



Technical Note

Simulation-Optimization Model for Artificial
Groundwater Recharge Management Using a
Treated WastewaterS. Rahmani^{1*}, M. M. Ahmadi² and K. Qaderi³

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

یادداشت فنی

توسعه مدل شبیه سازی - بهینه سازی در مدیریت تغذیه
مصنوعی آبخوان با پسابسجاد 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 می باشد. هدف تغذیه مصنوعی افزایش حجم و ذخیره آب در آبخوان به جهت مصرف آبی می باشد. پساب در ابتدا برای مصرف در موارد غیرشرب مورد استفاده قرار می گرفته است اما تحت شرایط تنش استفاده از آن برای شرب احتمالاً 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 سالم سازی خاک - آبخوان اطلاق می شود. برای تامین اهداف موردنظر، عملیات دفع پساب بایستی با در نظر گرفتن ملاحظات مالی، کیفی و زیست محیطی مدیریت گردد. در این مقاله مدل بهینه سازی-شبیه سازی برای بهینه سازی تغذیه مصنوعی آبخوان با استفاده از پساب توسعه داده شده است که ملاحظات کمی و کیفی را در نظر می گیرد. در این مدل از الگوریتم تکاملی کمپلکس های مختلط (SCE) بعنوان ابزار بهینه سازی به همراه مدل های 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: بهینه سازی، شبیه سازی آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، الگوریتم تکامل رقابتی جوامع، MODFLOW، MT3DMS

تاریخ دریافت مقاله: ۹ دی ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۵ شهریور ۱۳۹۳

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

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های 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

MODFLOW و MT3DMS به مدل بهینه‌سازی SCE توسعه داده شده لینک شده است. SCE یک روش جستجوی جمعیتی فراکوشی 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 به صورت زیر نوشت

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

که متغیر تصمیم‌گیری $\{q\}$ بیان‌کننده 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 $\{h^m\}$ است، $\{c\}$ بردار کیفیت آب زیرزمینی در سلول‌های شبکه سیستم آب زیرزمینی که توسط مدل شبیه‌سازی محاسبه می‌شود و دارای مقدار اولیه $\{c^m\}$ است و $\{l\}$ بردار نشان‌دهنده محل ذرات بعد از گذشت زمان مشخص از شروع تغذیه می‌باشد و دارای مقدار اولیه $\{l^m\}$. 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 بهینه‌سازی SCE به همراه مدل شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان آب زیرزمینی MODFLOW و مدل انتقال MT3D، استفاده شده است. SCE یک الگوریتم فراابتکاری نامقید می‌باشد و قیدها در تابع هدف بصورت توابع جریمه وارد می‌شوند بنابراین

(۲)

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

که W_p وزن 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.

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 تصمیم‌گیری 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. (Marryott et al. (1993 و Dougherty and Marryott (1991 روش بازپخت (Simulated annealing, SA) را برای بهینه‌سازی 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 بهینه‌سازی 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 بهینه‌سازی 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

۳-۱- تعریف مسئله مدیریتی آبخوان

برای بررسی کارایی مدل شبیه‌سازی-بهینه سازی توسعه داده شده در این تحقیق مدل فرضی شرایط دفع پساب یک مجتمع صنعتی، (شکل ۱). با در نظر 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

$$\text{Minimize} - \left\{ \sum_{r=1}^{N_b} A_r R_r \right\} + \left\{ \sum_{w=1}^{N_w} Q_w \right\} + P^1 + P^2, \quad (3)$$

$$P^1 = W_p [h_j - h_j^*] \quad ; \quad P^2 = 10^{10} \quad (4)$$

و قیود مسئله عبارتند از

$$h_{min}^j \leq h_j \leq h_{max}^j ; j = 1, \dots, O_w$$

$$c_w \leq c^* ; w = 1, \dots, N_w$$

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

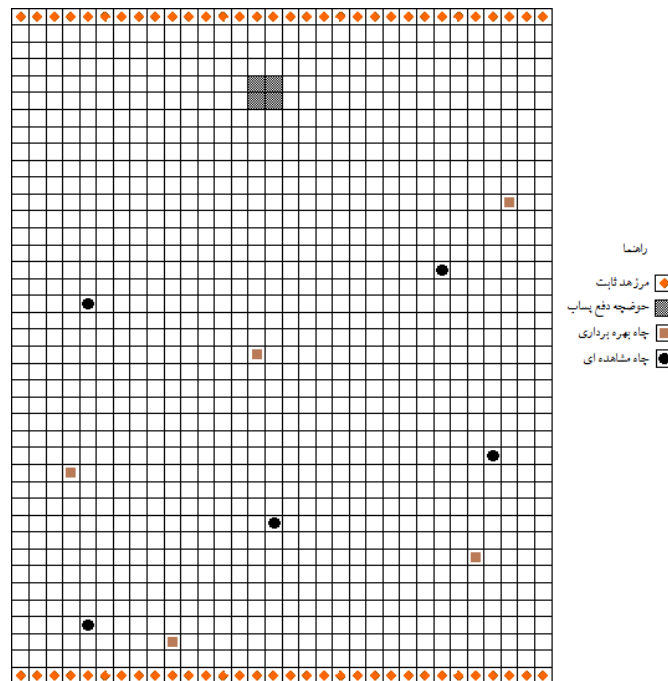
$$R_{min} \leq R \leq R_{max}$$

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

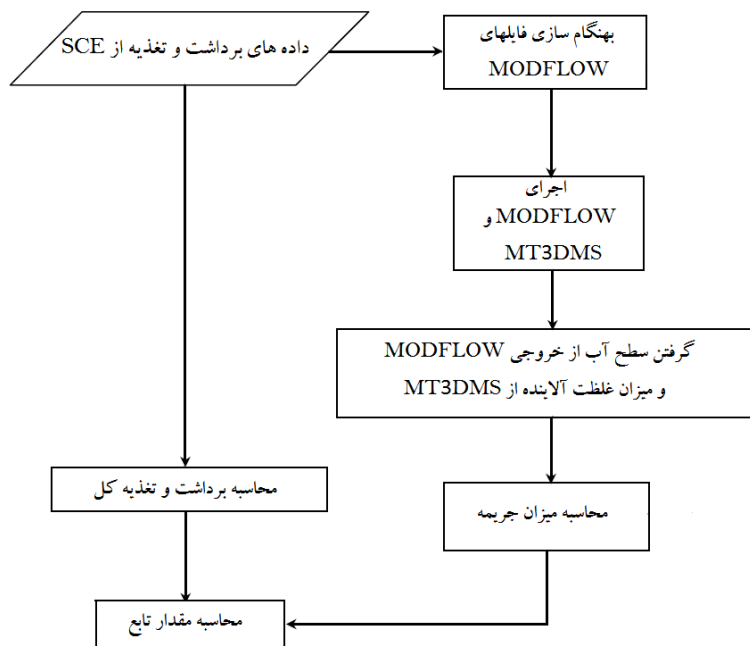
که A_r مساحت حوضچه دفع پساب r تعداد کل حوضچه‌ها، R_r نرخ تغذیه در حوضچه r و R_{min} و R_{max} حدود پایینی و بالایی است که توسط محدودیت‌های فیزیکی و بهره برداری تعیین می‌شود، Q_w نرخ برداشت از چاه w ، N_w تعداد کل چاه‌های برداشت، h_j سطح آب شبیه سازی شده در نقطه مشاهده ای j ، h_j^* سطح آب هدف در نقطه j و h_{min}^j و h_{max}^j حداقل و حداکثر محدوده مجاز سطح آب شبیه سازی شده در نقطه j ، O_w تعداد کل 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



شکل ۲- الگوریتم مدل تلفیقی، بهینه سازی- شبیه سازی برای محاسبه تابع هدف

جدول ۱- پارامترهای مدل آب زیرزمینی

زمان شبیه سازی	نسبت پخش	ضریب پخش طولی	تخلخل	هدایت هیدرولیکی
۱ سال	۰/۲	۲۰ m	۰/۳	$1/474 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

جدول ۲- محدوده تغییرات مجاز پارامترهای مسئله

Q_{min}	Q_{max}	R_{min}	R_{max}	D	Q_T	c^*	W_p
۰ cms	۱/۳۲۶۷ cms	۰ m/d	۰/۵ m/d	۱۶۹/۹۰۱۱ cms	۳۳۹/۲۲۸۰ cms	۱mg/l, ۲ mg/l	۱۰۰۰۰

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 1 mg/l ، در طول یک سال به میزان $45690/05565$ متر مکعب پساب دفع خواهد شد و میزان بهره‌برداری از چاه‌ها نیز در کل $10924364/27$ متر مکعب (%/۱۲۳) افزایش خواهد یافت، بدون اینکه در سطح آب تغییر محسوس 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 3 mg/l ، در طول یک سال به میزان $293621/3631$ متر مکعب پساب دفع خواهد شد و میزان بهره برداری از چاه‌ها نیز در کل $69232687/8$ متر مکعب (%/۷۷۵) افزایش خواهد یافت، و در این مورد نیز تغییرات سطح آب محسوس نخواهد بود (جدول ۴).

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 10000 متر مربع (100×100 متر) می‌باشد. میزان غلظت آلاینده در پساب 5 mg/l است. ۵ چاه بهره برداری در منطقه وجود دارد که با دبی کل $5/66337$ 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

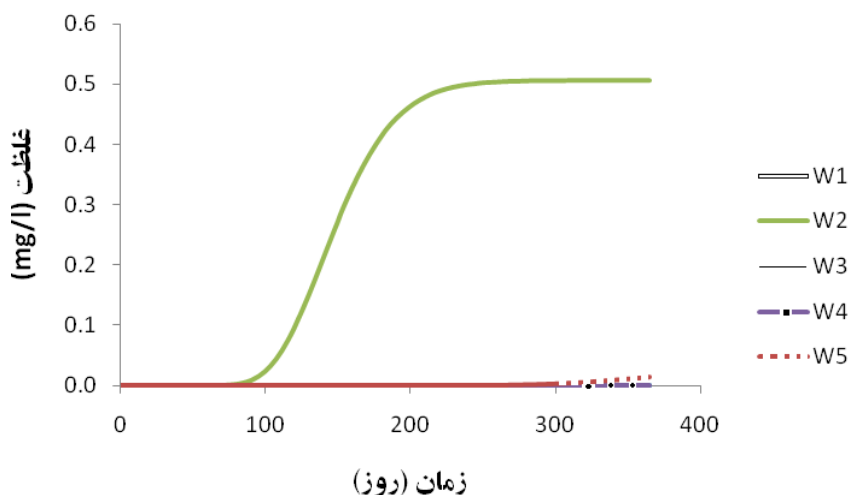
پس از اجرای مدل شبیه سازی و تلفیق با مدل بهینه سازی در صورتیکه مقدار c^* برابر با 1 mg/l در نظر گرفته شود، حداکثر میزان مجاز دفع پساب برابر با $125/17823$ مترمکعب در روز خواهد بود. این مقدار در صورتیکه c^* برابر با 3 mg/l باشد به $804/44209$ مترمکعب در روز افزایش خواهد یافت. بمنظور جلوگیری از تغییر

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

نام چاه	(m) اختلاف همد		موقعیت (ردیف ، ستون)
	$c^*=1$ mg/l	$c^*=3$ mg/l	
O1	۰	۰/۰۰۰۱	(۲۶،۱۶)
O2	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲	(۵،۱۸)
O3	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۸	(۲۹،۲۷)
O4	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۲	(۱۶،۳۱)
O5	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۱	(۵،۳۷)

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

نام چاه	میزان برداشت (cms)		موقعیت (ردیف ، ستون)
	$c^*=1$ mg/l	$c^*=3$ mg/l	
Q1	۵۸/۳۱۳۲	۶۷/۴۴۲۶	(۱۲،۳۰)
Q2	۵۷/۴۱۴۴	۶۱/۶۰۰۵	(۱۵،۲۱)
Q3	۵۹/۴۶۳۴	۷۴/۸۵۸۰	(۴،۲۸)
Q4	۵۶/۵۲۴۶	۵۵/۹۵۲۷	(۲۸،۳۳)
Q5	۵۱/۷۹۹۳	۲۵/۵۱۰۰	(۱۰،۳۸)



شکل ۳- تغییرات غلظت آلاینده در طول دوره یکساله ($c^*=1$ mg/l)

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.

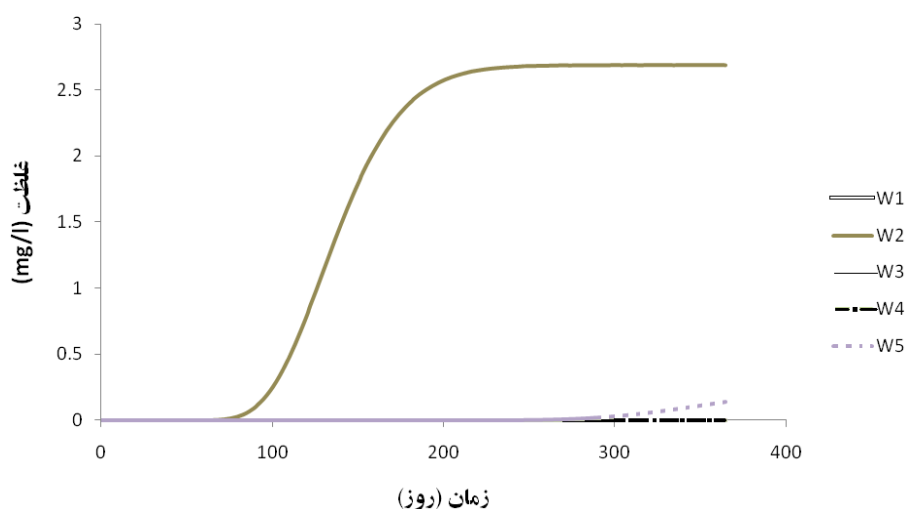
جدول ۵- مقدار تجمعی ورود آلاینده به چاه‌های بهره برداری در پایان دوره یکساله

نام چاه	(mg/l) میزان کل آلاینده پس از یک سال		موقعیت (ردیف ، ستون)
	$c^*=1$ mg/l	$c^*=3$ mg/l	
W1	۰	۰	(۱۲،۳۰)
W2	۰/۵۰۵۳	۲/۶۸۷	(۱۵،۲۱)
W3	$۲/۰۴ \times 10^{-۶}$	$۵/۵۵ \times 10^{-۵}$	(۴،۲۸)
W4	$۴/۱۷ \times 10^{-۶}$	$۹/۶۵ \times 10^{-۵}$	(۲۸،۳۳)
W5	۰/۱۳۲۹۷	۰/۱۳۷۶	(۱۰،۳۸)

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 $c^*=3$ mg/l صحیح باشد، با استفاده از طرح پیشنهادی علاوه بر امکان دفع صحیح مقادیر نسبتاً 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 $c^*=1$ mg/l نیز بعنوان حداکثر غلظت مجاز آلودگی در نظر 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



شکل ۴ - تغییرات غلظت آلاینده در طول دوره یکساله ($c^* = 3 \text{ mg/l}$)

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 Lansley 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.

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