر گرفته شده و  $n$  شماره هریک از نسل‌های تولید شده بعد از پنجاهمین نسل می باشد. وظیفه گزینش رشته‌ها برای تولید جمعیتی جدید را عملگر انتخاب به عهده دارد. این عملگر به کیفیت کروموزوم که متعلق به یک جمعیت خاص است وابسته است و بیانگر آن است که هر کروموزوم چه تعداد فرزند بوجود آورد. بدین منظور در این مقاله از روش چرخ رولت<sup>۲۹</sup> استفاده گردیده است (شکل ۷).



شکل ۶- برازش نسبت‌های مختلف تولید فرزندان حاصل از ترکیب

جدول ۳- آرایش الگوریتم ژنتیک بکار گرفته شده

شاخص خاتمه الگوریتم	حد بالای S	حد پایین S	تعداد نسل‌ها	کسر تولید فرزندان ترکیبی	ترکیب	جهش	تعداد نخبه	تابع انتخاب	اندازه جمعیت
GASC<10 <sup>-۶</sup>	۱/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰	۰/۶	دو نقطه ای	یکنواخت	۸	چرخ رولت	۵۰

جدول ۴- مقادیر محاسباتی T، S، SSE و R<sup>۲</sup>

مجموعه داده	روش بکار گرفته شده	T (m <sup>۲</sup> /min)	S	SSE (m <sup>۲</sup> )	R <sup>۲</sup>
A <sub>۱</sub>	گرافیکی	۰/۷۷۹	۲/۰۳ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۰۱۰	۰/۹۹۹۹۲
	ژنتیک الگوریتم	۰/۷۹۳۱۶	۱/۹۰۰ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۷/۱۹۳ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۹۹۹۹۴۵
A <sub>۲</sub>	گرافیکی	۰/۳۳۲	۲/۱۶ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۲۲۵	۰/۹۹۶۶۰۶
	ژنتیک الگوریتم	۰/۳۴۷۹۸	۲/۰۰ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۱۸۲	۰/۹۹۷۲۴۹
A <sub>۳</sub>	گرافیکی	۱/۰۴	۲/۴ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۸/۷۲۶۵ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۹۹۹۹۲۸
	ژنتیک الگوریتم	۱/۰۲۸۱۳	۲/۵ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۱/۷۸۹ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۹۹۹۹۸۵
A <sub>۴</sub>	گرافیکی	۰/۱۲۹۲	۴/۳۴ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۱۴۲۹	۰/۹۸۹۳
	ژنتیک الگوریتم	۰/۱۶۴۲	۳/۰۲۱۷ × ۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۰۲۷۲	۰/۹۹۷۰

مجموعه‌ها توسط GA بیشتر بوده است. شکل (۹) روند مینیمم سازی تابع هدف را در طی ۱۰۰ نسل برای مجموعه داده‌های A<sub>۱</sub>، A<sub>۲</sub>، A<sub>۳</sub> و A<sub>۴</sub> نشان می‌دهد.

#### ۵- نتیجه گیری

در تهیه مدل ریاضی آبخوانها و مدیریت صحیح آنها بی شک تعیین پارامترهای هیدرولیکی در چندین نقطه از سفره با روش گرافیکی ضروری است. مقایسه پارامترهای بدست آمده از چهار مجموعه داده آزمایش پمپاژ زمان-افت توسط GA و روش گرافیکی نشان می‌دهد که تکنیک هوشمند GA یک روش کارا، قابل اعتماد و قوی جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار می‌باشد.

عملکرد موفق GA به آرایش مختلف گزینه‌های آن بستگی دارد که بهترین آرایش ممکن را می‌توان توسط آزمون و خطا برای هر یک از گزینه‌ها و با ثابت نگهداشتن گزینه‌های دیگر بدست آورد. از آنجا که محاسبه پارامترها بصورت محاسباتی انجام می‌گیرد بنابراین تطابق بهتری بین نمودار حاصل از GA و داده‌های مشاهده‌ای دیده می‌شود. حدود استاندارد هر یک از پارامترها را می‌توان بصورت مرزهای مسأله در نظر گرفت و برای ایجاد جمعیت اولیه نیز از آنها استفاده کرد. بدین طریق راه حل‌های ایجاد شده به جواب مسأله نزدیک‌تر بوده و علاوه بر کاهش زمان محاسبه سبب عملکرد صحیح‌تر الگوریتم نیز، خواهد گردید.

#### ۴- کنترل عملکرد GA

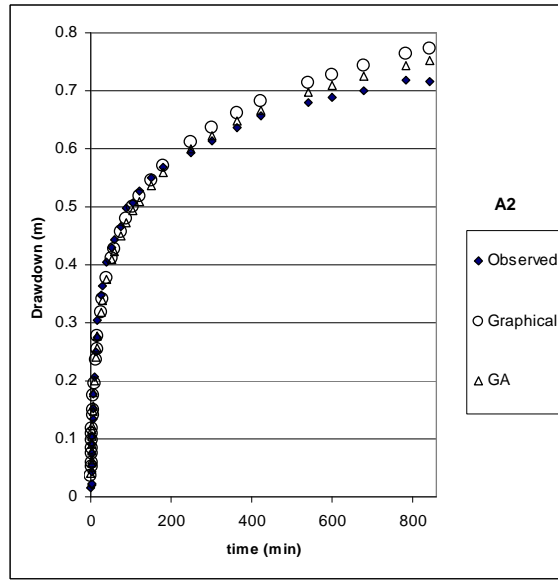
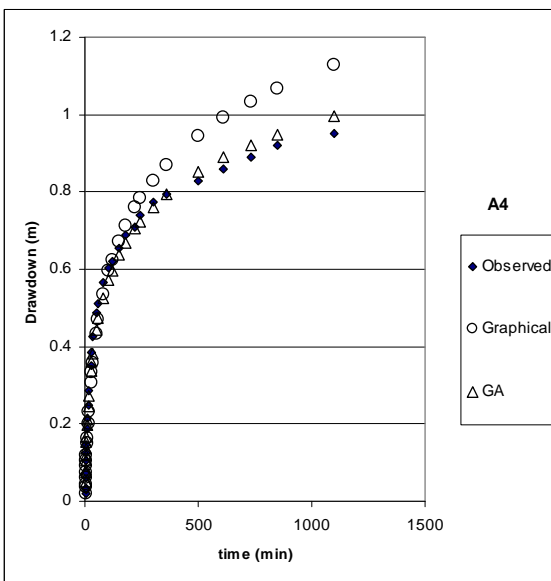
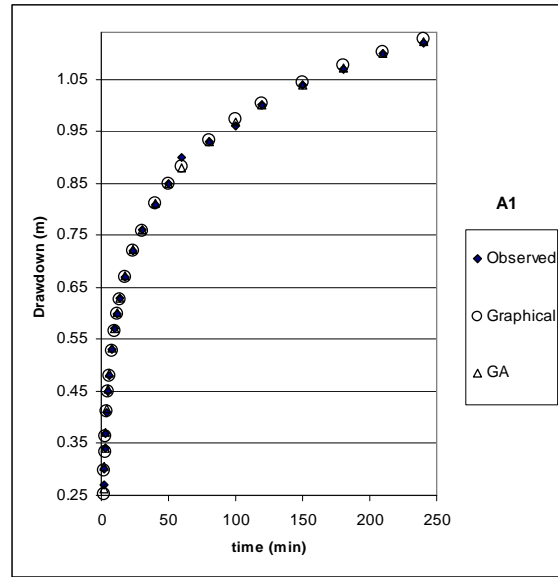
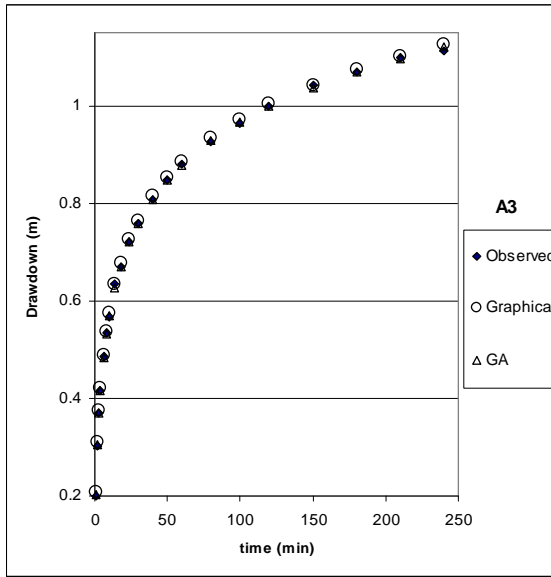
جهت سنجش کارایی تکنیک GA پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های تحت فشار از سه مجموعه داده‌های آزمایش پمپاژ زمان - افت توسط نرم افزار معروف Aquifer Test که بر مبنای روش گرافیکی می‌باشد، محاسبه شده است. مقادیر محاسباتی T، S، SSE و R<sup>۲</sup>، از هر دو روش در جدول (۴) آورده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum \left( y_i - \frac{\sum y_i}{n} \right)^2} \quad (15)$$

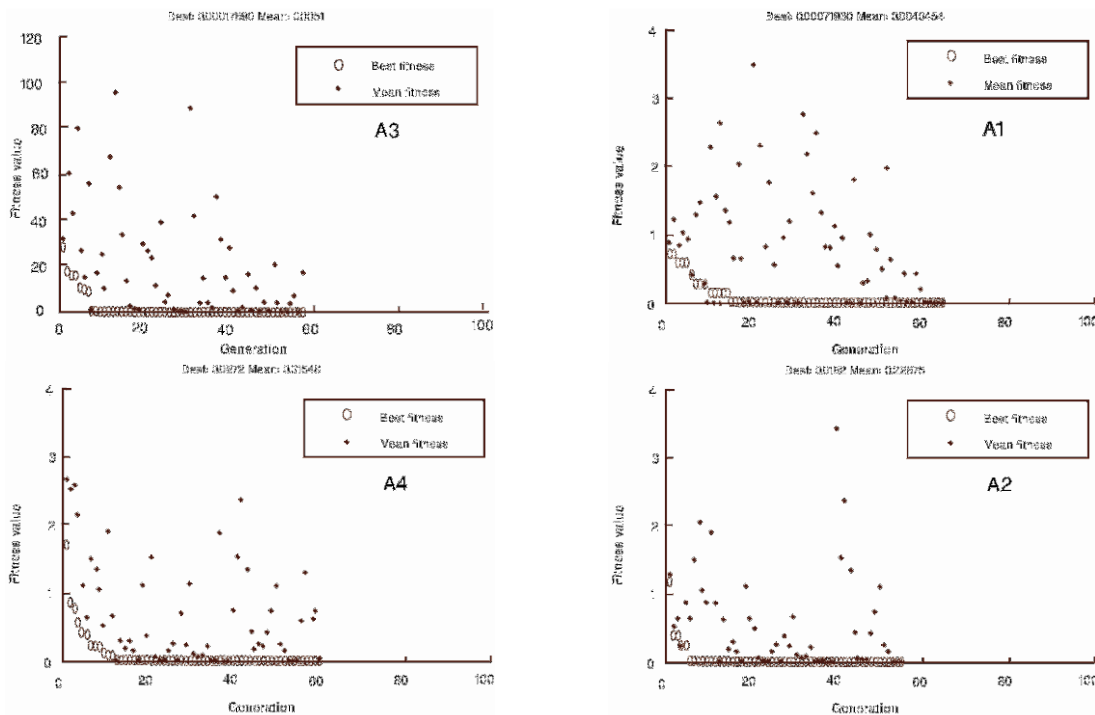
$y_i$  = داده‌های مشاهده‌ای،  $\hat{y}_i$  = داده‌های محاسباتی هستند (Daliakopoulos, 2005).

در شکل (۸) مقایسه بین منحنی زمان-افت صحرایی و منحنی‌های حاصل از پارامترهای تخمین زده شده با GA و روش گرافیکی برای سه مجموعه داده آورده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود منحنی‌های زمان - افت مربوط به GA نسبت به روش گرافیکی تطابق بیشتری با منحنی‌های زمان - افت مشاهده‌ای نشان می‌دهند، و دارای R<sup>۲</sup> بهتری هستند. به دلیل اینکه داده‌های استفاده شده، داده‌های تیبیک و برگرفته از کتب مرجع می‌باشند، دارای ضریب همبستگی بالایی برای هر دو روش گرافیکی و GA هستند. در این میان مجموعه A<sub>۲</sub> و A<sub>۴</sub> از ضریب همبستگی کمتری برخوردار است، که ارتقای ضریب همبستگی آن نسبت به دیگر





شکل ۸- منحنی زمان - افت مجموعه داده‌های A1، A2، A3 و A4 حاصل از روش گرافیکی و روش GA



شکل ۹- نمودار تغییرات بهترین جواب و میانگین جوابها در هر نسل، برای مجموعه داده‌های A1، A2، A3 و A4

پی‌نوشت‌ها

۶- مراجع

Abbaspour, K. C., van Genuchten, M. T., Schulin, R. and Schlappi, E. (1997), "A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters." *Water Resour. Res.*, 33(8): pp. 1879-1892.

Adeli, H. and Cheng, N. T. (1993), "Integrated genetic algorithm for optimization of truss structures." *J. aerospac. Eng.*, 6(4), pp. 315-328.

Ayvaz, T. M. (2007), "Simultaneous determination of aquifer parameters and zone structures with fuzzy c-means clustering and meta-heuristic harmony search algorithm." *Advances in Water Res.*, 30(11), pp. 2326-2338.

Ayvaz, T. M., Karahan, H. and Aral, M. M. (2007), "Aquifer parameter and zone structure estimation using kernel-based fuzzy c-means clustering and genetic algorithm." *J. Hydrol.*, 343( 3-4), pp. 240-253.

Aziz, A. R. A. and Wong, K.V. (1992), "A neural-network approach to the determination of aquifer parameters." *Ground Water*, 30 (2), pp. 164-166.

Balkhair, K.S. (2002), "Aquifer parameters determination for large diameter wells using neural network approach." *J. Hydrol.*, 265 (1-4), pp. 118-128.

- 1-Genetic Algorithm
- 2-Inverse Problem
- 3-Artificial Neural Network
- 4-principal Component Analysis
- 5-Fuzzy C-Means
- 6-Harmony Search
- 7-Kernel-based Fuzzy C-Means
- 8- Non-Convex
- 9-Global Minimum
- 10-Taylor Series
- 11-Gauss-Laguerre Quadrature
- 12-Encoding
- 13-Generation
- 14-Fitness
- 15-Offspring
- 16-Elite
- 17-Crossover or Mating
- 18-Mutation
- 19-Selection
- 20-Test Functions
- 21-Sink Function
- 22-Objective Function
- 23-Sum of Square Errors
- 24-Penalty Function
- 25-Bound
- 26-Population size
- 27-Crossover fraction
- 28-Genetic Algorithm Stop Criteria
- 29-Roulette Wheel

- Goldberg, D. E. (1989), *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- Haupt, R. L., Haupt, S.E. (2004), *Practical genetic algorithms*, John Wiley, 253p.
- Kruseman, G. P. and De Ridder, N. A. (1983), *Analysis and evaluation of pumping test data*, ILRT, Wageningen, Netherlands, 200p.
- Lin, G.F. and Chen, G.R. (2006), "An improved neural network approach to the determination of aquifer parameters." *J. Hydrol.*, 316 (1-4), pp. 281-289.
- Mitsuo, G. and Cheng, R. (1997), *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley & Sons, Inc.
- Newman, S.P. (1972), "Theory of flow in unconfined aquifers considering delay response of the water table." *Water Resour. Res.*, 8, pp. 1031-1045.
- Prasad, K. L. and Rastogi, A. K. (2001), "Estimating net aquifer recharge and zonal hydraulic conductivity values for Mahi Right Bank Canal project area, India by genetic algorithm." *J. Hydrol.*, 243, pp. 149-161.
- Raghunath, H. M. (1987), *Ground water*, Wiley Eastern Limited, 563p.
- Rajasekaran, S. and Vijayalakshmi Pai, G. A. (2005), *Neural networks, fuzzy logic, genetic algorithms*, Prentice-Hall of India, New Delhi, .
- Samani, N., Gohari-Moghadam, M. and Safavi, A. A. (2007), "A simple neural network model for the determination of aquifer parameters." *J. Hydrol.* 340 (1-2), pp. 1-11.
- Samuel, M. P. (2002), "Determination of aquifer and well parameters using genetic algorithm." *MTech thesis, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India.*
- Sun, N.-Z. (1994), *Inverse problems in groundwater modeling*, Kluwer Academic, Dordrecht, the Netherlands.
- Tai Kuoa, J., Yi Wanga, Y. and Seng Lungb, W. (2006), "A hybrid neural-genetic algorithm for reservoir water quality management." *Water Res.*, 40, pp. 1367-1376.
- Todd, D. K., Mays, L. W. (2005), *Groundwater hydrology*, Wiley, International edition, 636p.
- Tseng, P. H. and Lee, T. C. (1998), "Numerical evaluation of exponential integral: Theis well function approximation." *J. Hydrol.*, 205, pp. 38-51.
- Batu, V. (1998), *Aquifer hydraulics: a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*, John Wiley & Sons, inc., 728p.
- Carrera, J. and Neuman, S. P. (1986a), "Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information." *Water Resour. Res.*, 22(2): pp. 199-210.
- Chen, T. Y. and Chen, C. j. (1997), "Improvements of simple genetic algorithm in structural design." *International J. Numerical Meths. in Eng.*, 40, pp. 1323-1334.
- Cheng, A. H. D., Halhal, D., Naji, A. and Ouazar, D. (2000), "Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers." *Water Resour. Res.*, 36(8), pp. 2155-2165.
- Cooley, R. L. (1977), "A method of estimating parameters and assessing reliability for models of steady state ground water flow 1. Theory and numerical properties." *Water Resour. Res.*, 13(2): pp. 318-324.
- Dagan, G. and Rubin, Y. (1988), "Stochastic identification of recharge, transmissivity, and storativity in aquifer transient flow: A quasi-steady approach." *Water Resour. Res.*, 24(10): pp. 1698-1710.
- Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P. and Tsanis, I.K. (2005), "Groundwater level forecasting using artificial neural networks." *J. Hydrol.*, 309 (1-4), pp. 229-240.
- Davis, L. (1991), *A handbook of genetic algorithms*, Van Nostrand, Reinhold, New York.
- Freeze, A. R. and Cherry, J. A. (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 603p.
- Garcia, L. A. and Shigidi, A. (2006), "Using neural networks for parameter estimation in ground water." *J. Hydrol.*, 318, pp. 215-231.
- Gentry, R. W., Camp, C. V., and Anderson, J. L. (2001). "Use of GA to determine areas of accretion to semiconfined aquifer." *J. Hydraul. Eng.*, 127(9), pp. 738-746.
- Gentry, R. W., Larsen, D. and Ivey, S. (2003), "Efficacy of Genetic Algorithm to investigate Small Scale Aquitard Leakage." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 129, No. 7.
- Giacobbo, F., Marseguerra, M. and Zio, E. (2002), "Solving the inverse problem of parameter estimation by genetic algorithms: the case of a groundwater contaminant transport model." *Annals of Nuclear Energy*, 29 (8), pp. 967-981.

- annealing.” *Advances in Water Res.*, 19(4), pp. 215-224.
- Yeh, W. W. (1986), “Review of parameter identification procedures in groundwater hydrology: The inverse problem.” *Water Resour. Res.*, 22(2): pp. 95-108.
- Theis, C.V. (1935), “The relation between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage.” *Trans. Amer. Geophys. Union*, 2, pp. 519-524.
- Zheng, C. and Wang, P. (1996), “Parameter structure identification using tabu search and simulated

تاریخ دریافت مقاله: ۱۸ بهمن ۱۳۸۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۲۰ بهمن ۱۳۸۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۹ اسفند ۱۳۸۶