

## Optimal Design of the Groundwater Treatment System Using Hybrid Bioremediation and Pump and Treat Technologies

M. Saeedi<sup>1</sup> and H. Hosseinzadeh<sup>2\*</sup>

### Abstract

Optimal groundwater bioremediation formulation are often complex, nonlinear, and involve intensive computations. Population-based optimization techniques allow solution of more complex nonlinear problems compared to the traditional gradient-based approaches, but computationally they are more intensive. For the first time, this study, proposed ant colony optimization (ACO) algorithm for groundwater bioremediation problems. Performance is compared to the hybrid genetic algorithm and simulated annealing. Rates of injection and extraction pumping and well locations are decision variables. The BIOPLUMEII is used as simulation model. Results showed the phenomenal capability of ACO algorithm in cutting calculation cost, in comparison to Hybrid simulated annealing and genetic algorithm, with a minor calculation error of 1.8%. Optimization results showed that ACO note worthily reduces computational time (56%) compared to the hybrid genetic algorithm and simulated annealing. ACO can be used as an alternative method for solving larger-scale groundwater remediation problems.

**Keywords:** Groundwater, Contaminant plume, Bioremediation, Ant colony optimization.

Received: April 4, 2011  
Accepted: April 24, 2012

## طراحی بهینه سیستم تصفیه آلودگی آبهای زیرزمینی با استفاده از ترکیب تکنولوژی‌های احیای بیولوژیکی و پمپاژ تصفیه

محسن سعیدی<sup>۱</sup> و حجت حسینزاده<sup>۲\*</sup>

### چکیده

مسائل مربوط به طراحی بهینه احیای آبهای زیرزمینی بسیار پیچیده، غیرخطی و از نظر محاسباتی پر هزینه هستند. روش‌های فراکاووشی مختلفی برای طراحی بهینه این مسائل مورد استفاده قرار گرفته که نتایج مناسبی را به همراه داشته است، اما اکثر آنها از نظر زمان اجرای محاسبات بسیار پرهزینه بوده اند. در این تحقیق برای اولین بار از الگوریتم جامعه مورچگان برای حل مسائل تصفیه آلودگی آبهای زیرزمینی استفاده شده است و کارایی آن با الگوریتم ترکیبی نورد شبیه‌سازی شده و الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. در مسئله موردی بررسی شده محل چاه‌ها و مقادیر تزریق و تخلیه از این نقاط، به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده‌اند و شبیه‌سازی جریان کمی و کیفی آبهای زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار BIOPLUMEII انجام یافته است. با توجه به خصوصیات الگوریتم مورچه‌ها، با گسسته‌سازی مقادیر دبی‌های پمپاژ و تخلیه تعداد فراخوانی شبیه ساز به مقدار قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. خطای ناشی از گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم در حدود ۱/۸ درصد است و این در شرایطی است که کاهش زمان محاسبات و تعداد فراخوانی شبیه‌ساز در حدود ۵۶ درصد است. با پیچیده‌تر شدن مشخصات آبخوان و گسترش ابعاد مسئله، کاهش زمان ناشی از این رویکرد اهمیت بیشتری خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** آبهای زیرزمینی، هاله آلودگی، احیای بیولوژیکی، الگوریتم جامعه مورچه‌ها

تاریخ دریافت مقاله: ۱۵ فروردین ۱۳۹۰  
تاریخ پذیرش مقاله: ۵ اردیبهشت ۱۳۹۱

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: Hosseinzadeh@iust.ac.ir

2- PhD. candidate, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: Hosseinzadeh@iust.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

هزینه، با توجه به ملاحظات مدیریتی بسیار مشکل و ناممکن است. از این رو با ترکیب مدل‌های شبیه سازی و مدل‌های بهینه‌یابی می‌توان این مشکل را حل کرد. یک مدل شبیه سازی- بهینه‌یابی (S/O) در مسائل احیا، از یک برنامه جریان آب زیرزمینی و انتقال آلاینده‌ها در حین برنامه بهینه‌یابی استفاده می‌کند به صورتی که بهترین راه حل را با توجه به ملاحظات مهندسی و رویکردهای مدیریتی در اختیار طراح قرار می‌دهد. در اکثر تحقیقات صورت گرفته مدل‌های S/O برای طراحی سیستم‌های PT<sup>۴</sup> استفاده شده‌اند (Peralta et al., 2003) و از طرفی دیگر روشهای بهینه‌یابی متنوعی برای حل مسائل مدیریتی احیای آبهای زیرزمینی بکار رفته است.

برای حل مسائل مدیریتی آبهای زیرزمینی روش‌های سنتی مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه ریزی غیر خطی، برنامه ریزی پویا و روشهای جدیدتر مانند نورد شبیه سازی شده (Marryott, 1996) و ژنتیک الگوریتم (McKinney and Lin, 1994; Ritzel et al., 1994; Yoon and Shoemaker, 1999) استفاده شده است. حل عددی مشتقات در مسائل غیرخطی و غیر محدد احیای آلودگی آبهای زیرزمینی بسیار پیچیده است. روش‌های جدید عملیات مشتق تابع هدف نسبت به متغیرهای تصمیم را حذف می‌کنند. همچنین نیازی به مشتق پذیری تابع هدف نیست، بنابراین می‌توان توابع هدف دقیقتری برای توصیف مسئله تعریف کرد. این روشهای جدید موسوم به فراکاشی هستند و به صورت بسیار ساده با مدل شبیه ساز ارتباط برقرار می‌کنند. مشکل عمده استفاده از این روشهای بهینه‌یابی در ترکیب با مدل‌های شبیه‌سازی آبهای زیرزمینی طولانی بودن مدت زمانی است که الگوریتم به جوابهای بهینه همگرا می‌شود. با توجه به اینکه اساس جستجوی این روشها بصورت تصادفی- احتمالاتی است، تعداد تکرارهای زیادی لازم است تا برنامه بتواند فضای شدنی جوابها را بصورت موثر جستجو کند. در هر بار فراخوانی مدل شبیه ساز مدت زمان قابل توجهی برای اجرای آن صرف می‌شود و این در حالی است که در یک مدل S/O شاید هزاران بار این کار تکرار شود. از دیرباز روشهای مختلفی برای توسعه الگوریتم‌های بهینه‌یابی و بهبود عملکرد آنها به خصوص از نظر کاهش زمان محاسباتی، انجام شده است (Dorigo and Gambardella, 1997) و اکنون نیز زمینه تحقیقاتی مهمی در علوم مختلف به شمار می‌آید. یکی از روشهای موجود بهینه‌یابی الگوریتم جامعه مورچگان است. استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان دارای فرمول‌سازی مستقیم بوده و نیازی به محاسبه مشتقات تابع هدف ندارد بلکه فضای جواب را بصورت هوشمند جستجو می‌کند. این الگوریتم فضای جواب را گسسته کرده

زمانی که صحبت از احیای آبهای زیرزمینی آلوده و جلوگیری از انتشار آن می‌شود، بصورت کلاسیک یعنی استخراج آب آلوده و تصفیه آن در سطح زمین استنباط می‌شود که به اسم تکنولوژی پمپاژ-تصفیه شناخته می‌شود (Flathman et al., 1993). اخیراً تکنولوژی‌های احیای مختلفی مطرح می‌شود که هر کدام از آنها دارای مزایا و معایبی هستند. همچنین قابلیت استفاده از آنها در هر شرایطی امکان‌پذیر نیست. یکی از این تکنولوژی‌ها، احیای بیولوژیکی است که به عنوان یک تکنولوژی موثر در کاهش آلاینده‌های آلی به خصوص در فاز محلول، شناخته می‌شود. بسیاری از کاربردهای تکنولوژی احیای بیولوژیکی در تصفیه هیدروکربن‌های نفتی مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و اگزایلین (BTEX) گزارش شده است (Hinchee et al., 1994). از مزیت‌های این تکنولوژی می‌توان به کم هزینه بودن احداث تسهیلات آن، رویکردی درجا، حذف دائمی آلاینده و در کل به صرفه بودن آن اشاره کرد (Cookson, 1995). احیای بیولوژیکی می‌تواند شامل یک سیستم زیرزمینی چاهها یا کانال‌های زیرزمینی باشد. آب تزریق شده مواد مغذی (مانند نترات و فسفات) و پذیرنده الکترون<sup>۲</sup> (مانند اکسیژن، نترات، سولفات، آهن، دی اکسیدکربن) را برای رشد میکرواورگانیزم‌ها فراهم می‌کند و میکرواورگانیزم‌ها آلاینده را به ترکیبات بی خطر یا ترکیبات معدنی تبدیل می‌کنند (Alexander, 1994). یکی از معایب این تکنولوژی مربوط به طولانی شدن زمان دوره احیا است. مواد تزریق شده به آبخوان به علت پایین بودن سرعت جریان آب زیرزمینی ممکن است به موقع پخش نشود و باعث صرف هزینه‌های بیشتری در احداث چاه در قسمت‌های بیشتری از آبخوان شود. برای رفع این ضعف، سیستم احیای درجای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی با سیستم پمپاژ-تصفیه همراه می‌شود و تکنولوژی ترکیبی را برای رفع آلودگی تشکیل می‌دهند. در پایین دست جریان آبهای زیرزمینی و توده آلودگی چندین چاه تخلیه برای استخراج آب آلوده و همچنین سهولت حرکت مواد احیا کننده در نظر گرفته می‌شوند، به نوعی که سرعت جریان آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر افزایش پیدا می‌کند. بر حسب نوع آلاینده و ملاحظات اقتصادی، تکنولوژی‌هایی مانند برج هوادهی و کربن فعال برای تصفیه آب استخراج شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله اقدام به ترکیب تکنولوژی‌های پمپاژ-تصفیه و احیای بیولوژیکی در رفع آلودگی هیدروکربن‌های محلول نفتی شده است و در ادامه نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

استفاده تنها از مدل شبیه ساز برای طراحی بهینه بر اساس کمترین

p مقدار جریمه است که برابر شدت اختلاف تخطی از قیود ضرب در مقداری ثابت تا جواب بدست آمده قابل رقابت با جواب‌های ممکن نباشد.

هزینه تسهیلات مربوط به تخلیه (تصفیه غیر درجای کربن فعال) و تزریق (ایستگاههای تزریق) وابسته به ظرفیت آنها است. در طراحی کاربردی مهندسی هزینه تسهیلات یک متغیر پیوسته نبوده و تنها مقادیر معینی از آنها وجود دارد. علت این امر تجاری بودن اجزا مانند ابعاد لوله‌ها، پمپها و تسهیلات تولید شده در کارخانه‌ها است. بنابراین از یک تابع گسسته برای ارائه هزینه احداث تسهیلات استفاده شده است. تابع هزینه مربوط به تسهیلات تزریق و تخلیه به ترتیب بر اساس روابط (۲) و (۳) محاسبه خواهد شد. تابع هدف بصورت گسسته بوده و دارای متغیرهای ترکیبی-صحیح<sup>۱</sup> است و از طریق روش‌های بر اساس مشتق قابل حل نیست. برای این منظور از روش‌های فراکاووشی مانند SA<sup>۲</sup>، GA<sup>۳</sup> و ACO<sup>۴</sup> می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق از روش ACO برای حل مسئله استفاده شده است.

$$D\left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e)\right) = 0 \quad \text{if} \quad \sum_{e=1}^{M^i} p(e) = 0$$

$$= D_q \quad \text{if} \quad CD_{q-1} < \sum_{e=1}^{M^i} p(e) \leq CD_q$$

$$q = 1, 2, \dots, M^Q$$

$$E\left(\sum_{e=1}^{M^e} p(e)\right) = 0 \quad \text{if} \quad \sum_{e=1}^{M^e} p(e) = 0$$

$$= E_q \quad \text{if} \quad CE_{q-1} < \sum_{e=1}^{M^e} p(e) \leq CE_q$$

$$q = 1, 2, \dots, M^R$$

جائیکه  $D_q$  هزینه تسهیلات مربوط به تزریق هنگامی که دبی تزریق بین ظرفیت تزریق  $CD_{q-1}$  و  $CD_q$  باشد،  $M^Q$  تعداد کل ظرفیتهای طراحی تزریق، ظرفیت تزریق  $CD_0$  برابر صفر است. هزینه تسهیلات مربوط به تصفیه کربن فعال هنگامیکه دبی تخلیه بین ظرفیت تخلیه  $CE_{q-1}$  و  $CE_q$  باشد،  $M^R$  تعداد کل ظرفیتهای طراحی تخلیه، ظرفیت تخلیه  $CE_0$  برابر صفر است.

قیدهای مربوط به مدل بهینه یابی احیای بیولوژیکی و پمپاژ-تصفیه آبهای زیرزمینی به شرح زیر است.

و دنبال جوابهای بهینه می‌گردد. عملیات گسسته سازی باعث کاهش دقت جوابهای مسئله برای یک متغیر پیوسته (دبی‌های تزریق و تخلیه) می‌شود، ولی در عین حال احتمال کاهش زمان محاسبات نسبت به سایر الگوریتم‌ها وجود دارد. در این تحقیق نحوه عملکرد الگوریتم جامعه مورچگان، برای اولین بار در حل مسئله احیای بیولوژیکی و پمپاژ-تصفیه آلودگی آبهای زیرزمینی بررسی و نتایج بدست آمده تحلیل شده است. یکی از اهداف اصلی از انجام تحقیق معرفی رویکردی برای کاهش زمان محاسبات مربوط به سیستم S/O احیای آلودگی آبهای آلودگی زیرزمینی است. در سیستم بهینه احیای بیولوژیکی و پمپاژ-تصفیه، تابع هدف به همراه قیدهای مسئله فرمول بندی شده است. برای شبیه سازی آبخوان آلوده از یک مطالعه موردی فرضی استفاده شده و مدل آبهای زیرزمینی به صورت دو بعدی فرض شده است.

## ۲- فرمول بندی سیستم طراحی بهینه احیای بیولوژیکی و پمپاژ-تصفیه

بهینه سازی سیستم احیای بیولوژیکی و پمپاژ-تصفیه شامل پیدا کردن محل چاهها، دبی تخلیه و تزریق و ظرفیت تسهیلات مورد نیاز برای انجام عملیات تزریق، تخلیه و تصفیه است. هدف، حداقل سازی هزینه کل سیستم شامل پمپاژ-تصفیه، احداث چاه و تسهیلات مربوط به تزریق است. برای انجام این فعالیت ابتدا تابع هدف مورد نظر را تشکیل داده و قیدهای مربوط به هیدرولیک جریان و کیفیت غلظت آلاینده فرمول بندی می‌شوند. تابع هدف مورد نظر بصورت رابطه (۱) ارائه می‌شود (Shieh and Peralta, 2005):

$$\text{Minimize } Z = \sum_{e=1}^{M^P} C^P(e)p(e) + \sum_{e=1}^{M^P} C^{IP}(e)IP(e) + D\left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e)\right) + E\left(\sum_{e=1}^{M^e} p(e)\right) + P$$

جائیکه  $Z$  هزینه احداث و بهره برداری از سیستم احیای بیولوژیکی،  $e$  شمارنده چاههای تزریق و تخلیه،  $p(e)$  دبی تزریق یا تخلیه در محل چاه  $e$ ،  $C^P(e)$  هزینه تزریق (اکسیژن، مواد مغذی و پمپاژ) یا تخلیه (شامل تصفیه و پمپاژ)،  $M^P$  تعداد چاههای پمپاژ و تخلیه،  $C^{IP}(e)$  هزینه احداث چاههای تزریق و تخلیه برای هر چاه،  $IP(e)$  متغیر صفر یا یک برای وجود و عدم وجود چاه در موقعیت  $e$ ،  $D\left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e)\right)$  هزینه احداث تسهیلات مربوط به تزریق،  $M^i$  کل تعداد چاههای تزریق،  $E\left(\sum_{e=1}^{M^e} p(e)\right)$  هزینه احداث تسهیلات تخلیه و تصفیه خانه،  $M^e$  کل تعداد چاههای تخلیه،  $M^P = M^i + M^e$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (K_i \frac{\partial h}{\partial x_i}) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C) + q_s C_s + \sum R_n \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\theta O)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta D_{ij} \frac{\partial O}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i O) + q_s O_s + \sum R_n \quad (8)$$

$$\sum R_n = -\rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} - \lambda_1 \theta C - \lambda_2 \rho_b \bar{C} \quad (9)$$

که  $S_s$  ضریب ذخیره ویژه آبخوان،  $q_s$  دبی تراوش چاه و یا چشمه در واحد حجم آبخوان،  $\theta$  ضریب تخلخل آبخوان (بی بعد)،  $C$  غلظت آلاینده ( $ML^{-3}$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $x_{ij}$  فاصله در طول محورهای مختصات ( $L$ )،  $D_{ij}$  تانسور ضرایب پخشیدگی هیدرودینامیکی ( $LT^{-2}$ )،  $v_i$  سرعت جریان ( $LT^{-1}$ )،  $C_s$  غلظت آلاینده در چاه تخلیه با تزریق ( $ML^{-3}$ )،  $\sum R_n$  مجموعه واکنشهای شیمیایی ( $ML^{-3}T^{-1}$ )،  $O$  غلظت اکسیژن ( $ML^{-3}$ )،  $C_s$  غلظت اکسیژن در چاه تخلیه با تزریق ( $ML^{-3}$ )،  $\rho_b$  چگالی توده ای آبخوان  $ML^{-1}$ ،  $\bar{C}$  غلظت مربوط به آلاینده جذب شده بر روی دانه خاک  $MM^{-1}$ ، ضریب واکنشی درجه اول برای فاز محلول  $T^{-1}$ ، ضریب واکنشی درجه اول برای فاز جذب شده خاک  $T^{-1}$  است. لازم به ذکر است که رابطه (۹) برای اکسیژن نیز صادق است و فقط کافیست به جای  $C$  و  $\bar{C}$  از  $O$  و  $\bar{O}$  استفاده شود.

روند حل معادلات به این گونه‌ای است که معادله جریان ابتدا توسط روش تفاضلات محدود ضمنی حل می‌شود و مقادیر هد هیدرولیکی در هر یک از گره‌ها بدست می‌آید. در ادامه با استفاده از رابطه دارسی که ارتباط بین سرعت جریان و هد هیدرولیکی را مشخص می‌کند، مقادیر سرعت جریان نیز محاسبه می‌شود. در این بخش روش تفاضلات محدود صریح بکار گرفته شده است. با بدست آمدن مقادیر سرعت می‌توان معادلات انتقال (۷) و (۸) را حل کرد. روش حل معادلات انتقال از دو بخش تشکیل شده است. در بخش اول ترم مربوط به سرعت حل می‌شود که در بسیاری از مسائل آبهای زیرزمینی غالب بر ترم‌های دیگر است. این بخش با استفاده از رویکرد جستجوی ذرات که یک رویکرد لاگرانژی است حل می‌شود. در ادامه با استفاده از روش مشخصه‌ها (MOC) (Borden and Bedient, 1986; Konikow and Bredehoeft, 1978)، بقیه ترم‌ها نیز محاسبه می‌شوند و مقادیر غلظت در پایان یک گام زمانی بدست می‌آید. مراحل تا پایان دوره شبیه سازی تکرار خواهند شد. نکته ای که در این مدل قابل ذکر است چگونگی تغییرات غلظت ناشی از واکنشهای شیمیایی و بیولوژیکی بین

۱- دبی حداکثر و حداقل تخلیه و تزریق در سیستم احیا

۲- حداکثر ارتفاع هیدرولیکی در چاههای تخلیه و تزریق

۳- غلظت هدف بعد از دوره اجرای برنامه احیا

$$C_{k,Te} \leq C_{cl} \quad \forall k \in \psi \quad (4)$$

$C_{k,Te}$  غلظت آلاینده در گره  $k$  در انتهای دوره احیای  $T_e$  (مقدار این غلظت ۳ میلی گرم در لیتر است)،  $C_{cl}$  غلظت استاندارد،  $\psi$  مجموعه ای از موقعیت‌ها که غلظت باید محدود به مقدار مشخصی باشد.

۴- حداکثر غلظت در چاههای کنترلی (برای جلوگیری از مهاجرت آلاینده‌ها به پایین دست و بالادست)

$$C_{o,Te} \leq C_{ca} \quad \forall o \in \phi \quad (5)$$

$C_{o,Te}$  غلظت آلاینده در گره  $o$  در انتهای دوره احیای  $T_e$  (مقدار این غلظت ۱ میلی گرم در لیتر است)،  $C_{ca}$  حداکثر غلظت مجاز،  $\phi$  مجموعه چاههای کنترلی.

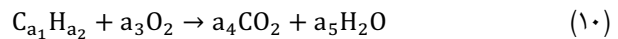
تسهیلات مربوط به تخلیه و تزریق قبل از شروع احیای بیولوژیکی ساخته می‌شوند. هزینه مربوط به این تسهیلات وابسته به ظرفیت‌های مورد نیاز است. تسهیلات مربوط به تزریق و تصفیه نباید از حداکثر دبی تزریق و تخلیه، به ترتیب، کمتر باشند.

### ۳- مدل‌های احیای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی آلوده

برای ارزیابی رفتار فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی یک آبخوان در مقابل اعمال رویکردهای مدیریتی مانند پمپاژ و تزریق، شبیه سازی عددی چگونگی تغییرات جریان آب زیرزمینی، آلودگی و واکنشهای شیمیایی و بیولوژیکی مربوطه ضروری است. در این تحقیق از مدل زیورزمینی و همچنین معادلات انتقال استفاده شده است. این مدل بصورت گسترده برای شبیه‌سازی احیای هوازی بیولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است. محققان مختلفی برای شبیه سازی فرآیند احیای بیولوژیکی هیدروکربن‌های محلول در سایت‌های آلوده از این مدل استفاده کرده‌اند (Chiang et al., 1989; Burgess et al., 1993; Wiedemeier et al., 1993). مدل BIOPLUME با دقت بسیار خوبی مهاجرت و کاهش هیدروکربن‌های اتیل بنزن، بنزن، تولوئن و اگزایلین را در سایت هیل نیروی هوایی یوتا<sup>۱</sup> پیش بینی کرد (Wiedemeier et al, 1994).

معادلات حل شده توسط این مدل بصورت روابط (۶)، (۷)، (۸) و (۹) هستند.

اکسیژن و آلایندگی مورد نظر است. واکنش شیمیایی بین یک آلایندگی و اکسیژن را بصورت رابطه (۱۰) می‌توان ذکر کرد.



که  $a_1$  تا  $a_5$  ضرایب ثابت (بی بعد) هستند. همان طوری که مشاهده می‌شود واکنش بین هیدروکربن‌ها طی یک شرایط خاصی می‌تواند منجر به تولید محصولات بی خطر شود. شرایط این واکنش را میکرواورگانیزم‌ها به همراه اکسیژن تزریق شده فراهم می‌کنند. در مدل BIOPLUMEII برای تبدیل هیدروکربن به اکسیژن و برعکس از سنتیک واکنش ناگهانی استفاده می‌شود (Rifai and Bedient, 1990). در این رویکرد فرض بر آن است در محیطی که آلایندگی از اکسیژن مقدار بیشتری داشته باشد، تمام مقادیر اکسیژن را مصرف می‌کند و برعکس. توده‌های مربوط به آلایندگی و اکسیژن محلول با استفاده از اصل برهم نهی برای شبیه‌سازی واکنش ناگهانی بین اکسیژن و آلایندگی با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در یک گره غلظت اکسیژن و آلایندگی با روابط (۱۱) و (۱۲) کاهش پیدا می‌کند.

$$\Delta C_{RC} = O/F; \quad O=0 \text{ if } C > O/F \quad (11)$$

$$\Delta C_{RO} = CF; \quad C=0 \text{ if } 0 > CF \quad (12)$$

جائیکه  $\Delta C_{RC}$  تغییرات غلظت آلایندگی،  $F$  ضریب استوکیومتری آلایندگی با اکسیژن (در این تحقیق برای آلایندگی فنول مقدار ۳ است)،  $\Delta C_{RO}$  تغییرات غلظت اکسیژن است. مدل BIOPLUMEII می‌تواند با استفاده از داده‌های هیدروژئولوژی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آلایندگی، غلظت‌های منابع آلایندگی و غلظت اکسیژن محلول اولیه کالیبره شود. همچنین BIOPLUMEII دارای محدودیت‌هایی است. برای فرآیندهای کاهش تدریجی آلایندگی در شرایط هوایی عملکرد مناسبی نخواهد داشت و علت این امر فرض سینتیک ناگهانی شیمیایی است. در این تحقیق از BIOPLUMEII برای شبیه‌سازی انتقال آلایندگی در مدل مدیریتی S/O استفاده شده است.

#### ۴- مدل بهینه‌یابی

ACO یک الگوریتم فراکاوشی است که از رفتار مورچه‌ها در طبیعت گرفته شده است. الگوریتم سیستم مورچه‌ها (AS)<sup>۱۱</sup> اولین الگوریتم ACO بود که پیشنهاد گردید (Colormi et al., 1991). از جمله الگوریتم‌های دیگری که تاکنون معرفی شده‌اند می‌توان به سیستم جامعه مورچه‌ها (ACS)<sup>۱۲</sup> (Dorigo and Gambardella, 1997)، سیستم مورچه‌های بیشینه-کمینه (MMAS)<sup>۱۳</sup> (Stutzle and Hoos, 1997) اشاره نمود. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد که فعالیتهای محدودی در منابع کمی و کیفی آب با

استفاده از الگوریتم‌های ACO صورت گرفته است و این در حالی است که نتایج رضایت بخشی را به همراه داشته است (جلالی، ۱۳۸۴). تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک غیر اشباع (Abbaspour et al., 2001)، حل مسئله شبکه توزیع آب (Maier et al., 2003)، بهره برداری از مخزن (Jalali, 2006) نشان از قابلیت‌های بالای الگوریتم ACO در رقابت با الگوریتم‌های دیگر دارد.

این الگوریتم بر اساس الهام از رفتار مورچه‌ها در طبیعت برای پیدا کردن غذا بوده است. مورچه‌ها از ماده ای به نام فرومان برای علامت گذاری مسیرهای غذا استفاده می‌کنند. در نهایت بهترین مسیرها با بیشترین مقدار ماده فرومان مشخص می‌شود. فرآیند انتخاب مسیر توسط هر مورچه بصورت رابطه احتمالاتی (۱۳) است.

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij} \alpha \eta_{ij} \beta}{\sum \tau_{ij} \alpha \eta_{ij} \beta} \quad (13)$$

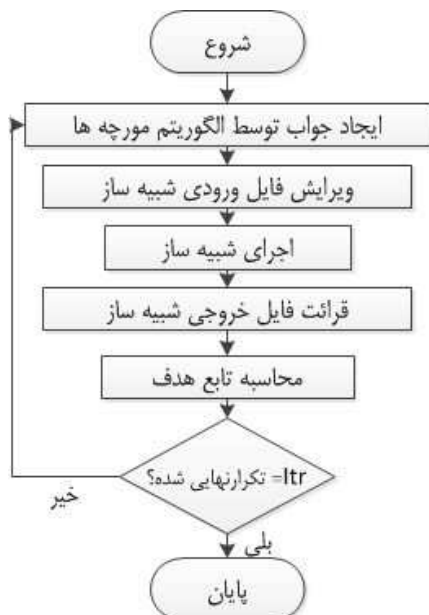
$\tau_{ij}$  مقدار فرومان در مسیر  $ij$ ،  $\eta_{ij}$  مقدار فراکاوشی از کیفیت مسیر  $ij$  به  $\alpha$  و  $\beta$  احتمال انتخاب مسیر  $ij$  از طرف هر مورچه؛  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای کنترل فرومان هستند. در هر تکرار الگوریتم تعدادی از مورچه‌ها در مسیرهای مشخص شده حرکت می‌کنند و نتایجی را برای مقدار تابع هدف به ثبت می‌رسانند و بهترین جواب از بین آنها مشخص می‌شود. فرومان مسیر متناظر با بهترین جواب توسط رابطه (۱۴) تقویت می‌شود و نرخ تغییرات فرومان مطابق رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$\tau_{ij} \rightarrow (1-\rho)\tau_{ij} + \rho\Delta\tau_{ij} \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij} = 1/G_{gb} \quad (15)$$

که در آن  $\rho \in [0,1]$  ضریب تخیر،  $\Delta\tau_{ij}$  نیز مقدار تغییرات فرمان کلیه مسیرها و  $G_{gb}$  بهترین جواب بدست آمده تا آن تکرار است. با انجام این بهنگام سازی موضعی در صورتیکه مورچه ای از یک جزء مسیر عبور نماید با کاهش فرمان آن، این امکان را ایجاد می نماید که سایر مورچه‌ها با عبور از سایر جزء مسیرها، فضای جستجو را وسعت دهند. الگوریتم‌های مختلف مورچه‌ها در چگونگی به روز کردن فرومان در هر تکرار با یکدیگر متفاوت هستند که در این تحقیق از الگوریتم  $ACS_{gb}$  استفاده شده است. چگونگی به روز رسانی فرومان در این الگوریتم مطابق با رابطه (۱۴) و (۱۵) است. پارامترهای مربوط به الگوریتم مورچه‌ها مانند  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\rho$  با استفاده از تحقیقات گذشته و همچنین تحلیل حساسیت بدست می‌آیند. برای ارتقای کیفیت الگوریتم  $ACS_{gb}$  از رویکرد نوین ارتقای فرومان استفاده شده است. زمانی که یک جواب بهینه‌ای الگوریتم پیدا

است. در مرزهای شمالی و جنوبی جریانی وجود ندارد. مدل آبهای زیرزمینی بصورت دائمی فرض شده است و ضریب جذب آلاینده در محیط آبخوان برابر ۱ در نظر گرفته شده است که نشان در وجود تعادل جذبی بین محیط آب و خاک دارد.



شکل ۱- فلوجارت نحوه اتصال مدل شبیه ساز BIOPLUME و بهینه یابی ACO

شکل ۲ ترکیب توده آلودگی را بعد از ۵ سال و بدون اعمال هیچگونه عملیات مدیریتی نشان می‌دهد. توده به سمت پایین دست حرکت کرده و گسترده می‌شود بطوریکه به چاههای کنترل کیفیت آب خواهد رسید. کاهش هوازی که بصورت طبیعی انجام می‌شود بعد از این مدت تنها ۱۶٪ آلاینده را تجزیه می‌کند. بنابراین برای جلوگیری از مشاهده آلاینده در چاههای کنترل باید یک سیستم درجای احیای بیولوژیکی و پمپاژ تصفیه در منطقه طراحی شود. این سیستم علاوه بر محدود کردن توده آلودگی احیای بیولوژیکی آبخوان را تقویت می‌کند.

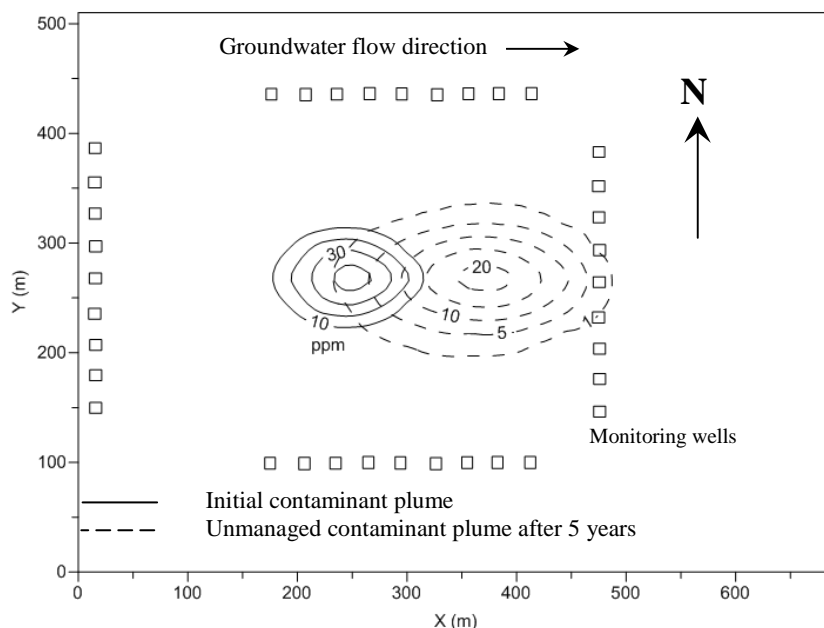
برای طراحی سیستم احیای بیولوژیکی درجا و پمپاژ-تصفیه از چاههای تزریق و تخلیه استفاده می‌شود. هفت چاه تزریق امکان تزریق اکسیژن و مواد مغذی را در آبخوان دارند. دبی تزریق آنها بین صفر تا ۱/۲۶ لیتر بر ثانیه می‌تواند باشد. حد بالایی و پایینی هد هیدرولیکی برای چاههای تزریق به ترتیب ۳۳/۵ و ۲۷/۷ متر در نظر گرفته شده است. غلظت اکسیژن اولیه در محیط آبخوان 5ppm است.

می‌کند، میزان فرومان در مسیر بهینه جدید به اندازه میزان فرومان بهترین جواب قبلی می‌شود تا الگوریتم در تکرارهای بعدی با احتمال انتخاب بیشتری مسیر بهینه جدید را در نظر بگیرد. این رویکرد معروف به  $PP^{۴}$  است. رویکرد دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته  $PPR^{۱۵}$  است. با تغییر جزئی از مشخصات جواب بهینه بدست آمده اقدام به جستجوی موضعی می‌کند تا جوابهای بهتری بدست آورد. این تغییر می‌تواند تصادفی باشد و یا اینکه از بین جوابهای تولید شده انتخاب گردد. رویکرد بعدی استفاده شده در تحقیق  $PRI^{۱۶}$ ، برای جلوگیری از همگرایی الگوریتم اعمال شده است. وقتی در چندین تکرار جواب بهینه تغییر پیدا نکند مقادیر فرومان در همه مسیرها به غیر از مسیر بهینه کاهش می‌یابد که این مسئله باعث همگرایی زودرس الگوریتم می‌شود. از این رو با عدم تغییر جواب بهینه در چندین تکرار فرومان در تمامی مسیرها به مقدار اولیه تغییر داده می‌شود تا فضای جستجو گسترده‌تر شود [جلالی، ۱۳۸۴].

نحوه اتصال برنامه بهینه یابی کلونی مورچه‌ها به شبیه‌ساز BIOPLUME در شکل ۱ بصورت فلوجارت آمده است. مشابه بسیاری از نرم افزارها فایل ورودی نرم افزار BIOPLUME متنی است. از داخل محیط برنامه نویسی با توجه به سناریوهایی که برای متغیرهای تصمیم (دبی و محل چاهها) تعیین می‌شود فایل متنی ورودی نرم افزار BIOPLUME ویرایش می‌شود. بعد از ویرایش نرم افزار اجرا شده و فایل متنی خروجی استخراج می‌شود. در مرحله بعد نیز فایل خروجی متنی از داخل محیط برنامه نویسی فراخوانی شده و مقادیر متغیرهای حالت هد هیدرولیکی و غلظت در نقاط آبخوان بدست می‌آید. با مقادیر بدست آمده از متغیرهای حالت قیدهای مسئله کنترل می‌شوند و در نهایت مقدار تابع هدف برای یک تکرار بدست می‌آید.

## ۵- مطالعه موردی

مسئله‌ای که مورد بررسی قرار خواهد گرفت از تحقیق (Shieh and Peralta, 2005) بر گرفته شده است. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه فرضی را به همراه توده آلودگی اولیه نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز پارامترهای ورودی شبیه ساز BIOPLUME را برای منطقه‌ای با ابعاد ۵۱۰ متر در ۶۹۰ متر نشان می‌دهد. آبخوان همگن بوده و دارای ضریب هدایت هیدرولیکی  $6 \times 10^{-6} m/s$  با ضخامت ۱۵ متر است. در مرزهای غربی و شرقی به ترتیب دو هد هیدرولیکی ثابت ۳۰/۵ و ۲۷/۷ متر وجود دارد. جریان آب زیرزمینی از سمت غرب به شرق بوده و شیب هیدرولیکی اولیه برابر ۰/۰۰۴



شکل ۲- توده آلودگی اولیه (ppm) و توده مدیریت نشده بعد از ۵ سال

حرکت توده آلودگی عمل می‌کنند. علاوه بر آن آب آلوده به سطح زمین پمپاژ شده و در سیستم تصفیه سطحی مورد پالایش قرار می‌گیرد.

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل شبیه ساز BIOPLUME

واحد	مقادیر	پارامترهای ورودی
-	۱۹×۲۵	ابعاد شبکه
<i>m - m</i>	۱۹×۲۵	ابعاد سلول
<i>m/s</i>	$6 \times 10^{-5}$	ضریب هدایت هیدرولیکی
<i>m</i>	۱۵	ضخامت آبخوان
-	۰/۰۰۴	شیب هیدرولیکی
<i>m</i>	۱۰	ضریب پخشیدگی طولی
<i>m</i>	۲	ضریب پخشیدگی عرضی
-	۰/۳	تخلخل موثر
-	۱	ضریب جذب
-	۱	ضریب ناهموسوبی
<i>ppm</i>	۸	غلظت اکسیژن تزریقی
<i>ppm</i>	۵	غلظت اکسیژن اولیه در آبخوان

شکل ۳ همچنین چاههای کنترلی را نیز مشخص می‌کند. این چاهها در عملیات بهینه یابی مستقیماً وارد نمی‌شوند و تنها به عنوان کنترل غلظت در پایان دوره زمانی شبیه‌سازی فرا خوانده می‌شوند. به عبارت دیگر این چاهها برای کنترل اینکه توده آلودگی در دوره شبیه‌سازی (۳ سال) مهار می‌شود یا خیر، استفاده می‌شوند. به علت اینکه طبق پتانسیل دبی که برای چاههای تزریق وجود دارد، امکان تزریق آب

البته مقدار اکسیژن محلول اولیه در مناطق توده آلاینده به علت مصرف بیولوژیکی صفر است. تبادل اکسیژن با منطقه غیر اشباع ناچیز فرض شده است. غلظت اکسیژن تزریقی توسط چاههای مربوطه  $8 \text{ ppm}$  در نظر گرفته شده است. نرم افزار BIOPLUME فرض را بر آن داشته که اکسیژن محلول تزریقی از طریق چاهها، مواد مغذی کافی را برای انجام عملیات میکروبی تامین می‌کند.

شکل ۳ محل‌هایی که امکان احداث چاههای تزریق و تخلیه در آنها وجود دارد را نشان می‌دهد. شش چاه در پایین دست توانایی تخلیه آب آلوده از آبخوان با دبی بین صفر تا  $1/26$  لیتر بر ثانیه را دارند که آب را به سمت سیستم تصفیه کربن فعال هدایت می‌کنند. در این مسئله دبی چاههای تزریق و تخلیه به  $7$  مقدار گسسته‌سازی شده‌اند که کوچکترین آنها صفر و بزرگترین آنها  $1/26$  لیتر بر ثانیه است. حد بالایی و پایینی هد هیدرولیکی برای چاههای تخلیه به ترتیب  $30/5$  و  $24/4$  متر است. استاندارد تصفیه برای کل منطقه مورد مطالعه  $3 \text{ ppm}$  لحاظ شده است.

آنچه در تعریف مسئله مشخص است چاههای تزریق در بالادست و چاههای تخلیه در پایین دست در نظر گرفته شده است. توزیع مکانی چاهها به گونه ای بوده است که چاههای تزریق بر روی توده آلودگی قرار داشته باشند. محل چاههای تخلیه نیز طبق انتظار در پایین دست جریان قرار دارند تا مقادیر آلاینده باقی مانده از واکنش‌های میکروبی به سمت پایین دست مهاجرت نکرده و از دامنه سیستم احیای طراحی شده خارج نشوند. این چاهها به عنوان محصور کننده

مقادیر مناسب هر کدام با توجه به طبیعت مسئله مورد حل می‌تواند متفاوت باشد. در این تحقیق با استفاده از مقادیر بدست آمده از تحقیقات گذشته که در حل مسائل مختلف مهندسی و ریاضی وجود داشته است [جلالی، ۱۳۸۴] اجرای الگوریتم شروع شده است و در ادامه برخی از پارامترهای موثرتر، مورد بررسی بیشتری قرار گرفته‌اند تا بتوان به عملکرد مناسبی از الگوریتم دست یافت. پارامترهای ورودی الگوریتم و مقادیر بدست آمده برای بهترین عملکرد در جدول ۳ آمده است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی، مربوط به تعداد مورچه‌های بکار گرفته شده در الگوریتم است. این تعداد از مسئله ای به مسئله دیگر متفاوت است. هر چه پیچیدگی مربوط به فضای جواب بیشتر باشد بالطبع از تعداد بیشتری مورچه باید استفاده شود. از طرف دیگر هر چقدر تعداد مورچه‌ها بالا می‌رود زمان اجرای برنامه نیز بالاتر می‌رود. از این رو رسیدن به تعداد مناسبی از مورچه‌ها نیاز به اجزای متعدد برنامه دارد. در این تحقیق تعداد مناسب مورچه‌ها ۳۰۰ عدد بدست آمد. پارامتر مهم دیگری که زمان اجرای برنامه و میزان همگرایی به جواب بهینه را کنترل می‌کند، تعداد تکرارهای داخلی برنامه جامعه مورچگان است. این پارامتر به همراه تعداد مورچگان تعداد فراخوانی شبیه ساز را مشخص می‌کند. ضرب تعداد مورچه‌ها در تکرارهای داخلی برنامه تعداد دفعاتی را که شبیه ساز اجرا خواهد شد نشان می‌دهد. تعداد تکرارهای داخلی برنامه ۱۵ بدست آمد. مقدار اولیه فرومان در مسیرهای الگوریتم نقطه شروع مسئله را کنترل می‌کند. بین این مقدار، میزان تبخیر و میزان رشد فرومان باید هماهنگی وجود داشته باشد. مطابق با تحقیقات قبلی این مقدار برابر با ۱ در نظر گرفته شد.

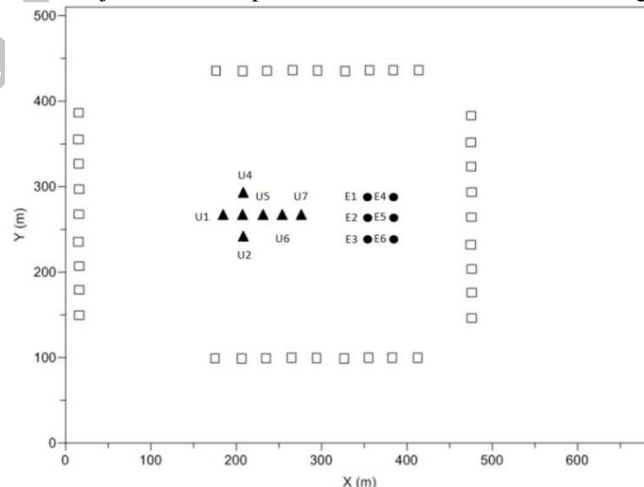
بیش از حد وجود دارد، یک سری از چاههای کنترلی در بالادست جریان یعنی حاشیه غربی، شمالی و جنوبی تعبیه شده است. این مسئله از پخشیدگی ناخواسته آلودگی در بالادست و طرفین جلوگیری می‌کند. حداکثر میزان غلظتی که به چاههای مشاهداتی می‌رسد، نباید به بیش از 1ppm برسد. این موضوع نیز در قالب قیدی وارد معادلات بهینه‌یابی شده است.

ضرایب هزینه جهت تخمین هزینه کل سیستم طراحی در جدول ۲ آمده است. از نکات قابل توجه در ضرایب هزینه می‌توان به خطی بودن رابطه بین دبی تزریق و تخلیه با قیمت تمام شده اشاره کرد. این رابطه بصورت مستقیم بوده و با افزایش دبی تزریق و تخلیه قیمت نیز بصورت خطی افزایش می‌یابد. نکته دیگر بالا بودن هزینه پمپاژ و تصفیه نسبت به هزینه تزریق مواد در آبخوان است که این نسبت به بیش از سه برابر می‌رسد. این مطلب در مورد تسهیلات لازمه برای پمپاژ-تصفیه در مقابل تزریق نیز مشاهده می‌شود و نسبت قیمت‌ها ۱/۵ برابر است. این موضوع پرهزینه بودن امور مربوط به پمپاژ-تصفیه را نشان می‌دهد. هزینه‌های مربوط به تصفیه آب بعد از پمپاژ بر اساس تکنولوژیهای کربن فعال<sup>۱۷</sup> و هزینه احداث تسهیلات مربوط به تزریق و تخلیه براساس ظرفیت عملکرد آنها محاسبه شده است [Shieh and Peralta, 2005]. لازم به ذکر است هزینه‌ها با تبدیل قیمت هر دلار ۱۲۰۰۰ ریال محاسبه شده است.

## ۶- نتایج و بحث

الگوریتم جامعه مورچگان شامل چندین پارامتر ورودی است که

▲ potential injection wells ● potential extraction wells □ monitoring wells



شکل ۳- موقعیت چاههای پمپاژ و تزریق در سیستم بهینه یابی احیای بیولوژیکی



مقدار تبخیر فرومان از مسیرهای مختلف نیز مابین ۰ تا ۰/۲ در نظر گرفته شد و حساسیت مسئله برای تنظیم این پارامتر مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- ضرایب تابع هزینه (ریال)

واحد	مقدار	ضرایب
-	-	$I_P$ ضریب تخفیف
ریال		$C^P$ هزینه تزریق (اکسیژن، مواد مغذی، و پمپاژ) یک لیتر بر ثانیه در طول سال
ریال		$C^P$ هزینه تخلیه (تصفیه و پمپاژ) یک لیتر بر ثانیه در طول سال
ریال		$C^{IP}$ هزینه احداث چاه
ریال		دبی لیتر بر ثانیه 1.26
		دبی لیتر بر ثانیه 2.52
		دبی لیتر بر ثانیه 3.79
		دبی لیتر بر ثانیه 5.05
		دبی لیتر بر ثانیه 6.31
		دبی لیتر بر ثانیه 7.53
ریال		دبی لیتر بر ثانیه 1.26
		دبی لیتر بر ثانیه 2.52
		دبی لیتر بر ثانیه 3.79
		دبی لیتر بر ثانیه 5.05
		دبی لیتر بر ثانیه 6.31
		دبی لیتر بر ثانیه 7.53

در جدول مذکور نتایج بدست آمده با کار (Shieh and Peralta, 2005)، که مطالعه موردی مربوطه را با الگوریتم ترکیبی ژنتیک و نورد شبیه‌سازی شده (PRSA) انجام داده است، مقایسه شده است. گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم دبی تزریق و تخلیه باعث ایجاد خطا در پیدا کردن جواب پیوسته مقادیر دبی شده است. مقدار این خطا حدود ۱/۸ درصد بدست آمده است. اما از طرف دیگر، بکارگیری رویکرد گسسته سازی مقادیر دبی، که در طبیعت الگوریتم جامعه مورچه‌ها وجود دارد، باعث شده است که تعداد دفعات فراخوانی مدل شبیه‌ساز (که بخش اصلی بار زمانی را در این تحقیق به خود اختصاص می‌دهد) کاهش یابد. این مقدار در تحقیق (Shieh and Peralta, 2005) برابر ۱۳۶۰۰ بار بوده است، این در حالی است که برای تحقیق حاضر ۶۰۰۰ بار بدست آمده است. کاهش حدود ۵۶ درصدی تعداد فراخوانی شبیه ساز باعث کاهش عمده ای در زمان محاسبات کل مدل S/O شده است. در این تحقیق بیش از ۹۰ درصد زمان محاسبات مربوط به اجرای شبیه ساز کمی و کیفی در آبهای زیرزمینی بوده است و این در حالی است که کمتر از ۱۰ درصد زمان محاسبات به اجرای الگوریتم بهینه یابی اختصاص پیدا کرده است. در تحقیقات آتی استفاده ترکیبی از الگوریتم‌های پیوسته بهینه یابی با الگوریتم مورچه‌ها می‌تواند باعث کاهش زمان محاسبات بدون کاهش کیفیت جوابها شود.

جدول ۳- پارامترهای ورودی الگوریتم بهینه یابی مورچگان

ردیف	پارامتر	مقادیر	توضیحات
۱	Ant	۳۰۰	تعداد مورچه‌ها
۲	litr	۱۵	تعداد تکرارهای داخلی برنامه که در هر تکرار ماتریس فرومان به روزرسانی می‌شود
۳	$\tau_0$	۱	مقدار اولیه ماتریس فرومان
۴	$\rho$	۰/۱۵	مقدار تبخیر فرومان
۵	$q_0$	۰/۹	کنترل کننده احتمال انتخاب تصادفی در الگوریتم جامعه مورچگان
۶	$\beta$	۰	پارامتر احتمال انتخاب مسیر
۷	$\alpha$	۱	پارامتر احتمال انتخاب مسیر
۸	$\eta$	-	هدایت کننده کاوشی

مسئله احیای آلودگی آبهای زیرزمینی به هیدروکربن‌های محلول دارای نکات مختلفی است. در صورتیکه تکیه بر سیستم تزریق بیش از پمپاژ- تصفیه بوده و فرآیند احیا بیولوژیکی بیشتر مورد نظر باشد عامل محدود کننده‌ای در این رویکرد ایجاد می‌شود. استفاده از حداکثر دبی تزریق در چاهها علاوه بر اینکه موجب تخطی از حداکثر قید هد هیدرولیکی در محل چاههای تزریق می‌شود، باعث مهاجرت آلاینده‌ها به سمت بالادست می‌شود که در چاههای کنترلی منطقه غربی رویت می‌شود. بنابراین الگوریتم ناگزیر از انتخاب تعداد چاههای بیشتر با دبی‌های کمتری خواهد شد. از طرفی دیگر استفاده بیشتر از سیستم پمپاژ- تصفیه باعث افزایش هزینه‌ها خواهد شد. هزینه بالای سیستم تصفیه و همچنین قید حداقل هد هیدرولیکی چاهها مانع از انتخاب حداقل چاهها با حداکثر دبی می‌شود. همان طوری که مطرح شد، مقادیر هزینه پمپاژ- تصفیه برای هیدروکربن‌های محلول به طور متوسط بیش از سه برابر هزینه احیای بیولوژیکی بوده و از این نظر عملکرد مناسبی نخواهد داشت. ولی از طرف دیگر باعث افزایش زمان احیای آبخوان می‌شود (Flathman et al., 1993).

برای پیشگیری از همگرایی الگوریتم به حداقلهای محلی علاوه بر رویکرد PRI، پارامتری دیگری در داخل الگوریتم مورچگان در نظر گرفته شده است که این پارامتر  $q_0$ ، مقداری حدود ۰/۸ را می‌تواند داشته باشد. حساسیت جوابهای مسئله به تغییر در مقدار این پارامتر نیز مورد بررسی قرار گرفت. پارامترهای  $\alpha, \beta$  و  $\eta$  مطابق با توصیه‌های تحقیقات گذشته اتخاذ شد. با اجرای برنامه و تنظیم پارامترهای ورودی بهترین نتایج مطابق با جدول ۴ بدست آمده است.

حال بهره برداری است. در صورتی که مقدار دبی برداشت در این چاه نیز با مقدار حداکثر مجاز صورت می‌گرفت غلظتهای مشاهداتی در چاههای کنترل غربی (یا بالادست) به بیش از غلظت مجاز (1ppm) می‌رسید و جواب غیر قابل قبول می‌شد. در شکل ۴ روند تغییرات غلظت آبخوان را در بازه‌های زمانی ۶ ماهه مشاهده می‌کنید. میزان غلظت بعد از پایان دوره احیا به زیر مقدار استاندارد، 3ppm می‌رسد. در اثر تزریق نیز مقداری از توده آلودگی به سمت بالادست حرکت می‌کند که توسط چاههای مشاهده ای کنترل می‌شود اما این مقادیر هیچگاه به بیش از 1ppm نمی‌رسند.

#### ۷- جمع بندی

در این تحقیق از یک الگوریتم ارتقا یافته بهینه یابی مورچه‌ها برای طراحی بهینه سیستم احیای آلودگی آبهای زیرزمینی استفاده شده است. برای این منظور مدل بهینه یابی با برنامه شبیه ساز BIOPLUMEDII به یکدیگر متصل شدند. متغیرهای تصمیم در مدل شبیه سازی- بهینه یابی بکار رفته مقادیر پمپاژ تزریق و تخلیه و محل چاههای بکار رفته برای این موضوع بوده است. تابع هدف حداقل سازی هزینه انجام عملیات بوده و همچنین هدف از عملیات احیای آبخوان کاهش مقادیر آلاینده به مقدار استاندارد در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با استفاده از الگوریتم‌های PP، PRI، عملکرد الگوریتم کلونی مورچه‌ها، در جستجوی موثر فضای جواب ارتقا یافته است. الگوریتم بکار رفته با الگوریتم ترکیبی ژنتیک و نورد شبیه سازی شده (PRSA) مورد مقایسه قرار گرفت. آنچه مشخص است تعداد فراخوانی شبیه ساز در الگوریتم پیشنهادی کمتر از الگوریتم ترکیبی PRSA بوده است و الگوریتم مورچه‌ها عملکرد زمانی بهتری در همگرایی به جواب بهینه داشته است. نتایج نشان می‌دهد الگوریتم ارتقا یافته کلونی مورچه‌ها قابلیت حل مسائل مسئله طراحی احیای آلودگی آبهای زیرزمینی را دارد و می‌تواند به عنوان روشی موثر در مسائل با مقیاس بزرگ بکار رود.

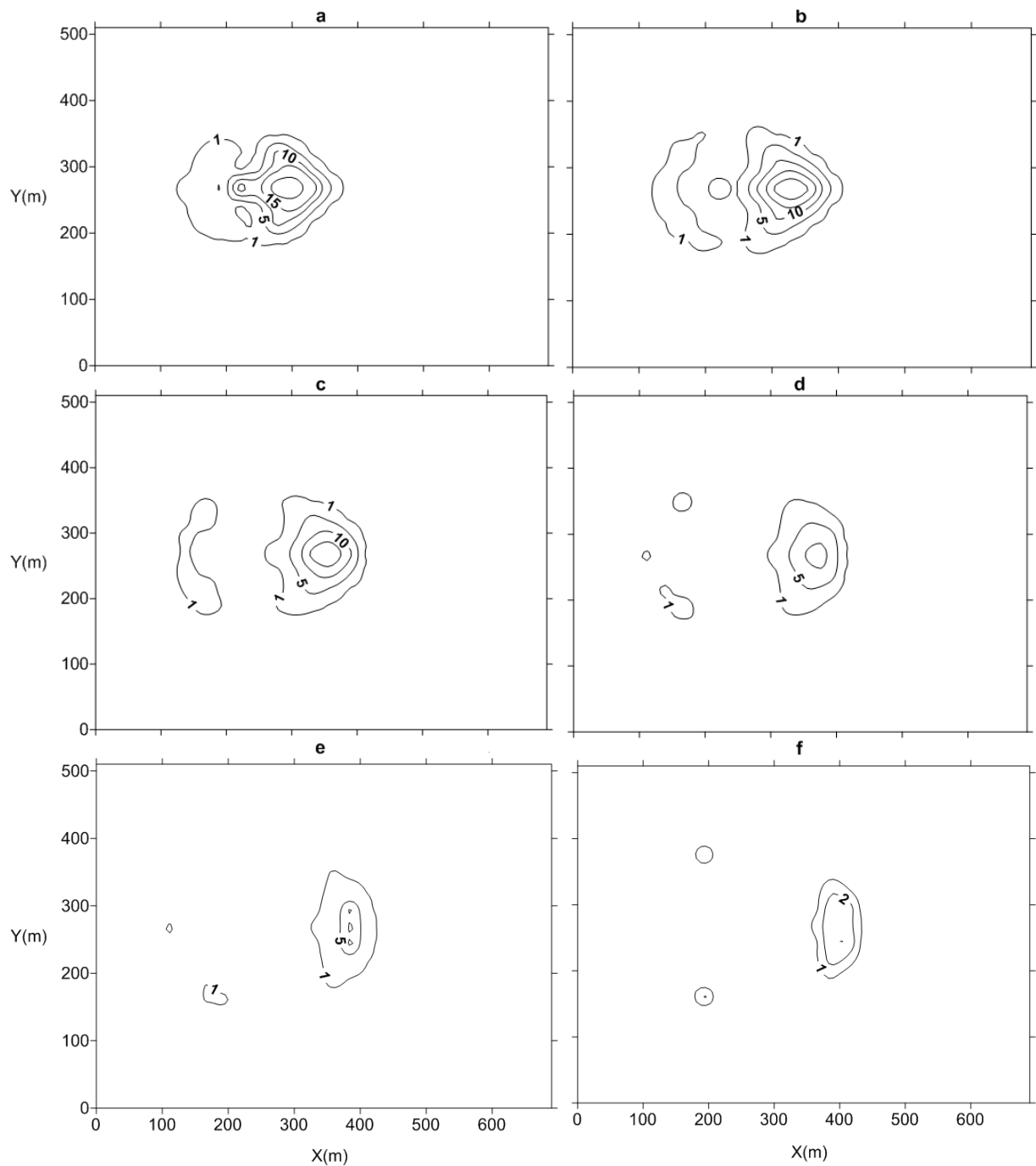
استفاده از مزایای هر یک از تکنولوژی‌های تصفیه در رویکرد ترکیبی لحاظ می‌شود. در این رویکرد ۷ چاه بالادست برای تزریق و ۶ چاه پایین دست برای تخلیه در نظر گرفته شده است. جوابهای شدنی بدست آمده در طول محاسبات، از تنوع زیادی برخوردار بوده‌اند. همان طور که ذکر شد، هزینه مربوط به پمپاژ و تصفیه حدود سه برابر هزینه تزریق است و این نشان می‌دهد که الگوریتم احتمالاً به دنبال جوابهایی باشد که بیشتر از چاههای تزریق انتخاب کند. از طرف دیگر برای جلوگیری از مهاجرت توده آلودگی به سمت پایت دست و برای جلوگیری از رسیدن آن به چاههای کنترلی انتخاب حداقل یک چاه در پایین دست نیز محتمل به نظر می‌رسد.

مجموع هزینه بدست آمده در این جواب حدود  $2/304 \times 10^9$  ریال بدست آمده است که بیشترین سهم را هزینه تخلیه و تصفیه در چاه E2 با  $543/096 \times 10^6$  ریال به خود اختصاص داده است. سهم مربوط به تزریق  $488/784 \times 10^6$  ریال است که مربوط به سه چاه U1، U2 و U4 است. همان طور که مشخص است، هزینه مربوط به تزریق اکسیژن از سه چاه تزریق کمتر از هزینه مربوط به تخلیه و تصفیه از یک چاه تخلیه است. همچنین هزینه احداث تسهیلات مربوط به تصفیه خانه و همچنین تسهیلات تخلیه آب بیشتر از هزینه مربوط به تزریق و تسهیلات آن بدست آمده است. این شواهد حاکی از انتخاب درست الگوریتم در بدست آوردن جواب بهینه دارد.

نکته دیگری که حائز اهمیت است تقارن موجود در انتخاب چاهها و دبی‌های مربوطه است. با توجه به شکل اولیه توده آلودگی و مشخصات همگن و همسوی آبخوان و مکان اولیه چاههای تزریق و تخلیه همه مشخصات بصورت متقارن بوده است. در جواب بدست آمده نیز برای چاههای U2 و U4 چنین مسئله‌ای مشاهده می‌شود. این دو چاه با حداکثر دبی ممکن در حال تزریق اکسیژن و مواد مغذی به داخل آبخوان هستند. چاه U1 نیز که در خط تقارن محدوده مورد مطالعه قرار دارد با نصف دبی چاههای U2 و U4

جدول (۴) مقادیر بهینه دبی و هزینه برای الگوریتم‌های PRSA و ACO

الگوریتم	جواب بهینه الگوریتم (چاهها و دبی‌های متناظر (l/s))	هزینه احداث چاه (ریال)	هزینه تزریق (ریال)	هزینه تخلیه (ریال)	هزینه احداث تاسیسات تزریق (ریال)	هزینه احداث تاسیسات تخلیه (ریال)	هزینه کل سیستم احیا (ریال)
تحقیق حاضر (ACS)	U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub> , U <sub>4</sub> , E <sub>2</sub> (۰/۶۳۱، ۱/۲۶، ۱/۲۶، ۱/۰۵۱)	۵۷۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۴۸۸/۷۸۴×۱۰ <sup>۶</sup>	۵۴۳/۰۹۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۳۳۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۳۶۰×۱۰ <sup>۶</sup>	۲/۳۰۴×۱۰ <sup>۹</sup>
	U <sub>1</sub> , U <sub>2</sub> , U <sub>4</sub> , E <sub>2</sub> (۰/۴۶، ۱/۲۱، ۱/۲۲۵، ۱/۰۴)	۵۷۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۴۵۱/۲×۱۰ <sup>۶</sup>	۵۳۸/۸×۱۰ <sup>۶</sup>	۳۳۶×۱۰ <sup>۶</sup>	۳۶۰×۱۰ <sup>۶</sup>	۲/۲۶۲×۱۰ <sup>۹</sup>



شکل ۴- تغییرات غلظت هاله آلودگی (ppm) در دوره احیا بعد از گذشت (a) ۰/۵ سال، (b) ۱ سال، (c) ۱/۵ سال، (d) ۲ سال، (e)

۲/۵ سال، (f) ۳ سال

- 5- Mixed-Integer
- 6- Simulated Annealing
- 7- Genetic Algorithm
- 8- Ant Colony Optimization
- 9- Hill air force base, Utah
- 10- Method of Characteristics

پی نوشتها

- 1- Benzene - Toluene – Ethyl benzene – Xylene
- 2- Electron Acceptor
- 3- Simulation/Optimization
- 4- Pump and Treat

- Hinchee, R. E., Alleman, B. C., Hoeppe, R. E., and Miller, R. N., eds. (1994). "Hydrocarbon bioremediation" Lewis, Boca Raton, Fla.
- Jalali M. R., Afshar A. and Marino, M. A., (2006). "Reservoir operation by ant colony optimization algorithms" *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, Vol. 30, No. B1
- Konikow, L. F., and Bredehoeft, J. D. (1978). "Computer model of two dimensional solute transport and dispersion in groundwater" *Techniques of Water Resources Investigation of the USGS, U. S. Geological Survey, Washington, D. C.*
- Lang, M. M., Roberts, P. V., and Semprini, L. (1997). "Model simulations in support of field scale design and operation of bioremediation based on cometabolic degradation." *Ground Water*, 35(4), pp. 565-573.
- Marryott, R. A. (1996). "Optimal ground-water remediation design using multiple control technologies." *Ground Water*, 34(3), pp. 425-433.
- McKinney, D. C., and Lin, M.-D. (1994). "Genetic algorithm solution of groundwater management models." *Water Resour. Res.*, 30(6), pp. 1897-1906.
- Maier, H. R., Simpson, A. R., Zecchin, A. C., Foong, W. K., Phang, K. Y., Seah, H. Y. & Tan, C. L. (2003). "Ant colony optimization for design of water distribution systems." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 129(3), pp. 200-209.
- Peralta, R. C., Kalwij, I., and Wu, S. (2003). "Practical simulation/ optimization modeling for groundwater quality and quantity management." *Proc., MODFLOW and More, Understanding through Modeling, International Groundwater Modeling Center*, pp. 784-788.
- Rifai, H. S., and Bedient, P. B. (1990). "Comparison of biodegradation kinetics with an instantaneous reaction model for groundwater." *Water Resour. Res.*, 26(4), pp. 637-645.
- Ritzel, B. J., Eheart, J. W., and Ranjithan, S. (1994). "Using genetic algorithms to solve multiple objective groundwater pollution containment problem." *Water Resour. Res.*, 30(5), pp. 1589-1603.
- Shieh, H. J., Peralta, R. C., (2005), "Optimal in situ bioremediation design by hybrid genetic algorithm-simulated annealing" *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 1
- Stützel, T. and Hoos, H.H., (1997). "The MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem." *Proceedings of IEEE-ICEC-EPS'97, IEEE International Conference on*
- 11- Ant System  
12- Ant Colony Systems  
13- Max-Min Ant System  
14- Pheromone Promotion  
15- Pheromone Path Replacement  
16- Pheromone Re-Initiation  
17- Activated Carbon  
18- Parallel Recombinative Simulated Annealing

## ۸- مراجع

جلالی م. ر. (۱۳۸۴)، "طراحی و بهره‌برداری از هیدروسستم‌ها با الگوریتم جامعه مورچه‌ها، یک رهیافت فراکاوشی جدید"، پایان نامه دکتری، دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

Abbaspour, K. C., Schulin, R. & Van Genuchten, M. T. (2001). "Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization" *Adv. Water Resour.*, 24(8), pp. 827-933.

Alexander, M. (1994). "Biodegradation and bioremediation" Academic Press, N.Y.

Borden, R. C., and Bedient, P. B. (1986). "Transport of dissolved hydrocarbons influenced by oxygen-limited biodegradation: 1. Theoretical development" *Water Resour. Res.*, 2(13), pp. 1973-1982.

Burges, K. S., H. S. Rifai, and P. B. Bedient, (1993). "Flow and transport modeling of a heterogeneous field site contaminated with dense chlorinated solvent waste, in Proceedings of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection, and Restoration" American Petroleum Institute and NGWA, Houston, Texas. Nov. 10-12, pp. 693-707,

Chiang, C. Y., J. P. Salanitro, E. Y. Chai, J. D. Colthart, and C. L. Klein, (1989). "Aerobic biodegradation of benzene, toluene and xylene in a sandy aquifer" Data analysis and computer modeling, *Ground Water*, 27(6), pp. 823-834.

Cookson, J. T. (1995). "Bioremediation engineering: Design and application" McGraw-Hill, N.Y.

Colorni, A., Dorigo, M., Maniezzo, V., (1991). "Ant system: An autocatalytic optimizing process" Tech. Report 91-016, Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M., Gambardella, L.M., (1997). "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), pp. 53-66.

Flathman, P. E., Jerger, D. E., and Exner, J. H., eds. (1993). "Bioremediation field experience" Lewis, Boca Raton, Fla.

Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection, and Restoration: Nov. 10-12, pp. 445-459.

Wiedemeier, T. H., J. T. Wilson, R. N. Miller, and D. H. Campbell, (1994). "United air force guidelines for successfully supporting intrinsic remediation with an example from Hill Air Force Base", in Proceeding of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection, and Restoration: Nov. 2-4, pp. 317-334.

Yoon, J-H., and Shoemaker, C. A. (1999). "Comparison of optimization methods for groundwater bioremediation." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 125(1), pp. 54-63.

Evolutionary Computation and Evolutionary Programming Conference, pp. 309-314.

Taylor, S. W., and Jaffe, P. R. (1991). "Enhanced in-situ biodegradation and aquifer permeability reduction." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 117(1), pp. 25-46.

USEPA (1998). "BIOPLUME III natural attenuation decision support system—User's manual version 1.0", EPA/600/R-98/010, Washington, D. C.

Wiedemeier, T. H., P. R. Guest, R. L. Henry, and C. B. Keith, (1993). "The use of BIOPLUMEII to support regulatory negotiation at fuel spill site near Denver, Colorado", Proceeding of the Petroleum

Archive of SID