تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال یازدهم، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴
Volume 11, No. 1, Spring & Summer 2015 (IR-WRR)
۹۱-۹۶

یادداشت فنی

توسعه مدل شبیه سازی- بهینه سازی در مدیریت تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب

سجاد رحمانی [۱*]، محمدمهدی احمدی [۲] و کورش قادری [۳]

چکیده

با افزایش تقاضای آب بالاخص در مناطق خشک، منابع آبی مناسب جدیدی باید تعریف شود. تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب یک راه حل کاربردی و مقرون به صرفه جهت تامین آب می‌باشد. هدف تغذیه مصنوعی افزایس حجم و ذخیره آب در آبخوان به جهت مصرف آتی می‌باشد. پساب در ابتدا برای مصرف در موارد غیرشرب مورد استفاده قرار می‌گرفته است اما تحت شرایط تنش استفاده از آن برای شرب احتمالا شدنی خواهد گردید. بهبود کیفیت پساب حین نفوذ به درون زمین و انتقال از طریق جریان آب زیرزمینی چشمگیر بوده و در مجموع به آن سالم‌سازی خاک – آبخوان اطلاق می‌شود. برای تأمین اهداف موردنظر، عملیات دفع پساب بایستی با درنظر گرفتن ملاحظات مالی، کیفی و زیست محیطی مدیریت گردد. در این مقاله مدل بهینه سازی-شبیه سازی برای بهینه‌سازی تغذیه مصنوعی آبخوان با استفاده از پساب توسعه داده شده است که ملاحظات کمی و کیفی را در نظر می‌گیرد. در این مدل از الگوریتم تکاملی کمپلکس‌های مختلط (SCE) بعنوان ابزار بهینه سازی بهمراه مدل‌های شبیه سازی MODFLOW و MT3DMS برای بیان حرکت و کیفیت پساب، استفاده شده است. کارایی مدل با کاربرد آن در مدیریت تغذیه پساب یک مجتمع بررسی و اثبات شده است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، شبیه‌سازی آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، الگوریتم تکامل رقابتی جوامع، MODFLOW، MT3DMS

تاریخ دریافت مقاله: ۹ دی ۱۳۹۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۵ شهریور ۱۳۹۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.
۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.
*- نویسنده مسئول

Technical Note

Simulation-Optimization Model for Artificial Groundwater Recharge Management Using a Treated Wastewater

S. Rahmani [1], M. M. Ahmadi[2] and K. Qaderi[3]*

Abstract

In areas with limited water resources, the increases in water demands calls for alternative water sources. For such area one supply augmentation practice is the artificial groundwater recharge using wastewater effluent. The resulting reclaimed water is used primarily for non-potable purposes but under increasing stresses shifting to potable uses is also likely to happen. During recharge through the vadose zone and transport through the groundwater aquifer, the quality of water improves that are collectively described as Soil Aquifer Treatment (SAT). In this paper, a SAT management model is developed that considers monetary, water quality, and environmental concerns. Within the SAT model, the shuffled complex evolution algorithm (SCE) is used as the optimization tool. In this application, SCE is integrated with the simulation models (MODFLOW, MT3DMS) to represent movement and quality transformation. One steady state case on a general hypothetical aquifer were examined using the management model.

Keywords: Optimization, Ground water simulation, MODFLOW, MT3DMS, SCE, Artificial groundwater recharge.

Received: December 30, 2013
Accepted: August 27, 2014

1- M.Sc. Student, of Water Structure Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. Email: sajjad.rahmani.uk@gmail.com
2 Assistant professor, Department of Water Structure Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. email: ahmadi_mm@uk.ac.ir
3- Assistant Professor, of Water Structure Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. email: koroushqaderi@uk.ac.ir
*- Corresponding Author

Archive of SID

www.SID.ir

۱- مقدمه

در نواحی خشک و نیمه خشک استفاده از طرح‌های تغذیه مصنوعی (Artificial recharge) سفره آب زیرزمینی به‌عنوان یک راهکار عملی در حفظ آبخوان مطرح می‌باشد. یکی از منابع آب برای استفاده در طرح تغذیه مصنوعی پساب تصفیه شده (Treated wastewater) است. از جمله مزایای این روش‌ها می‌توان به سهولت، هزینه کم، تقویت منابع آب زیرزمینی و از همه مهمتر استفاده از توانایی طبیعی آبخوان در تصفیه نسبی پساب اشاره نمود. در صورت وجود منابع بهره برداری در محدوده طرح تغذیه مانند چاه، چشمه، قنات و ... بایستی حفظ کیفیت آب در این منابع را مدنظر قرار داد. در طی تغذیه مصنوعی با پساب تصفیه شده کیفیت آن بهبود می‌یابد که به آن سالم سازی خاک – آبخوان (Soil Aquifer Treatment, SAT) اطلاق می‌شود (Bouwer, 1996). یک طرح مدیریت سفره آب زیرزمینی باید به دو سوال اصلی شامل الف) چه تعداد چاه تزریق و بهرهبرداری مورد نیاز است؟ و ب) محل چاه‌ها کجا باشد؟ با ارضا قیود هیدرولیکی و کیفیتی پاسخ دهد. این متغیرهای تصمیم گیری در ارتباط با هم می‌باشند و متغیرهایی پیوسته‌اند بنابراین مسئله مدیریت سفره آب زیرزمینی بسیار پیچیده است و یافتن راه حل بهینه در مدیریت سفره آب زیرزمینی مشکل است. این مسئله توسط برخی محققین با ساده سازی توسط روش برنامه ریزی خطی (LP) و برنامه ریزی غیرخطی (NLP) حل شده است. Gorelick et al. (1984) جزء اولین کسانی بودند که روشی را برای حل مسئله مدیریت سفره آب زیرزمینی با در نظر گرفتن سیستم غیرخطی، ارائه کردند. Dougherty and Marryott (1991) و Marryott et al. (1993) روش بازپخت (Simulated annealing, SA) را برای بهینه سازی رفع آلودگی (remediation) آب زیرزمینی مورد استفاده قرار دادند، (Eusuff and Lansey, 2004). McKinney and Lin (1994) روش الگوریتم ژنتیک (GA) را برای بهینه‌سازی نرخ پمپاژ چاهها با محل ثابت، انجام دادند.

هدف این تحقیق بهینه سازی طراحی و بهره‌برداری تغذیه مصنوعی پساب تصفیه شده از طریق حوضچه پخش با هدف حداکثرسازی نفوذ حجم پساب تصفیه شده با در نظر گرفتن مسایل کیفیت آبخوان می‌باشد. مدل بهینه سازی میزان تغذیه و برداشت را با در نظر گرفتن قیود کیفیت آب بهره‌برداری شده، حداکثر می‌سازد. در این تحقیق مدل بهینه‌سازی براساس روش SCE (Shuffled Complex Evolution,) توسعه یافته و برای شبیه‌سازی هیدرولیک جریان، کیفیت آب و انتقال، مدلهای MODFLOW و MT3DMS به مدل بهینه‌سازی SCE توسعه داده شده لینک شده است. SCE یک روش جستجوی جمعیتی فراکاوشی است که کارایی و مؤثر بودن آن برای کالیبراسیون مدل‌های حوضه آبریز و بارش–رواناب به اثبات رسیده است. (قادری و همکاران، ۱۳۸۵؛ Duan et al., 1993).

۲- روش انجام تحقیق

هدف از طرح تغذیه مصنوعی افزایش حجم آب سفره زیرزمینی با پساب تصفیه شده و بهره برداری از آن توسط مجموعه‌ای از چاهها است. سیستم مورد نظر شامل تغذیه مصنوعی و چاه‌های بهره‌برداری است بنابراین تابع هدف حداکثرسازی سود را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

$$\text{Maximize } F(q) = f[\{q\},\{h\},\{c\},\{l\}]. \quad (۱)$$

که متغیر تصمیم گیری $\{q\}$ بیان کننده بردار تنش‌ها (تغذیه و برداشت) سیستم، $\{h\}$ بردار سطح آب زیرزمینی در سلول‌های شبکه سیستم آب زیرزمینی که توسط مدل شبیه‌سازی محاسبه می‌شود و دارای مقدار اولیه $\{h^{In}\}$ است، $\{c\}$ بردار کیفیت آب زیرزمینی در سلول‌های شبکه سیستم آب زیرزمینی که توسط مدل شبیه‌سازی محاسبه می‌شود و دارای مقدار اولیه $\{c^{In}\}$ است و $\{l\}$ بردار نشان دهنده محل ذرات بعد از گذشت زمان مشخص از شروع تغذیه می‌باشد و دارای مقدار اولیه $\{l^{In}\}$. علاوه بر این قیود سیستم مربوط به سطح آب زیرزمینی $H(\bullet)$، کیفیت آب $C(\bullet)$ و $L(\bullet)$ می‌باشند و بسته به نوع سیستم قیود منبع آب و بهرهبرداری نیز ممکن است، مدنظر قرار گیرند. مدل بهینه‌سازی– شبیه‌سازی مدیریت تغذیه–برداشت از آبخوان در این تحقیق از الگوریتم بهینه سازی SCE بهمراه مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی MODFLOW و مدل انتقال MT3D، استفاده شده است. SCE یک الگوریتم فرابتکاری نامقید می‌باشد و قیدها در تابع هدف بصورت توابع جریمه وارد می‌شوند بنابراین

(۲)

$$f[\{q\},\{h\},\{c\},\{l\}]. - \sum_{k=1}^{M} W_p \left[\max\left(g^k[\{q\},\{h\},\{c\},\{l\},0\right)\right]$$

که W_p ورن جریمه است. در صورت تجاوز از قیود g^k بزرگتر از صفر خواهد بود. حداکثر مقدار تابع برابر با میزان تجاوز از قیود ضربدر فاکتور مقیاس است. به این دلیل که تابع هدف باید حداکثر شود میزان تخطی از تابع هدف کسر می‌شود. اگر قید k ارضا شود حداکثر مقدار تابع برابر صفر خواهد شد.

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۱- تعریف مسئله مدیریتی آبخوان

برای بررسی کارایی مدل شبیه‌سازی-بهینه سازی توسعه داه شده در این تحقیق مدل فرضی شرایط دفع پساب یک مجتمع صنعتی، (شکل ۱). با درنظر گرفتن ملاحظات زیست محیطی انتخاب و بررسی شده است. هدف در این مسئله مدیریتی، حداکثر نمودن دفع پساب با تغییر نرخ تغذیه در ۴ سلول حوضچه دفع پساب و نرخ برداشت از ۵ چاه می‌باشد قیود مسئله عبارتند از الف) سطح آب در چاه‌های مشاهده ای بایستی تا حد ممکن به مقادیر هدف نزدیک باشد و ب) غلظت آلودگی در چاه‌های برداشت بایستی از حداکثر مقدار غلظت (MCL) کمتر باشد.

بیان ریاضی تابع هدف مدل بهینه سازی بصورت زیر است

$$Minimize - \left\{ \sum_{r=1}^{N_b} A_r R_r \right\} + \left\{ \sum_{w=1}^{N_w} Q_w \right\} + P^1 + P^2, \quad (۳)$$

$$P^1 = W_p [h_j - h_j^*] \quad ; \quad P^2 = 10^{10} \quad (۴)$$

و قیود مسئله عبارتند از

$$h_{min}^j \le h_j \le h_{max}^j ; j = 1,\ldots, O_w$$

$$c_w \le c^* ; w = 1,\ldots, N_w$$

$$Q_{min} \le Q \le Q_{max}$$

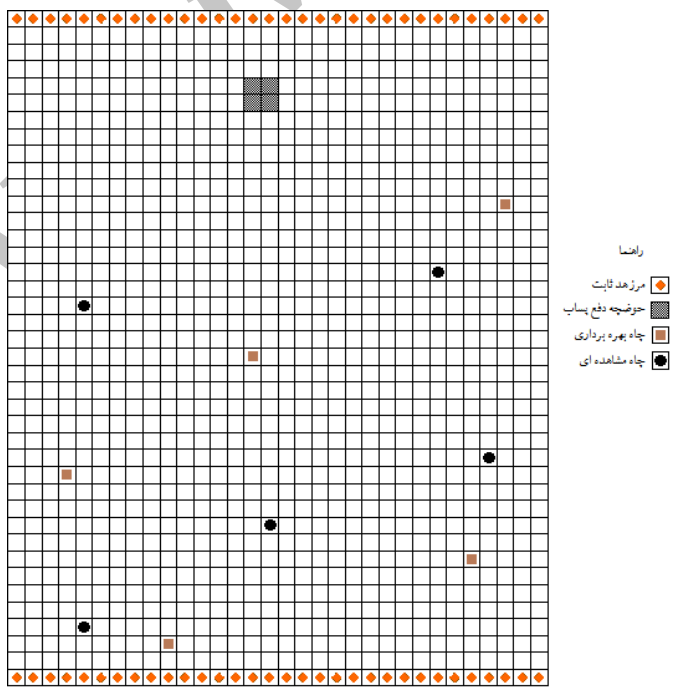
$$R_{min} \le R \le R_{max}$$

$$D \le \sum_{w=1}^{N_w} Q_w \le Q^T$$

که A_r مساحت حوضچه دفع پساب r، N_b تعداد کل حوضچه‌ها، R_r نرخ تغذیه در حوضچه r، R_{min} و R_{max} حدود پایینی و بالایی است که توسط محدودیتهای فیزیکی و بهره برداری تعیین می‌شود، Q_w نرخ برداشت از چاه w، N_w تعداد کل چاه‌های برداشت، h_j سطح آب شبیه سازی شده در نقطه مشاهده ای j، h^*_j سطح آب هدف در نقطه j، h^j_{min} و h^j_{max} حداقل و حداکثر محدوده مجاز سطح آب شبیه سازی شده در نقطه j، O_w تعدادکل چاه‌های مشاهده ای، c_w غلظت آلودگی در چاه برداشت w، c^* حداکثر سطح غلظت که یک قید قانونی است، D میزان تقاضای آب که بایستی از چاه‌های برداشت تأمین شود، Q^T حد بالایی کل برداشت مجاز از چاه‌ها می‌باشند. که P^1 میزان جریمه بازای تغییرات غیرمجاز سطح آب شبیه سازی شده نسبت به مقدار هدف (مقدار هد مشاهده ای در نقطه) و P^2 میزان جریمه بازای افزایش بیش از حد مجاز غلظت شبیه سازی شده آلودگی در چاه‌های بهره برداری می‌باشد.

۴- کاربرد مدل تلفیقی

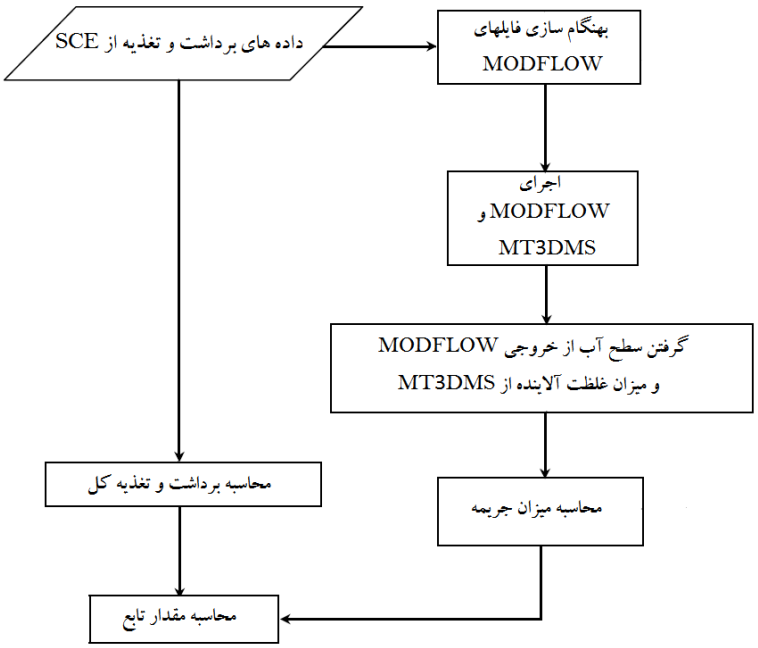
بر اساس الگوریتم مدل تلفیقی نشان داده شده در شکل ۲ ابتدا محدوده ۳۲۰ هکتاری مسئله فرضی به سلولهایی با ابعاد ۵۰ متر × ۵۰ متر شبکه بندی شد. شرایط مرزی شامل مرزهای هد ثابت ۲۵۰ متر در شمال محدوده و ۳۶/۲۵ متر در جنوب محدوده، بهمراه مرزهای فاقد جریان در سمت راست و چپ محدوده می‌باشد، (شکل ۱).



شکل ۱ – مشخصات و شبکه مدل عددی محدوده مطالعاتی برای شبیه سازی حرکت و غلظت آلودگی آب زیرزمینی

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۲- الگوریتم مدل تلفیقی، بهینه سازی-شبیه سازی برای محاسبه تابع هدف

جدول۱- پارامترهای مدل آب زیرزمینی

زمان شبیه‌سازی	نسبت پخش	ضریب پخش طولی	تخلخل	هدایت هیدرولیکی
۱ سال	۰/۲	۲۰ m	۰/۳	۱/۴۷۴ × ۱۰$^{-۴}$m/s

جدول ۲- محدوده تغییرات مجاز پارامترهای مسئله

W_p	c^*	Q_T	D	R_{max}	R_{min}	Q_{max}	Q_{min}
۱۰۰۰۰۰	۱mg/l,۳ mg/l	۳۳۹/۲۲۸۰ cms	۱۶۹/۹۰۱۱ cms	۰/۵ m/d	۰ m/d	۱/۳۲۶۷ cms	۰cms

آبخوان شامل یک لایه و از نوع آزاد است. سایر اطلاعات مدل در جدول ۱ و ۲ ذکر شده است. محدوده دفع پساب مجتمع صنعتی در شمال محدوده قرار داشته و مساحت آن ۱۰۰۰۰ متر مربع (۱۰۰ متر×۱۰۰ متر) می‌باشد. میزان غلظت آلاینده در پساب ۵ mg/l است. ۵ چاه بهره برداری در منطقه وجود دارد که با دبی کل cms ۵/۶۶۳۳۷ درحال بهره برداری از آبخوان می‌باشند. بمنظور بررسی تغییرات سطح آب، ۵ چاه مشاهده ای نیز در منطقه وجود دارد.

۴-۱- نتایج و بحث

پس از اجرای مدل شبیه سازی و تلفیق با مدل بهینه سازی در صورتیکه مقدار c^* برابر با ۱ mg/l در نظر گرفته شود، حداکثر میزان مجاز دفع پساب برابر با ۱۲۵/۱۷۸۲۳ مترمکعب در روز خواهد بود. این مقدار در صورتیکه c^* برابر با ۳ mg/l باشد به ۸۰۴/۴۴۲۰۹ مترمکعب در روز افزایش خواهد یافت. بمنظور جلوگیری از تغییر سطح آب در نقاط مورد نظر (چاه‌های مشاهده ای) و نیز عدم تجاوز غلظت آلاینده در چاه‌های بهره برداری از حد مجاز تعیین شده، میزان بهره برداری از چاه‌های موجود بر طبق جدول ۳ تغییر می‌نماید. با حداکثر غلظت مجاز آلاینده ۱ mg/l ، در طول یک سال به میزان ۴۵۶۹۰/۰۵۵۶۵ متر مکعب پساب دفع خواهد شد و میزان بهره‌برداری از چاه‌ها نیز در کل ۱۰۹۲۴۳۶۴/۲۷ متر مکعب (٪ ۰/۱۲۳) افزایش خواهد یافت، بدون اینکه در سطح آب تغییر محسوسی ایجاد شود (جدول ۴). میزان کل غلظت آلاینده در طول دوره یک ساله نیز مقداری ناچیز می‌باشد (جدول ۵ و شکل ۳).

با حداکثر غلظت مجاز آلاینده ۳ mg/l ، در طول یک سال به میزان ۲۹۳۶۲۱/۳۶۳۱ متر مکعب پساب دفع خواهد شد و میزان بهره برداری از چاه‌ها نیز در کل ۶۹۲۳۲۶۸۷/۸ متر مکعب (٪ ۰/۷۷۵) افزایش خواهد یافت، و در این مورد نیز تغییرات سطح آب محسوس نخواهد بود (جدول ۴).

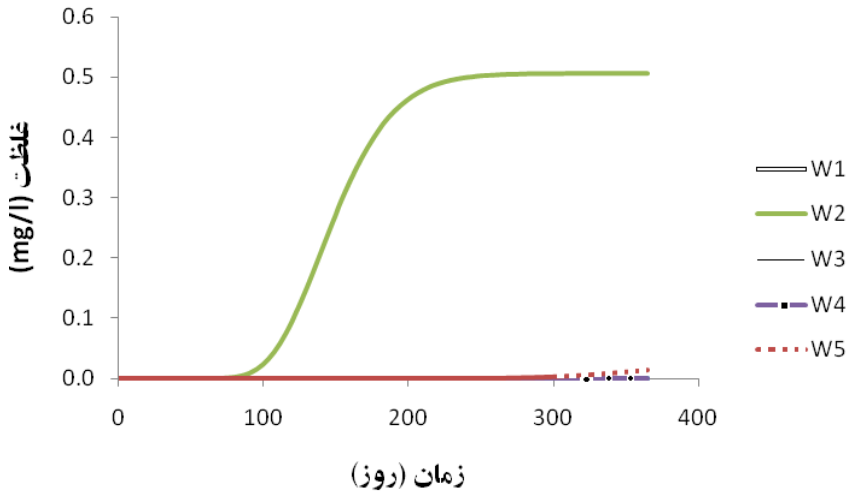
www.SID.ir
Archive of SID

جدول ۳- میزان برداشت از چاه‌ها بر اساس حداکثر غلظت مجاز آلاینده (c*)

نام چاه	میزان برداشت (cms)		موقعیت (ردیف ، ستون)
	c*=۳ mg/l	c*=۱ mg/l	
Q1	۶۷/۴۴۲۶	۵۸/۳۱۳۲	(۱۲،۳۰)
Q2	۶۱/۶۰۰۵	۵۷/۴۱۴۴	(۱۵،۲۱)
Q3	۷۴/۸۵۸۰	۵۹/۴۶۳۴	(۴،۲۸)
Q4	۵۵/۹۵۲۷	۵۶/۵۲۴۶	(۲۸،۳۳)
Q5	۲۵/۵۱۰۰	۵۱/۷۹۹۳	(۱۰،۳۸)

جدول ۴- اختلاف بین مقادیر هد محاسباتی و مشاهداتی پس از اعمال تغییر در میزان برداشت

نام چاه	اختلاف هد (m)		موقعیت (ردیف ، ستون)
	c*=۳ mg/l	c*=۱ mg/l	
O1	۰/۰۰۰۱	۰	(۲۶،۱۶)
O2	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	(۵،۱۸)
O3	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۱۳	(۲۹،۲۷)
O4	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۹	(۱۶،۳۱)
O5	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	(۵،۳۷)



شکل ۳ – تغییرات غلظت آلاینده در طول دوره یکساله (c*= ۱ mg/l)

البته در این شرایط میزان تغییرات در مقدار بهره برداری از چاه‌ها به نسبت زیاد می‌باشد و این مقدار در چاه W5 به حداکثر خود (٪ ۵۴) میرسد. همچنین میزان کل غلظت آلاینده در طول دوره یک ساله در تمامی چاه‌ها کمتر از حد مجاز می‌باشد (جدول ۵ و شکل ۴). در صورتی که با توجه با استانداردهای موجود فرض c*= ۳ mg/l صحیح باشد، با استفاده از طرح پیشنهادی علاوه بر امکان دفع صحیح مقادیر نسبتا زیادی از پساب و کاهش مخاطرات زیست محیطی، می‌توان با افزایش کلی بهره برداری از چاه‌ها و بدون وجود نگرانی از افزایش غیر مجاز غلظت آلاینده از پساب نسبتاً تصفیه شده توسط آبخوان نیز استفاده مجدد نمود. البته در صورتی که مقدار c*= ۱ mg/l نیز بعنوان حداکثر غلطت مجاز آلودگی درنظر گرفته شود، باز هم می‌توان از مزایای فوق به نسبت کمتر بهره برد.

۵- نتیجه‌گیری

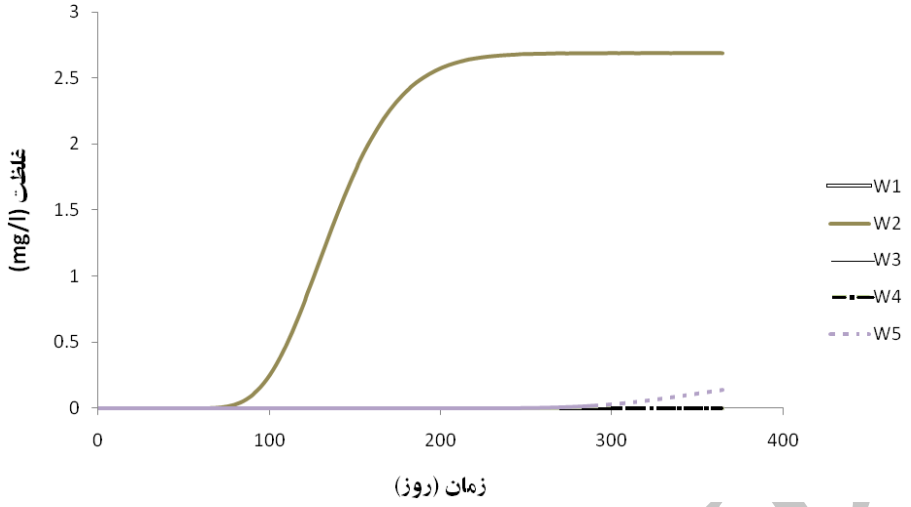
مدل تلفیقی بهینه‌سازی-شبیه‌سازی برای مدیریت آبخوان و بهینه سازی طرح تغذیه مصنوعی با پساب که از الگوریتم بهینه سازی SCE استفاده می‌کند توسعه داه شده است. با اجرای مدل برای وضعیت‌های دفع پساب فرضی کارکرد آن به اثبات رسید. از مدل توسعه داده شده می‌توان برای حل مسایل مشابه بکار برد. از دیگر مزایای مدل ارائه شده می‌توان به ارائه نقشه محدوده پخش آلودگی در زمانهای مختلف اشاره نمود که به تصمیم گیری در امکان بهره برداری از نقاط مختلف محدوده کمک شایانی می‌نماید.

جدول ۵- مقدار تجمعی ورود آلاینده به چاه‌های بهره برداری در پایان دوره یکساله

نام چاه	میزان کل آلاینده پس از یک سال (mg/l)		موقعیت (ردیف ، ستون)
	c*=۳ mg/l	c*=۱ mg/l	
W1	۰	۰	(۱۲،۳۰)
W2	۲/۶۸۷	۰/۵۰۵۳	(۱۵،۲۱)
W3	$۵/۵۵\times۱۰^{-۵}$	$۲/۰۴\times۱۰^{-۶}$	(۴،۲۸)
W4	$۹/۶۵\times۱۰^{-۵}$	$۴/۱۷\times۱۰^{-۶}$	(۲۸،۳۳)
W5	۰/۱۳۷۶	۰/۰۱۳۲۹۷	(۱۰،۳۸)

Archive

www.SID.ir



شکل ۴ – تغییرات غلظت آلاینده در طول دوره یکساله (c*= ۳ mg/l)

همچنین در صورت بروز تغییر در شرایط محیط و یا متغیرهای مدیریتی می‌توان بسادگی آنها را به مدل اعمال کرد و بر اساس نتایج حاصل تصمیمات لازم را اتخاذ نمود.

۶- مراجع

قادری ک، محمد ولی سامانی ج، اسلامی ح، و ثقفیان ب (۱۳۸۵) واسنجی اتوماتیک مدل بارش–رواناب با استفاده از روش بهینه سازی SCE. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۲، شماره ۱: ۳۹–۵۲.

Bouwer H (1996) New developments in groundwater recharge and soil aquifer treatment of wastewater for water reuse 96: Proc., AWWA conference, San Diego, American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO.

Duan Q, Gupta V and Sorooshian S (1993) Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. J Optimization Theory Application 76(3): 501–521.

Eusuff M. M, and Lansey K. E (2004) Optimal operation of artificial groundwater recharge system considering water quality transformations. Water Resources Management 18: 379-405.

McKinney D. C, Lin M. D (1994) Genetic algorithm solution of groundwater management model. Water Resource Research 30(6): 1897-1906.

Archive of SID

www.SID.ir