Archive of SID

تهیه الگوریتم بهره‌برداری بهینه از آبخوان به‌منظور تعدیل غلظت آلاینده‌ها

علی آبایی [۱] عباس قاهری [۲] محسن سعیدی [۳]

(دریافت ۸۸/۱۲/۲٤ پذیرش ۸۹/٤/۲)

چکیده

وجود منابع آلاینده آبهای زیرزمینی و توزیع نامتوازن آنها در سطح آبخوان باعث تفاوت محسوس غلظت در نقاط مختلف آبخوان می‌گردد. در صورت عدم امکان حذف منابع آلوده‌کننده می‌توان با برنامه بهینه بهره‌برداری، غلظت آلاینده‌ها را تا حد امکان در سطح آبخوان یکنواخت کرد. با استفاده از این برنامه برداشت بهینه، می‌توان محل چاه و دبی پمپاژ یک‌ساله تعیین نمود. به این منظور با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Visual MODFLOW (Ver.4.2)، بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک و ترکیب دو مدل با یکدیگر، الگوریتم بهره‌برداری بهینه تهیه و در یک آبخوان فرضی آزمایش شد. هدف از برنامه برداشت بهینه از آبخوان، کمینه کردن گرادیان غلظت در محدوده آبخوان با توجه به‌منظور کردن محدودیتهای نرخ برداشت و بیشینه غلظت بود.

واژه‌های کلیدی: آبهای زیرزمینی، آلاینده، الگوریتم ژنتیک، **Visual MODFLOW**

Optimal Aquifer Pumping Policy to Reduce Contaminant Concentration

Ali Abaei [1] *Abbas Ghaheri* [2] *Mohsen Saeedi* [3]

(Received March 12, 2010 Accepted June 23, 2010)

Abstract

Different sources of ground water contamination lead to non-uniform distribution of contaminant concentration in the aquifer. If elimination or containment of pollution sources was not possible, the distribution of contaminant concentrations could be modified in order to eliminate peak concentrations using optimal water pumping discharge plan. In the present investigation Visual MODFLOW model was used to simulate the flow and transport in a hypothetic aquifer. Genetic Algorithm (GA) also was applied to optimize the location and pumping flow rate of wells in order to reduce contaminants peak concentrations in aquifer.

Keywords: Groundwater, Pollution, Genetic Algorithm, Visual MODFLOW.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران (نویسنده مسئول) ۷۳۹۱۳۱۱٦ (۰۲۱)
ghaheri@iust.ac.ir

۳- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

1. M.Sc. of Environmental Eng., Dept. of Civil Eng., Iran University of Tech., Tehran
2. Assoc. Prof. of Water and Environment, Dept. of Civil Eng., Iran University of Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 73913116
ghaheri@iust.ac.ir
3. Assoc Prof. of Water and Environment, Dept. of Civil Eng., Iran University of Tech., Tehran

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

آبهای زیرزمینی یکی از منابع آبی بسیار مهم در جهان محسوب می‌شوند. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و توسعه شهرها نیاز به استفاده از این منابع زیرزمینی روز به روز بیشتر می‌شود. از طرف دیگر استفاده بیش از حد آبهای زیرزمینی و ورود آلاینده‌ها به این منابع از طریق چاههای فاضلاب، نشت لوله‌ها، نفوذ آبهای سطحی آلوده و غیره مشکلات فراوانی برای این منابع به‌وجود آورده است.

آلودگی آبهای زیرزمینی مشکل بزرگی است که به سرمایه‌گذاری‌های عظیمی برای اصلاح نیاز دارد. برای پاکسازی و اصلاح آبهای زیرزمینی آلوده، روشهای اصلاحی متعددی مانند پمپاژ و تصفیه و روشهای اصلاحی در محیط وجود دارد [۱]. همچنین امروزه مطالعات گسترده‌ای بر روی تئوری این روشها و معادلات حاکم و شبیه‌سازی رفتار آنها انجام شده است که برای نمونه می‌توان به کار صفوی و همکاران اشاره کرد [۲].آلودگی آبهای زیرزمینی اثرات اجتناب‌ناپذیری بر روی سلامت جامعه و محیط زیست دارد. از طرفی پاکسازی آبهای زیرزمینی نیاز به صرف زمان و هزینه‌های بسیاری دارد.

برای پیشگیری و رفع مشکلات یاد شده، بهترین روش جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به آبخوان و حذف منابع آلوده کننده است. اما انجام این عمل بسیار مشکل و در بسیاری از موارد حذف منابع آلوده کننده غیرممکن است. به این منظور با استفاده از پمپاژ آب از آبخوان در محدوده‌های مشخص می‌توان توزیع غلظت آلاینده را در سطح آبخوان یکنواخت کرد تا مانع افزایش غلظت آلودگی در نقاط تحت کنترل آبخوان و عبور از حد استاندارد شود. برای پمپاژ آب از آبخوان، استفاده از برنامه‌های بهینه بهره‌برداری که بیشترین تأثیر را بر روی آبخوان داشته باشد توصیه می‌شود. گرلیک و همکاران[1] دو روش برای رسیدن به حل بهینه توصیف کرده‌اند [۳]:

۱- ترکیب قضاوتهای مهندسی و فرایند تکراری سعی و خطا

۲- ترکیب روشهای شبیه‌سازی- بهینه‌یابی.

نقص روش اول، کمبود یک راه حل رسمی ریاضی برای رسیدن به طراحی هیدرولیکی بهینه است. از سال ۱۹۸۰ ترکیب مدل‌های شبیه‌سازی بهینه‌یابی برای مدیریت آبهای زیرزمینی افزایش پیدا کرده است. به‌عنوان مثال می‌توان به کارهای کای و همکاران[2] و تحقیق ژنگ[3] و ونگ[4] اشاره کرد [۴ و ۵]. همچنین مایر و همکاران[5] در سال ۲۰۰۲ خلاصه‌ای از روشهای بهینه‌سازی به‌کار رفته در مسائل پاکسازی آبهای زیرزمینی و فرمول‌بندی مسئله تهیه کرده‌اند [۶]. در این گونه مسائل، شبیه‌سازی معمولاً توسط مدل آبهای زیرزمینی موجود برای جریان و انتقال آلودگی است. استورمن و همکاران[6] در سال ۱۹۹۵ خلاصه‌ای از مدل‌های موجود را تهیه کرده‌اند [۷]. بهینه‌سازی با استفاده از روشهای رایج برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و الگوریتم‌های تکاملی انجام می‌شود [۸-۱۱].

با توجه به اینکه مسائل بهینه‌سازی در استراتژی پمپاژ برای جداسازی پلوم آلودگی، یک مسئله غیرمحدب و به‌شدت غیرخطی است، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مناسب است. یکی از این روشها الگوریتم ژنتیک[7] است. الگوریتم ژنتیک به‌طور موفقیت‌آمیزی برای طرحهای کاربردی مهندسی منابع آب استفاده شده است. آرال[8] و گان[9] در سال ۱۹۹۶ یک الگوریتم ژنتیک متفاوت را برای یک آبخوان فرضی ناهمگن و همسان به‌کار برده‌اند[۱۲]. ونگ و ژنگ در سال ۱۹۹۷ برنامه‌های جریان آب زیرزمینی و انتقال محلول (MODFLOW و MT3D) را با الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی ترکیب کردند و برای یک آبخوان فرضی به‌کار بردند [۱۳]. همچنین آنها در سال ۲۰۰۳ مدل MGO را برای مسائل بهینه‌سازی پاکسازی آبخوان تهیه کرده‌اند.

در تمام کارهای قبلی مدل‌های شبیه‌سازی بهینه‌یابی برای شبیه‌سازی آبخوان از مدل‌های موجود در این زمینه مثل MODFLOW و MT3D استفاده کرده‌اند. این برنامه‌ها تحت DOS بوده و به‌راحتی قابل ترکیب با مدل بهینه ساز هستند ولی ساختن مدل آبخوان‌های واقعی با آنها با توجه به اینکه ابزار گرافیکی ندارند قدری سخت و زمانبر هستند. در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی آبخوان از برنامه Visual MODFLOW(Ver.4.2) برای حل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی استفاده شد. در این نرم‌افزار ابزارهای گرافیکی آن به استفاده کننده این امکان را می‌دهند که به راحتی اطلاعات را وارد مدل کند. همچنین از الگوریتم ژنتیک به‌عنوان الگوریتم بهینه‌یاب برای رسیدن به اهداف مورد نظر استفاده شد. هدف از این تحقیق تهیه یک برنامه بهره‌برداری بهینه در جهت تعدیل توزیع غلظت آلاینده در آبخوان و خارج‌سازی آلودگی از نقاط پرتراکم آبخوان بود.

[1] Gorelick et al.
[2] Cai et al.
[3] Zheng
[4] Wang
[5] Mayer et al.
[6] Sturman et al.
[7] Genetic Algorithm (GA)
[8] Aral
[9] Guan

www.SID.ir

Archive of SID

۲- روش تحقیق

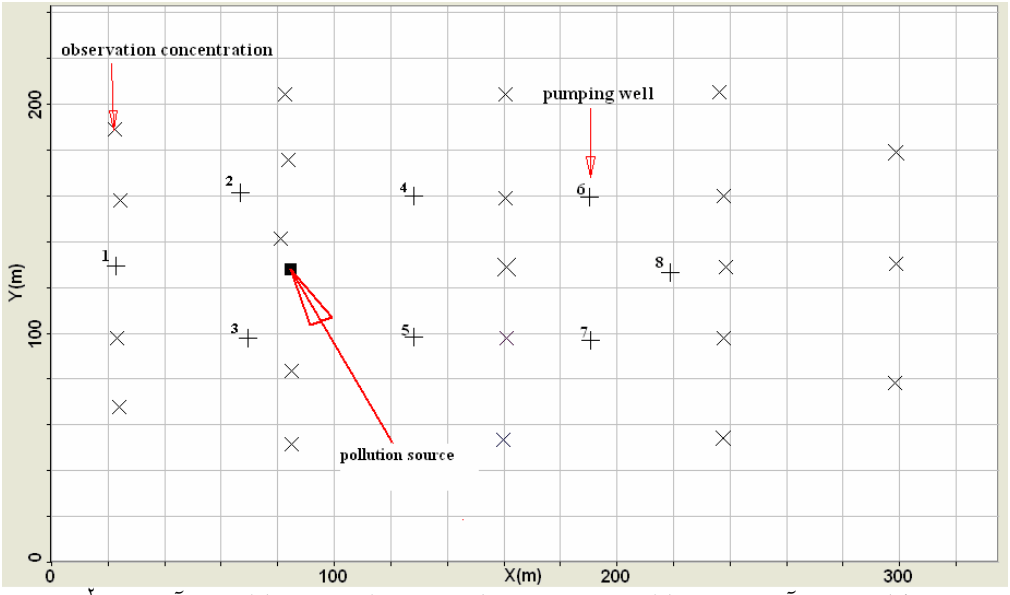
۲-۱- تشریح مدل شبیه‌ساز

حرکت، تجمع و انتقال آلودگی در آبهای زیرزمینی را می‌توان توسط مدل‌های محاسباتی موجود که بر پایه حل معادلات حاکم بر جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی هستند شبیه‌سازی کرد. در تحقیق حاضر از برنامه Visual MODFLOW (v.4.2) استفاده شد. این نرم افزار شامل یکی از کامل‌ترین و ساده‌ترین مدل‌های هیدرولیکی برای شبیه‌سازی جریان سه بعدی آب زیرزمینی، حرکت و انتقال آلاینده‌ها از هر نوع است [۱۴]. مهم‌ترین بخش‌های برنامه Visual MODFLOW شامل MODFLOW (مدل جریانی) و MT3D , MT3DMS (مدل‌های انتقال آلاینده) است. این نرم‌افزار تمام قابلیت‌های MODFLOW و MT3D به‌علاوه ابزارهای گرافیکی لازم برای انتقال اطلاعات به مدل را دارد [۱۵].

۲-۲- توصیف سیستم آبهای زیرزمینی

برای تهیه برنامه بهینه بهره‌برداری با هدف تعدیل غلظت آلاینده‌ها از یک آبخوان فرضی، بسته و همسان با ابعاد ۳۳۵ متر در ۲۴۳ متر نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد. این آبخوان با استفاده از یک فضای شبکه‌بندی یکنواخت ۲۲ در ۱۶، بدون جریان مرزی در شمال و جنوب آبخوان و جریان پایدار در جهت غرب به شرق با ارتفاع پیزومتری ۳۵ متر در قسمت غرب و ۳۸ متر در قسمت شرق مدل شد. کف آبخوان دارای شیب یک درصد از غرب به شرق بود. بقیه مشخصات آبخوان در جدول ۱ آمده است. آلودگی توسط یک منبع نقطه‌ای از تری کلرواتیلن[1] با غلظت ۱۰۰میلی‌گرم در لیتر و حرکت آن تحت جریان پایدار برای یک دوره ۳۰ ساله ایجاد شد (شکل ۱). نتایج آلودگی در شکل ۲ نشان داده شده است.

[1] Three Chloro Ethylene (TCE)



شکل ۱- نمای آبخوان فرضی،(+) محل چاههای پمپاژ(۱، ۲، ۳، ....۸)، مشاهداتی(×) و منبع آلوده کننده[2]

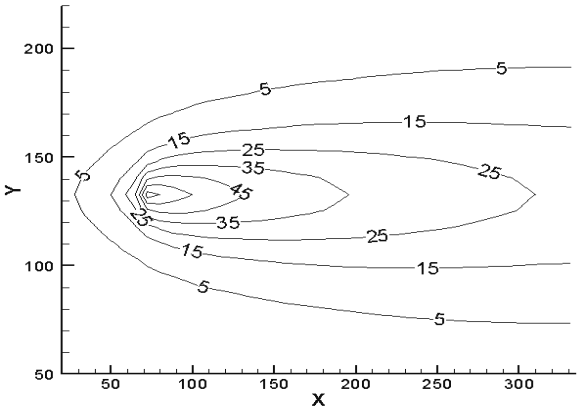
جدول ۱- مشخصات آبخوان

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
هدایت هیدرولیکی K (متر بر ثانیه)	$۶/۱\times۱۰^{-۶}$	تخلخل	۰/۲
پخشیدگی طولی(α_L) (متر)	۲۱/۳	ضریب پخش مو لکولی D_d (متر مربع بر ثانیه)	$۲/۶\times۱۰^{-۹}$
پخشیدگی عرضی(α_T) (متر)	۲/۱۳	ضخامت لایه اشباع (b)	۳۰/۵

[2] Source Pollution

www.SID.ir

Archive of SID



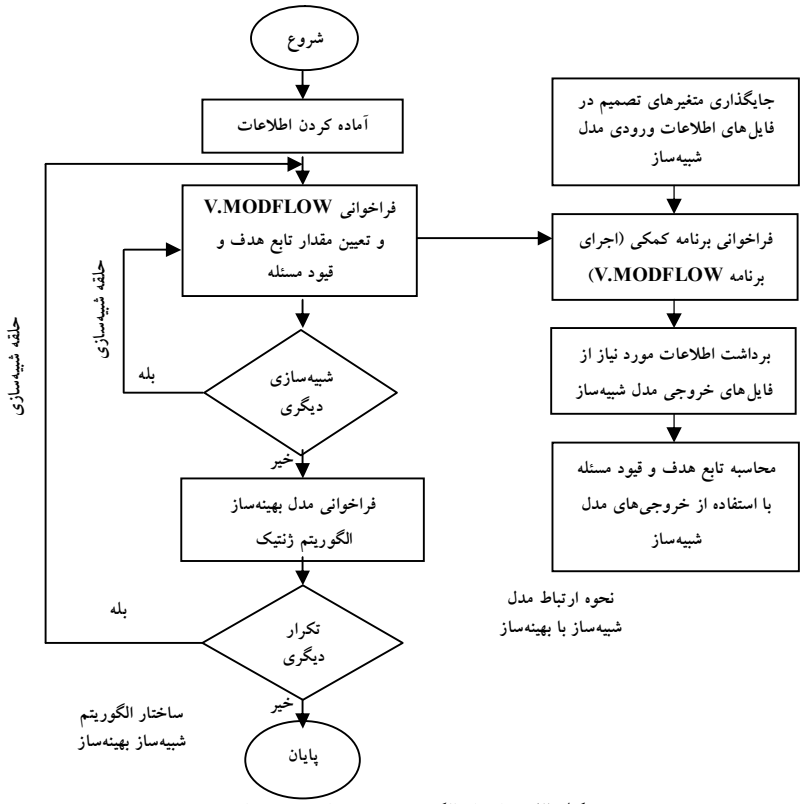
شکل ۲- غلظت TCE در آبخوان پس از یک دوره ۳۰ساله

۲-۳- الگوریتم ژنتیک

در الگوریتم ژنتیک، ابتدا یک جمعیت اولیه ایجاد می‌گردد سپس کیفیت هر یک از جوابها تعیین می‌شود و الگوریتم، حل بهینه یا نزدیک به بهینه را توسط سه عملگر اصلی زیر تولید می‌کند: ۱- انتخاب ۲-ترکیب (زاد و ولد) ۳-جهش. برای تعیین هر یک از جوابها باید نرم افزار V.MODFLOW یک مرتبه اجرا شود. برای انجام این کار برنامه‌ای به زبان دلفی و قابل اجرا در همه محیط‌ها به نام برنامه کمکی تهیه شد. ساختار الگوریتم شبیه‌ساز- بهینه‌ساز را می‌توان به شکل فلوچارت شکل ۳ نشان داد.

۲-٤- طراحی مدل بهینه‌ساز

به‌طور کلی در مسائل بهینه‌سازی دو نوع محدودیت وجود دارد: ۱- محدودیت بر روی متغیرهای تصمیم ۲- محدودیت بر روی متغیرهای حالت. قید متغیرهای تصمیم را می‌توان به شکل محدود نمودن مقدار متغیرها و تعیین مرز بالایی و پایینی متغیرها انجام داد و قید متغیر حالت را می‌توان به شکل تابع جریمه منظور کرد و از



شکل ۳- ساختار الگوریتم شبیه‌ساز- بهینه‌ساز

www.SID.ir

Archive of SID

تابع هدف کم کرد. روابط زیر فرمول‌بندی مسئله را نشان می‌دهند:

$$f = \text{Minimize [standard deviation } (C_i)] \quad (۱)$$

$$0 \le Q_j \le 60 \quad m^3/day \quad (۲)$$

$$(۳)$$

$$pen = \begin{cases} a \times \sum_{i=1}^{n} (C_i - C^*) & a \times \sum_{i=1}^{n} (C_i - C^*) > 0 \\ 0 & a \times \sum_{i=1}^{n} (C_i - C^*) \le 0 \end{cases}$$

$$f' = f\text{-}pen \quad (۴)$$

رابطه ۱ تابع هدف را نشان می‌دهد که باید کمینه شود. C_i غلظت مشاهده شده در چاههای مشاهداتی شکل ۱ است. رابطه ۲ محدودیت نرخ برداشت برای دبی پمپاژ از هر چاه (Q_j) را نشان می‌دهد و رابطه ۳ مقدار جریمه برای تخطّی از محدودیت بیشینه غلظت مشاهداتی (pen) را بیان می‌کند. در این روابط C^* بیشینه غلظت مجاز است که برابر با ۳۰ میلی‌گرم در لیتر در نظر گرفته می‌شود و a وزن این قید است که با آزمایش مقادیر مختلف a و تأثیر آن بر روی تابع هدف و اهمیت آن با توجه به نوع مسئله، مقدار آن برابر ۰/۳ در نظر گرفته شد. رابطه ۴ تابع هدف را با کم کردن مقدار جریمه از آن نشان می‌دهد. کل زمان بهره‌برداری یک سال است. متغیرهای تصمیم، محل و دبی پمپاژ است. ۸ چاه پتانسیلی برای پمپاژ از پیش تعیین شده بود که از بین این ۸ چاه، ۴ تا برای اصلاح آبخوان و تعدیل غلظت آلاینده‌ها توسط مدل بهینه‌یاب انتخاب شد. بازه دبی پمپاژ بین ۰ تا ۶۰ به ۱۶ قسمت شامل مقادیر دبی ۰، ۴، ۸ و ۶۰ مترمکعب بر روز تبدیل شد. محل و دبی پمپاژ به‌ترتیب با رشته‌هایی به‌طول سه و چهار بیت نمایش داده شد. در نتیجه هر متغیر تصمیم که شامل محل چاه و دبی پمپاژ آن است به‌وسیله یک رشته هفت بیتی معرفی گردید و در نهایت هر کروموزوم که بیانگر ۴ متغیر تصمیم است، به شکل یک کروموزوم ۲۸ بیتی کدگزاری شد.

۲-۵- تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک یا کالیبره کردن آن، یکی از قدم‌های مهم برای رسیدن به حل بهینه و یا نزدیک به بهینه است. تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک، شامل انتخاب تعداد جمعیت اولیه، احتمال ترکیب (p_c)، احتمال جهش (p_m)، نوع روش انتخاب و تعداد تکرار الگوریتم برای همگرا شدن به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه است. برای تعیین این پارامترها از روشی که رید و همکاران[1] در سال ۲۰۰۰ ارائه کرده‌اند استفاده شد [۱۶]. در این روش برای تعیین جمعیت اولیه از رابطه ۵ که بر اساس تئوری Random Walk و توسط هریک[2] در سال ۱۹۹۷ توسعه داده شده است استفاده شد [۱۷]

$$N \ge -2^{k-1} \ln(\alpha) \left(\sigma_{bb} \sqrt{\pi (m-1)/d} \right) \quad (۵)$$

که در این رابطه

N اندازه جمعیت اولیه، k مرتبه جعبه‌های ساخته شده (بین ۱ تا ۵)، α احتمال شکست (کمتر از ۵٪)، $\sigma_{bb}\sqrt{\pi(m-1)/d}$ خطای استاندارد کیفیت جوابها برای یک جمعیت تصادفی و d تفاوت بین کیفیت اولین و دومین عضو جمعیت است. مقدار p_c، p_m و تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک به ترتیب از روابط ۶، ۷ و ۸ به‌دست می‌آیند. رید و همکاران این روش را تنها برای انتخاب رقابتی ارائه کرده‌اند و نشان دادند که این روش دارای راندمان بیشتر است و تمایل کمتری به‌سمت همگرایی زودرس نسبت به بقیه روشهای انتخاب دارد.

$$P_C \le (S-1)/S \quad (۶)$$

$$p_m \approx 1/N \quad (۷)$$

$$t \approx 2l \quad (۸)$$

که در این روابط

S برابر با کل تعداد عضوهایی که در انتخاب رقابتی شرکت می‌کنند، N تعداد کل جمعیت، l طول هر کروموزوم و t تعداد تکرار الگوریتم برای همگرا شدن به جواب بهینه است. برای محاسبه خطای استاندارد کیفیت جوابها و d در رابطه ۵ یک جمعیت ۱۰۰ عضوی به‌صورت تصادفی ایجاد شد و مقدار خطای استاندارد و d برای این جمعیت محاسبه شد. در پایان مقادیر زیر برای پارامترهای الگوریتم ژنتیک به‌دست می‌آید: جمعیت اولیه ۵۰، احتمال ترکیب (p_c) ۰/۵، احتمال جهش (p_m) ۰/۰۲ و تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک ۵۶ مرتبه.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۲ نتایج به‌دست آمده از الگوریتم شبیه‌ساز- بهینه‌ساز نشان داده شده است. همچنین مقدار تابع هدف برابر ۷/۳۰۹۰ به‌دست آمد.

جدول ۲- نتایج مدل بهینه ساز

دبی پمپاژ (m^3/day)	محل چاه	دبی پمپاژ (m^3/day)	محل چاه
۶۰	چاه شماره ۱	۴۸	چاه شماره ۶
۵۲	چاه شماره ۴	۵۶	چاه شماره ۸

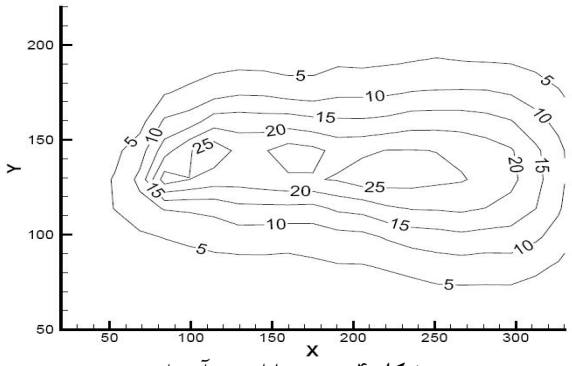
[1] Reed et al.

[2] Harick

www.SID.ir

Archive of SID

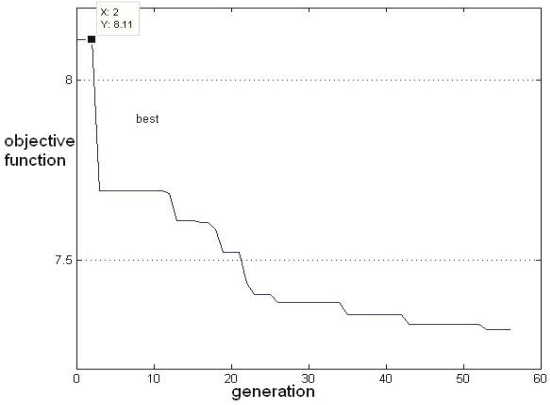
مقادیر جدول ۲ برنامه بهینه برداشت است که با هدف یکنواخت کردن غلظت آلودگی در آبخوان به‌دست آمده‌اند. شکل ۴ توزیع غلظت در آبخوان را در پایان دوره بهره‌برداری نشان می‌دهد.



شکل ۴- توزیع غلظت در آبخوان

همانطور که در شکل ۴ مشخص است آلودگی در داخل پلوم خود پخش شده و غلظت آن یکنواخت گردیده است. همچنین در شکل مشخص است که پیک غلظت آلودگی کاهش یافته و به پایین‌تر از مقدار مجاز رسیده است. بنابراین انتخاب مقدار ۰/۳ برای ضریب جریمه a که بر اساس آزمون سعی و خطا برای تابع هدف مسئله به‌دست آمد، مناسب است.

صحت جوابهای الگوریتم تهیه شده بستگی به‌درست کارکردن مدل شبیه‌ساز و مدل بهینه ساز دارد. با توجه به اینکه مدل شبیه ساز از مدل‌های معتبر موجود است، صحت جوابهای آن بستگی به مدل ساخته شده و درستی اطلاعات ورودی آن دارد. اما صحت جوابهای مدل بهینه‌ساز بستگی به عوامل زیر دارد: ۱- تناسب نوع روش بهینه‌سازی با مسئله مورد نظر ۲- تنظیم دقیق و انتخاب درست پارامترهای روش بهینه‌سازی ۳- فرمول‌بندی صحیح مسئله در راستای اهداف مورد نظر و علل انجام کار. با توجه به تحقیقات قبلی، نوع روش بهینه‌سازی با مسئله متناسب است. اما درستی جوابهای الگوریتم ژنتیک کاملاً وابسته به انتخاب دقیق پارامترهای الگوریتم است. در این تحقیق برای انتخاب این پارامترها از مقاله رید و همکاران استفاده شد که روشی برای انتخاب پارامترهای الگوریتم ژنتیک ارائه کرده‌اند. در شکل ۵ بهترین عضو هر جمعیت در تکرارهای مختلف الگوریتم ژنتیک نشان داده شده است. سیر نزولی نمودار نشان می‌دهد که الگوریتم به حل بهینه و یا نزدیک به بهینه همگرا شده است.



شکل ۵- نمودار بهترین عضو هر جمعیت در تکرارهای مختلف الگوریتم ژنتیک

۴- نتیجه‌گیری

برای برداشت آب از آبخوان، می‌توان برای هر دوره ترکیبهای متنوعی از چاهها و دبی به‌کار برد. مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز تهیه شده در این پژوهش، ترکیب بهینه چاهها و دبی را پیشنهاد می‌کند. این مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز با توجه به بهره‌گیری از یک مدل شبیه‌ساز کامل با ابزار گرافیکی لازم برای مدل‌سازی، قابل تعمیم روی آبخوان‌های حقیقی است. تأثیر مستقیم متغیرهای تصمیم بر روی مدل شبیه‌ساز بدون هیچ واسطه و فرضیات ساده کننده، از مزیتهای دیگر الگوریتم شبیه‌ساز- بهینه‌ساز است. تابع هدف و متغیرهای تصمیم محل چاههای مشاهداتی با توجه به شکل و نوع مسئله و اهداف مورد نظر قابل تغییر است. برنامه بهینه برداشت می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی کارآمد در اختیار مدیریت بهره‌برداری از آبخوان قرار گیرد.

۵- مراجع

1- Khan, F.I., Husain, T., and Hejazi, R. (2004). "An overview and analysis of site remediation technologies." *J. Environmental Management*, 71, 95-122.

2- Safavi, H.R., Sookhaklari, K., and Taebi, A. (2006). "Simulation pump and treat and air sparging for in-situ remediation of contaminated groundwater." *J. of Water and Wastewater*, 56, 30-39. (In Persian)

www.SID.ir

Archive of SID

3- Gorelick, S. M., Voss, C. I., Gill, P.E., Murry, W., Saunders, M. A., and Wright, M.H (1984).“Aqufer reclamation design : The use of contaminant transport simulation combined with nonlinear programming.” *Water Resource. Res*., 20(4), 415-427.

4- Cai, X., Rosegrant, M.W., and Ringler, C. (2003). “Physical and economic efficiency of water use in the river basin: Implication for efficient water management.” *Water Resource. Res* ., 39(1), 1013-1024.

5- Zheng, C., and Wang, P.P. (1999). “An integrated global and local optimization approach for remediation system design.” *Water Resource. Res*., 35(1), 137-148.

6- Mayer, A.S., Kelley, C.T., and Miller C.T. (2002) “Optimal design for problems involving flow and transport phenomena in saturated subsurface systems.” *Adv. Water Resource*, 25,1233-1256.

7- Sturman, P.J., Stewart, P.S., Cunningham, A.B., Bouwer, E.J., and Wolfram, Jh. (1995). “Engineering scale-up of in situ bioremediation process: Review.” *J. Contaminant Hydro*., 19, 171-203.

8- Jonoski, A., Zhou, Y., Nonner, J., and Meijer, S. (1997). “Model-aided design and optimization of artificial recharge-pumping systems.” *J. Hydro. Sci*., 42(6), 937-953.

9- Chang, L.C., Shoemaker, C.A., and Liu, P.L.F. (1992). “Optimal time varying pumping rates for groundwater remediation: Application of constrained optimal control algorithm.” *Water Resource. Res*., 28(12), 157-173.

10- Aly, A.H., and Peralta, R.C. (1999) “Comparison of a genetic algorithm and mathematical programming to the design of groundwater cleanup system.” *Water Resource. Res* ., 35(8), 2415-2425.

11- Aly, A.H., and Peralta, R.C. (1999). “Optimal design of aquifer cleanup systems under uncertainty using a neural network and genetic algorithm.”*Water Resource. Res*., 35(8), 2523-2532.

12- Aral, M.M., and Guan, J. (1996). “Optimal groundwater remediation design using differential genetic algorithm.” *Computational Methods in Water Resources*, 1, 357-394.

13-Wang, M., and Zheng, C. (1997). “Optimal remediation policy selection under general conditions.” *Ground Water*, 35(5), 757-764.

14- Waterloo Hydrogeologic. " http://www.waterloohydrogeologic.com/"

15- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G.(2000). *MODFLOW-2000, the US Geological survey modular ground-water-model user guide to modularization concepts and the groundwater flow process*, USGS Open- File Report 00-92, P. 121, USA.

16- Reed, P., Minsker, B., and Goldberg, D. E. (2000). “Designing a competent simple genetic algorithm for search and optimization.” *Water Resource. Res*., 36(12), 3757-3761.

17- Harik, G.R., Cantu-Paz, E., Goldberg, D. E., and Miller, B. L. (1997). “The gamblers ruin problem, genetic algorithm and the sizing of populations.” *In Proceedings of the 1997 IEEE conference on Evolutionary Computing, IEEE Press Piscataway*, N.J., 7-12.

www.SID.ir