

طراحی بهینه چندهدفه سیستم احیای بیولوژیکی آلودگی آبهای زیرزمینی با استفاده از الگوریتم چندجامعه مورچه‌ها

حجت حسین‌زاده^۱ عباس افشار^۲ محسن سعیدی^۳

(دریافت ۹۰/۱۱/۵ پذیرش ۹۱/۸/۴)

چکیده

احیای درجای بیولوژیکی، فناوری رایج برای پاک‌سازی آبخوان‌های آلوده به ترکیبات نفتی محلول است. فرایند کنترل چنین سیستمی بسیار پیچیده است و بررسی جامع آن نیاز به در نظر گرفتن بیش از یک هدف دارد. این تحقیق به توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌یابی می‌پردازد که به صورت چندهدفه رویکردهای مدیریتی را با در نظر گرفتن هزینه، زمان عملیات احیا و استانداردهای کیفیت آب، مورد بررسی قرار داده است. برای این منظور از الگوریتم بهینه‌یابی چندهدفه چندجامعه‌ای مورچه‌ها در قالب دو مدل مدیریتی پیشنهادی هزینه-زمان احیا و همچنین هزینه-تخطی از غلظت مجاز در پایان زمان احیا در تمامی نقاط آبخوان، استفاده شد. مدل بیوفلوم نسخه ۲ برای شبیه‌سازی کمی و کیفی آب زیرزمینی، در نظر گرفته شد. متغیرهای تصمیم در مسئله دبی پمپاژ در چاههای تزریق اکسیژن و مواد مغذی، دبی تخلیه و همچنین مکان این چاهها است. آبخوان شبیه‌سازی شده، فرضی و همگن بود. خروجی مدل منجر به ایجاد منحنی‌های مصالحه‌ای شد که بر اساس آنها تصمیم گیرنده قابلیت انتخاب جوابهای بهینه مختلف را خواهد داشت. منحنی مصالحه هزینه-زمان به دست آمده حداقل زمان ممکن را برای انجام عملیات احیا در اختیار تصمیم گیرنده قرار می‌دهد. حداکثر زمانی که فرصت انجام عملیات احیا تا قبل از رسیدن توده آلودگی به چاههای کنترلی وجود دارد، از جمله نتایج به دست آمده است. همچنین منحنی مصالحه هزینه-تخطی، چگونگی تغییرات هزینه با آزادسازی قید غلظت مجاز را ارائه می‌دهد. نتایج نشان از مفید بودن مدل‌های پیشنهادی و قابلیت الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها در حل مسائل چند هدفه طراحی سیستم احیای آلودگی آبهای زیرزمینی دارد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، آبهای زیرزمینی، بهینه‌یابی چندهدفه، احیای بیولوژیکی، الگوریتم چندجامعه مورچه‌ها

Multi-objective Optimal Design of Groundwater Bioremediation Using Multi-objective and Ant Colony Algorithm

Hojat Hosseinzadeh¹ Abbas Afshar² Mohsen Saeedi³

(Received Jan 25, 2012 Accepted Oct. 25, 2012)

Abstract

In situ bioremediation is one of the most regular technologies to clean up petroleum contaminated aquifers. Control process of such a complicated system is difficult and needs more than one management target. This study develops multi objective simulation/optimization model that consider cost and time of remediation process, and concentration violation from standard value as model objectives. For this propose two multi objective ant colony optimization (ACO) models have been developed, cost-time and cost-violations. The BIOPLUMEII model applies to simulate aquifer hydraulics and bioremediation. Injection rate of oxygen and nutrient, extraction rate in wells and well locations are decision variables. Simulated groundwater model is hypothetic and homogenous. For the case studies, the Pareto front is derived which enhances the decision maker to choose one which more suitable for him/her according to the priorities. The results of time-cost trade off curve showed minimum possible time for remediation process. Also, It was found maximum time for remediation before contamination plume reaches to downstream monitoring wells. The results of cost-violation trade off curve showed how to decrease cost of process with relaxation of standard concentration constraint. The following research shows the proposed multi objective models are useful for decision makers and also reveals the capability of ACO in multi objective optimization of groundwater bioremediation system design.

Keywords: Contaminant, Groundwater, Multi-objective optimization, Bioremediation, Multi-colony.

1. Ph.D. Student of Civil and Env. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran (+98 21) 44260085 (Corresponding Author) hosseinzadeh@iust.ac.ir

2. Prof., Dept. of Civil and Env. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran

3. Assoc. Prof., Dept. of Civil and Env. Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، نویسنده مسئول (۰۲۱) ۴۴۲۶۰۰۸۵ hosseinzadeh@iust.ac.ir

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

ساله جرم آلاینده موجود در منطقه شهری مورد بررسی را به نصف کاهش دهند. سوخک لاری و صفوی در سال ۲۰۰۸ آلاینده محلول و تبخیری MTBE را در آبخوان همگن باقر شهر تهران بررسی کرده‌اند [۶]. آنها برای شبیه سازی کمی از مدل MODFLOW و برای شبیه سازی انتقال جرم از مدل MT3DMS^۴ استفاده کرده‌اند. عملیات احیا در چندین دوره پمپاژ انجام شده و حداقل هزینه به‌عنوان تابع هدف مد نظر قرار گرفت. در تحقیق مذکور برای بهینه‌یابی از الگوریتم ژنتیک استفاده شده بود. محققان مذکور در تحقیق دیگری از مدل رگرسیونی برای تولید جوابهای اولیه الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند [۷]. این رویکرد باعث کاهش چشمگیر زمان محاسبات طراحی سیستم احیای پمپاژ-تصفیه شده است.

اغلب مدل‌های بهینه‌یابی به‌کار رفته برای احیای بیولوژیکی آلودگی آبهای زیرزمینی به‌صورت تک هدفه مورد بررسی قرار گرفته است و هزینه به‌عنوان تنها تابع هدف مورد توجه بوده است [۸ تا ۱۲]. مینسکر و شوماخر در سال ۱۹۹۶ طراحی بهینه سیستم احیای بیولوژیکی آبخوان را انجام داده‌اند [۸]. در تحقیق مذکور برای طراحی بهینه سیستم احیا از روش بهینه‌یابی SALQR^۵ استفاده شده است. حداقل‌سازی هزینه تنها هدف طراحی بوده و به‌صورت مشتق‌پذیر تعریف شده بود. همچنین از اکسیژن محلول و خالص به‌عنوان اکسیدکننده در تحقیق خود استفاده کرده‌اند و آبخوان مورد مطالعه آنها به‌صورت فرضی و همگن بوده است. در ادامه تحقیقات صورت گرفته، یون و شوماخر^۶ در سال ۱۹۹۹ روشهای بهینه‌یابی مختلفی را برای حل مسئله تک هدفه طراحی سیستم احیای بیولوژیکی آبخوان بررسی کرده‌اند [۹]. روشها را به سه دسته تکاملی، جستجوی مستقیم و بر اساس مشتق تقسیم کرده‌اند. شبیه‌سازی فرایند تصفیه بیولوژیکی آبهای زیرزمینی را توسط نرم افزار BIO2D^۷ در حالت دو بعدی انجام داده‌اند. دو مدل مدیریتی به‌صورت استاتیکی و دینامیکی بررسی شده‌اند. در مدل اول آلاینده تولوئن و در مدل دوم فنل بررسی شده و از سینتیک مونود^۷ برای مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی استفاده کرده‌اند. نتایج به‌دست آمده نشان داده که هر کدام از روشها برای حالات خاصی از مسئله، جوابهای بهتری ارائه کرده‌اند. به‌عبارت دیگر برای حل مسئله تک هدفه طراحی سیستم احیای بیولوژیکی آبخوان در حالت کلی نمی‌توان به وضوح عملکرد الگوریتمی را بهتر از سایر الگوریتم‌های دیگر ارزیابی کرد. شیعه و پرتال^۸ از یک روش ترکیبی الگوریتم

احیای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی به‌عنوان فناوری مؤثر در کاهش آلاینده‌های آلی شناخته می‌شود. از بین بردن کامل آلاینده‌ها از یک سو و کم هزینه بودن آن از سویی دیگر باعث مؤثر بودن این فناوری در مقایسه با سایر فناوریهاست. بسیاری از کاربردهای فناوری احیای بیولوژیکی در تصفیه هیدروکربن‌های نفتی محلول مانند بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و اگزایلین^۱ گزارش شده است [۱ و ۲]. مزیت‌های احیای بیولوژیکی شامل کم هزینه بودن احداث تسهیلات آن، رویکردی درجا، حذف دائمی آلاینده و به صرفه بودن آن است [۳]. سیستم احیای بیولوژیکی شامل مجموعه‌ای از چاههای تزریق و کانال‌های نفوذ، برای تزریق مواد مورد نیاز، به‌منظور تجزیه بیوشیمیایی آلاینده است. آب تزریق شده، مواد مغذی مانند نیترات و فسفات و پذیرنده الکترون مانند اکسیژن، نیترات، سولفات، آهن و دی‌اکسید کربن را برای رشد میکروارگانیسم‌ها فراهم می‌کند. میکروارگانیسم‌ها آلاینده را به ترکیبات بی‌خطر یا ترکیبات معدنی تبدیل می‌کنند [۴]. سیستم احیای درجای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی، در برخی از مواقع همراه با سیستم پمپاژ-تصفیه همراه می‌شود و فناوری ترکیبی ارتقا یافته‌ای را برای رفع آلودگی تشکیل می‌دهند. در پایین دست جریان آبهای زیرزمینی، چندین چاه تخلیه برای استخراج آب آلوده و همچنین سهولت حرکت مواد احیاکننده در نظر گرفته می‌شود و فناوریهایی مانند برج هوادهی و کربن فعال برای تصفیه آب استخراج شده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به‌طور کلی زمانی که مسائل احیای آبهای زیرزمینی مطرح می‌شوند، تصمیم‌گیرنده‌ها باید چندین هدف را به‌صورت همزمان در نظر داشته باشند. اهدافی مانند: حداقل‌سازی هزینه، ریسک سلامت، زمان دوره احیا و افزایش قابلیت اطمینان در سیستم احیا. در این موارد، دانستن رابطه مصالحه بین اهدافی که در تقابل با یکدیگر هستند برای تصمیم‌گیرنده از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود؛ به‌طوری‌که می‌تواند از بین چندین طرح بهینه با توجه به شرایط مختلف اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و غیره به انتخاب یکی از طرحها اقدام نماید.

تحقیقات متعددی در داخل کشور در زمینه احیای آلودگی آبخوان‌ها انجام شده است. صفوی و همکاران در سال ۲۰۰۶ روش پمپاژ-تصفیه را برای احیای آبخوان باقر شهر واقع در غرب پالایشگاه تهران به‌کار بردند و برای کاهش آلودگی MTBE^۲ از روش هوادهی^۳ استفاده کردند [۵]. آنها توانستند در یک دوره ۵

⁴ Modular Three-Dimension Multi-spaces Transport Model

⁵ Successive Approximation Linear Quadratic Regulator

⁶ Bioremediation 2-Dimensional

⁷ Monod

⁸ Peralta

¹ Benzene - Toluene - Ethyl benzene - Xylene (BTEX)

² Methyl Tert Butyl Ether

³ Air Sparging

ژنتیک با نورد شبیه‌سازی شده^۱، برای حل مسئله تک هدفه طراحی سیستم احیای بیولوژیکی آبخوان استفاده کرده‌اند [۱۳]. تحقیق مذکور جزو اولین تحقیقاتی است که با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی مسئله را حل کرده است. در این تحقیق نیز از آبخوان فرضی و توابع هزینه به‌کار رفته توسط شیعه و پراتا در سال ۲۰۰۵ استفاده شده است.

در فضای مدیریت چند هدفه آبهای زیرزمینی، تحقیقاتی در زمینه‌های طراحی سیستم پایش آبهای زیرزمینی، احیای آلودگی آبخوان به روش پمپاژ-تصفیه و مدیریت آبخوان انجام شده است [۱۴-۱۷]. اما مسئله احیای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی فرایندی بسیار پیچیده و از نظر محاسباتی زمان‌بر به حساب می‌آید. در این تحقیق به حل چندهدفه این مسئله با استفاده از الگوریتم چند جامعه‌ای مورچگان پرداخته شد و مدل‌های دو هدفه هزینه-زمان احیا و هزینه-تخطی از غلظت مجاز برای بررسی مسئله پیشنهاد شد.

۲- مواد و روشها

۲-۱- مدل احیای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی

مدل‌های کامپیوتری رشد میکروبی و انتقال آلاینده‌ها (قابل کاهش بیولوژیکی) را می‌توان از نظر مدل‌های مفهومی دسته‌بندی کرد [۱۸]. اولین رویکردی که برای کاهش بیولوژیکی در تصفیه فاضلاب مورد استفاده قرار گرفت، از مفهوم بیوفیلم برای شبیه‌سازی رفتار میکروارگانیسم‌ها استفاده کرده بود [۱۹]. در دومین رویکرد فرض بر آن بوده که انتقال و کاهش بیولوژیکی مربوط به کلونی‌هایی هستند که در سطح ذرات خاک وجود دارند [۲۰]. مولز و همکاران در سال ۱۹۸۶ توده بیولوژیکی را به‌صورت یک ورق استوانه‌ای دارای شعاع و ضخامت فرض کرده‌اند. این رویکرد حالت ساده شده‌تری از رویکرد بیوفیلم است [۲۰]. رویکرد سوم به‌صورت ماکروسکوپیک بوده و هیچ فرضی در مورد میکروارگانیسم‌ها و چگونگی توزیع آنها در محیط متخلخل نداشته است. در این رویکرد فرض شده که کاهش آلاینده‌های آلی بر اساس سینتیک مونود بوده که در این سینتیک کاهش به‌صورت هوازی و بی‌هوازی صورت می‌گیرد [۲۱]. مدل ساده شده‌ای از رویکرد سوم بیوپلوم^۲ فرض می‌کند که کاهش هوازی به‌صورت ناگهانی اتفاق می‌افتد [۲۲].

در این تحقیق از مدل دو بعدی بیوپلوم نسخه ۲ برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و همچنین انتقال اکسیژن محلول و

آلاینده در آبخوان، استفاده شد. این مدل توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا ارائه شده و کاربردهای موفقی در سایت‌های واقعی داشته است [۲۳ و ۲۴]. مدل بیوپلوم نسخه ۲ از ترکیب رویکردهای اویلری و لاگرانژی برای بهره‌گرفتن از مزایای هر یک از آنها در حل معادله انتقال جرم استفاده می‌کند. برای حل ترم همرفتی از روش لاگرانژی ردیابی ذره‌ای^۳ و برای حل ترم پخشیدگی از روش اویلری تفاضلات محدود استفاده شده است. یکی از رویکردهای معمول روشهای ترکیبی، رویکرد MOC^۴ یا روش مشخصه‌ها است که بالانس جرمی را تضمین نمی‌کند [۲۳]. در تمامی مراحل این تحقیق بالانس جرمی برای هر سناریو تحت کنترل بوده و در صورت افزایش میزان آن از ۵ درصد بیشتر سناریوی مربوطه کنار گذاشته شده است [۲۵]. این مدل بصورت دو بعدی توسعه پیدا کرده و در هر گام زمانی بر اساس روابط ۱ و ۲ مقادیر اکسیژن و آلاینده را محاسبه می‌کنند

(۱)

$$\frac{\partial(Cb)}{\partial t} = \frac{1}{R_c} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(bD_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (bCV_i) \right) - \frac{C'W}{n_e} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Ob)}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(bD_{ij} \frac{\partial O}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (bOV_i) \right) - \frac{O'W}{n_e}$$

که در این روابط

O, C به ترتیب غلظت آلاینده و اکسیژن (M/L^3)، O', C' غلظت آلاینده و اکسیژن در چاه یا چشمه (M/L^3)، n_e تخلخل مؤثر، b ضخامت آبخوان (L)، t زمان (T)، x_i, y_i مختصات کارتیزین (L)، W شار حجمی در واحد سطح (L/T)، V_i سرعت نشت در جهت x_i (L/T)، R_e ضریب جذب آلاینده؛ و D_{ij} ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی (L^2/T) است.

توده‌های مربوط به آلاینده و اکسیژن محلول با استفاده از اصل برهم‌نهی^۵ برای شبیه‌سازی واکنش ناگهانی بین اکسیژن و آلاینده با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در یک گره غلظت اکسیژن و آلاینده با روابط ۳ و ۴ کاهش پیدا می‌کند که نحوه عملکرد سینتیک واکنش ناگهانی را نشان می‌دهد

$$\Delta C_{RC} = O/F; \quad O = 0 \quad \text{if} \quad C > O/F \quad (3)$$

$$\Delta C_{RO} = CF; \quad C = 0 \quad \text{if} \quad O > CF \quad (4)$$

³ Particle tracking

⁴ Method of Characteristics

⁵ Superposition

¹ Hybrid Genetic Algorithm- Simulated Annealing

² Bioplume

که در این روابط

$$F_1 = \text{Minimize} \left(\begin{array}{l} \sum_{e=1}^{M^P} C^P(e)p(e) + \sum_{e=1}^{M^P} C^{IP}(e)IP(e) + \\ D \left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e) \right) + E \left(\sum_{e=1}^{M^e} p(e) \right) \end{array} \right) \quad (5)$$

$$F_2 = \text{Minimize} \quad (T) \quad (6)$$

که در این روابط

F_1 هزینه احداث و بهره‌برداری 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 تصفیه‌خانه، M^e تعداد کل چاههای تخلیه و $M^P = M^i + M^e$ و T مدت زمان انجام پروژه احیا است.

هزینه تسهیلات مربوط به تخلیه و تزریق وابسته به ظرفیت آنها است. در طراحی کاربردی مهندسی مسئله، 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 ۷ و ۸ محاسبه شده است. تابع هدف به صورت گسسته بوده و دارای متغیرهای ترکیبی صحیح^۱ است. برای این منظور از روشهای فراکاووشی می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق از روش ACO^۲ برای حل مسئله استفاده شد.

$$D \left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e) \right) = 0 \quad \text{if} \quad \sum_{e=1}^{M^i} p(e) = 0 \\ = D_q \quad \text{if} \quad CD_{q-1} < \sum_{e=1}^{M^i} p(e) \leq CD_q \quad (7)$$

¹ Mixed-Integer

² Ant Colony Optimization

ΔC_{RC} تغییرات غلظت آلاینده، F ضریب استوکیومتری آلاینده با اکسیژن (در این تحقیق برای آلاینده فنل مقدار ۳ است) و ΔC_{RO} تغییرات غلظت اکسیژن است. نرم‌افزار بیوپلوم نسخه ۲ دارای محدودیتهایی است. برای فرایندهای کاهش تدریجی آلاینده‌ها در شرایط هوازی عملکرد مناسبی نخواهد داشت و علت این امر فرض سینتیک ناگهانی شیمیایی است [۲۶]. البته اعمال این ساده‌سازی در تحقیقات باعث افزایش سرعت زمان محاسبات مربوط به شبیه‌سازی نیز می‌شود که برای اجرای رویکردهای مدیریتی پیشنهادی در این تحقیق بسیار مفید است.

۲-۲-۲- مدل‌های بهینه‌یابی چندهدفه ارائه شده

در این تحقیق، بهینه‌سازی سیستم احیای بیولوژیکی، شامل پیدا کردن محل چاهها، دبی تخلیه و تزریق و ظرفیت تسهیلات مورد نیاز برای انجام عملیات تزریق، تخلیه و تصفیه است. دو مدل‌سازی چندهدفه در این تحقیق پیشنهاد شد. در مدل اول اهداف شامل الف) حداقل سازی هزینه کل سیستم احیا شامل پمپاژ-تصفیه، احداث چاه و تسهیلات لازمه، و ب) حداقل‌سازی مدت زمان اجرای عملیات احیا بود. در ادامه تحقیق مدل دوم با دو هدف: الف) حداقل‌سازی هزینه کل سیستم شامل پمپاژ-تصفیه، احداث چاه و تسهیلات لازمه، و ب) حداقل‌سازی مقدار تخطی از غلظت مجاز در تمام نقاط آبخوان بعد از دوره احیا ارائه شد. در هر یک از بخش‌ها ابتدا تابع هدف مورد نظر ارائه شده و سپس قیدهای مربوط به هیدرولیک جریان و کیفیت غلظت آلاینده فرمول‌بندی شدند.

۲-۲-۱- مدل حداقل هزینه- زمان دوره احیا

با توجه به اهمیت کیفی منابع آب و به‌خصوص آبهای زیرزمینی، مسئله زمان احیای آبخوان از اهمیت بالایی برخوردار است. با آلودگی آبهای زیرزمینی منابع مصرف آب به خطر می‌افتند و از این رو ممکن است صدمات جبران ناپذیری در بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب شهری به سیستم موجود وارد شود. بنابراین رفع آلودگی آبهای زیرزمینی می‌تواند در فرایند توسعه کشور از اهمیت بالایی برخوردار باشد. در فرایند احیا هرچه کوتاه‌تر کردن زمان رفع آلودگی و برگرداندن آبخوان به شرایط طبیعی، دارای ارزش و اولویت بالایی است. در این شرایط مسئله می‌تواند به صورت چند هدفه به‌گونه‌ای بررسی شود که تابع هدف اول، حداقل هزینه و تابع هدف دوم، زمان احیای آبخوان باشد. روابط ۵ و ۶ به ترتیب مربوط به توابع هدف هزینه و زمان احیای آبخوان هستند

ظرفیتهای مورد نیاز است. تسهیلات مربوط به تزریق و تصفیه نباید از حداکثر دبی تزریق و تخلیه، کمتر باشند. خروجی مدل ارائه شده به صورت تحلیل حساسیت هزینه اجرای مسئله احیای آلودگی آبهای زیرزمینی نسبت به زمان احیا خواهد بود. برقراری ارتباط بین زمان احیا و دبی‌های تزریق و تخلیه از راه حل معادله دیفرانسیل کمی و کیفی آبهای زیرزمینی امکان پذیر است. نمودار مصالحه به دست آمده از حل این مدل حداقل هزینه‌های به دست آمده در زمان‌های مختلف اجرای پروژه را نشان خواهد داد. غیر خطی بودن مسئله کمی-کیفی آبهای زیرزمینی از یک طرف و وجود قیدهای کمی و کیفی مسئله از طرف دیگر باعث می‌شود تا نتوان از پیش تعیین کرد که با افزایش یا کاهش زمان انجام پروژه هزینه‌ها (همیشه) روند افزایشی و یا کاهشی خواهند داشت و این مسئله نیاز به بررسی دارد. اما مشخص است که زمان انجام پروژه و رسیدن به اهداف کیفی (غلظتهای مجاز) از یک حدی کوچک‌تر نمی‌تواند باشد، زیرا با توجه به قیدهای حداکثر تزریق و تخلیه در آبخوان و همچنین پایین آوردن مقادیر غلظت تا حد غلظتهای مجاز، نیاز به گذشتن حداقل زمان از اجرای پروژه است. حداکثر زمان اجرای پروژه جایی خواهد بود که اگر پروژه بیشتر از آن زمان طول بکشد جوابی برای مسئله پیدا نخواهد شد. در واقع قیدهای کمی و کیفی مسئله فضای جواب را برای پارامتر زمان محدود کرده‌اند.

۲-۲-۲- مدل حداقل هزینه - تخطی از غلظت مجاز آلاینده

یکی از مدل‌های مدیریتی در برخورد با مسائل آلودگی آبهای زیرزمینی آزادسازی قید مربوط به غلظت مجاز در گستره آبخوان است. این عملیات به نحوی صورت می‌گیرد که اختلاف مقادیر آلاینده بعد از اعمال سناریوی احیا با مقدار غلظت مجاز به حداقل برسد و به صورت هم‌زمان مقادیر هزینه نیز حداقل شوند. در مرحله قبلی مقدار حداقل هزینه برای حالتی که در تمامی سطح آبخوان بعد از انجام عملیات احیا غلظت به زیر غلظت مجاز برسد، انجام شد. در این مرحله قید رابطه ۱۲ آزاد می‌شود و دیگر عامل محدود کننده به حساب نمی‌آید و به صورت تابع هدف جدید در معادلات مدل‌سازی استفاده می‌شود. بنابراین مسئله به صورت بهینه‌یابی دو هدفه مدل‌سازی می‌شود. تابع هدف هزینه مطابق با رابطه ۱ است و رابطه تابع هدف جدید به صورت رابطه ۱۴ تعریف می‌شود

$$F_2 = \text{Minimize} \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (C_{i,j} - C_{cl})^2 \right) \quad (14)$$

$$\forall C_{i,j} > C_{cl}$$

که در این رابطه

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

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

$$= E_q \quad \text{if} \quad CE_{q-1} < \sum_{e=1}^{M^e} p(e) \leq CE_q \quad (8)$$

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

که در این روابط

D_q هزینه تسهیلات مربوط به تزریق زمانی که دبی تزریق بین ظرفیت تزریق CD_{q-1} و CD_q باشد، M^Q تعداد کل ظرفیتهای طراحی تزریق، و ظرفیت تزریق CD_0 برابر صفر است. E_q هزینه تسهیلات مربوط به تصفیه هنگامی که دبی تخلیه بین ظرفیت تخلیه CE_{q-1} و CE_q باشد. M^R تعداد کل ظرفیتهای طراحی تخلیه، و ظرفیت تخلیه CE_0 برابر صفر است. مدل بهینه‌یابی احیای بیولوژیکی آبهای زیرزمینی دارای قیدهایی به شرح زیر است

$$h_{\text{Min}} \leq h_e \leq h_{\text{Max}} \quad \forall e \in p(e) \neq 0 \quad (9)$$

$$0 \leq p(e) \leq Q_{\text{inj max}} \quad (10)$$

$$0 \leq p(e) \leq Q_{\text{ext max}} \quad (11)$$

$$C_{k,T} \leq C_{cl} \quad \forall k \in \Psi \quad (12)$$

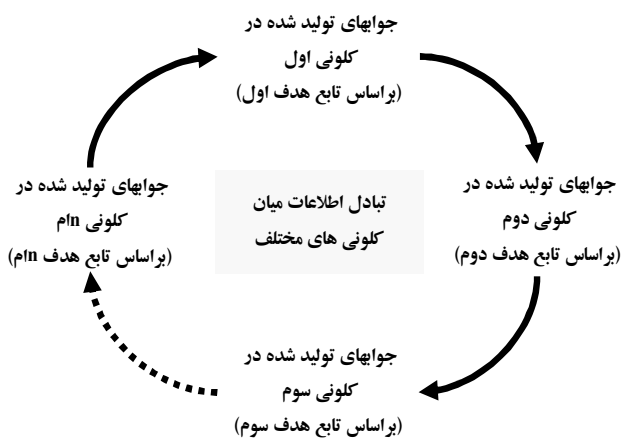
$$C_{o,T} \leq C_{ca} \quad \forall o \in \phi \quad (13)$$

که در این روابط

h_{min} و h_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر ارتفاع هیدرولیکی مجاز، h_e ارتفاع هیدرولیکی در محل چاههای تخلیه و تزریق، $Q_{\text{inj max}}$ دبی حداکثر تزریق، $Q_{\text{ext max}}$ دبی حداکثر تخلیه، $C_{k,T}$ غلظت آلاینده در گره k در انتهای دوره احیای T ، C_{cl} غلظت مجاز، Ψ مجموعه‌ای از موقعیتها که غلظت باید محدود به مقدار مشخصی باشد (3ppm)، $C_{o,T}$ غلظت آلاینده در گره o در انتهای دوره احیای T ، C_{ca} حداکثر غلظت مجاز و ϕ مجموعه چاههای کنترلی (1ppm) است. اگر در انتهای دوره شبیه‌سازی قیدهایی فوق محقق نشوند، جواب به دست آمده برای تابع هدف در رابطه ۵ به علاوه مقدار جریمه خواهد شد.

تسهیلات مربوط به تخلیه و تزریق قبل از شروع احیای بیولوژیکی ساخته می‌شوند. هزینه مربوط به این تسهیلات وابسته به

همکاران در سال ۲۰۱۰ کاربرد الگوریتم چند جامعه‌ای مورچگان را بر روی مسئله تخصیص بهینه آلودگی به صورت سه هدفه بررسی کرده و نتایج مطلوبی را به دست آورده‌اند [۳۲]. راهکار اصلی در این رهیافت که اساس الگوریتم حاضر را نیز تشکیل می‌دهد، اختصاص دادن یک جامعه از مورچه‌ها به هر کدام از اهداف یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است. در الگوریتم حاضر، در هر گام محاسباتی، تمامی راه‌حلهای تولید شده در یک جامعه در اختیار جامعه مقابل قرار می‌گیرد تا مورچه‌های آن جامعه هم به نوبه خود سعی در بهبود جوابها بر اساس معیارهای خود داشته باشند. الگوی مربوطه بین جوامع مورچه‌ها برای مدل‌های ارائه شده در این تحقیق در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- نمایش نحوه تبادل اطلاعات مابین جوامع مورچه‌ها و اهداف نظیر آنها [۳۱]

در الگوریتم حاضر، به هر کدام از اهداف در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، یک جامعه مورچه تعلق می‌گیرد که عهده‌دار فرایند جستجو با توجه به هدف مختص به خود است. بعد از ورود به فرایند بهینه‌سازی در تکرار اول، جوابهای تولید شده در اولین جامعه مورچه که بر اساس هدف اول توسعه یافته‌اند، در اختیار جامعه دوم قرار می‌گیرد تا آنها هم به نوبه خود جوابهایی را بر اساس هدف خود تولید نمایند. به همین ترتیب این جوابها در اختیار جوامع بعدی قرار می‌گیرد. در انتهای این چرخه، مجدداً جامعه اول فرصت می‌یابد تا با دریافت جوابهای تولید شده در کلونی ماقبل آخر، به تولید جوابهایی بر اساس معیارهای خود بپردازد. این فرایند تبادل راه‌حلهای مابین جوامع مختلف تا یک تکرار از پیش مشخص ادامه می‌یابد. پس از رسیدن به یک تکرار از پیش تعیین شده مقادیر توابع هدف برای هر کدام از مورچه‌ها محاسبه می‌شود. با مقایسه این جوابها، جوابهای بهینه پارتو یا مجموعه جوابهای غالب از میان آنها انتخاب می‌شود و در یک مجموعه آرشیو فرضی قرار می‌گیرند و این بار فرمان‌های مسیرهای هر دو جامعه، بر اساس جوابهای

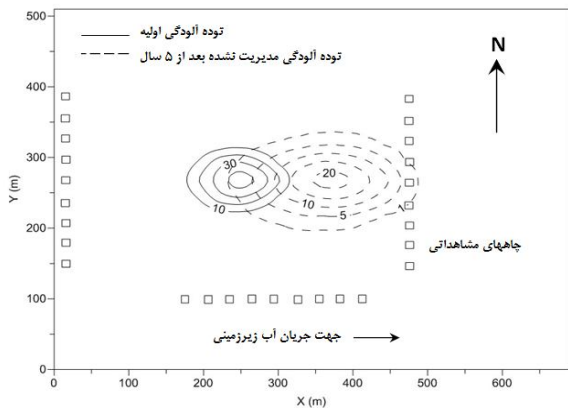
F_2 تابع هدف تخطی از قید غلظت مجاز، $C_{i,j}$ مقدار غلظت بعد از اتمام دوره احیا در سلول i, j ، تعداد سلول‌ها در محورهای x و N_y تعداد سلول‌های در محورهای y است.

انتظار می‌رود که با کاهش هزینه حاصل از کاهش دبی‌های تزریق، تخلیه مقادیر غلظت‌های آلاینده باقیمانده در آبخوان بیشتر و بنابراین اختلاف غلظتها نسبت به غلظت مجاز بیشتر شود. در این مدل‌سازی هدف، بررسی روند تغییرات هزینه با مقادیر اختلاف از غلظت هدف است. در مسائل مهندسی آب ممکن است که هزینه پروژه‌ها با کوچک‌ترین تغییر در یک قید، کاهش چشمگیری پیدا کند. در این مرحله از تحقیق به بررسی میزان حساسیت مسئله احیای بیولوژیکی آلودگی آبهای زیرزمینی نسبت به غلظت مجاز در نظر گرفته شده پرداخته شد

۲-۳- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مورچه‌ها

در چند سال اخیر روشهای مختلفی برای کاربرد الگوریتم جامعه مورچه‌ها در بهینه‌سازی توابع چندهدفه پیشنهاد شده است. اولین الگوریتم توسط مارینو و مورالز در سال ۱۹۹۹ و برای حل مسئله طراحی شبکه توزیع آب به کار گرفته شد [۲۷]. در این الگوریتم که بر اساس الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچه‌ها بنا نهاده شده، به تعداد هر کدام از اهداف، یک جامعه مورچه در نظر گرفته شده است. ارتباط این جوامع از طریق راه‌حلهای تولید شده توسط هریک از آنها است. در سال ۲۰۰۱ ایردی و میدندورف الگوریتم بهینه‌سازی مورچه‌ها را برای حل مسئله دومعیاره روندیابی وسایل نقلیه مورد استفاده قرار داده‌اند [۲۸]. در این الگوریتم از یک جامعه مورچه و دو تابع بهنگام‌سازی فرمان جداگانه و نیز رابطه‌ای برای ترکیب دو تابع و یافتن یک مقدار واحد برای گزینش مسیر استفاده شده است. در سال ۲۰۰۴، الگوریتم P-ACO توسط دورنر و همکاران ارائه گردیده است [۲۹]. در این الگوریتم نیز از k تابع مختلف بهنگام‌سازی فرمان به تعداد k تابع هدف استفاده شده است و همچنین رابطه‌ای از پیش تعیین شده مشخص کننده مقدار فرمان شرکت کننده در فرایند گزینش مسیر است. در این الگوریتم، مجموعه جوابهای پارتو در هر مرحله محاسبه شده و در مجموعه آرشیو ذخیره می‌گردند. الگوریتم MACS توسط شارر و باران در سال ۲۰۰۳ پیشنهاد شده است [۳۰]. در این الگوریتم از یک ماتریس فرمان و چند تابع حاوی اطلاعات فراکوشی به تعداد اهداف استفاده شده است. در هر مرحله از فرایند بهینه‌سازی، راه‌حلهای پارتو محاسبه شده و مقدار فرمان به مقدار اولیه می‌رسد. در اقدامی جدید افشار و همکاران در سال ۲۰۰۸ روایت تازه‌ای از الگوریتم چند هدفه کلونی مورچه‌ها را بر اساس رهیافت آرشیو کردن جوابهای غالب ارائه داده‌اند [۳۱]. در ادامه نیز حسین‌زاده و

سیستم علاوه بر محدود کردن توده آلودگی، احیای بیولوژیکی آبخوان را تقویت می‌کند.



شکل ۲- توده آلودگی اولیه و توده مدیریت نشده بعد از ۵ سال [۱۳]

جدول ۱- پارامترهای ورودی مدل شبیه ساز بیوپلوم نسخه ۲ [۱۳]

پارامترهای ورودی	واحد	مقادیر
ابعاد شبکه	-	۱۹×۲۵
ابعاد سلول	m	۳۰×۳۰
ضریب هدایت هیدرولیکی	m/s	6×10^{-5}
ضخامت آبخوان	m	۱۵
شیب هیدرولیکی	-	۰/۰۰۴
ضریب پخشیدگی طولی	m	۱۰
ضریب پخشیدگی عرضی	m	۲
تخلخل موثر	-	۰/۳
ضریب جذب	-	۱
ضریب ناهمبندی	-	۱
غلظت اکسیژن تزریقی	ppm	۸
غلظت اکسیژن اولیه در آبخوان	ppm	۵

برای طراحی سیستم احیای بیولوژیکی درجا، علاوه بر چاههای تزریق از چاههای تخلیه نیز استفاده شد. هفت چاه تزریق امکان تزریق اکسیژن و مواد مغذی را در آبخوان دارند. دبی تزریق آنها بین صفر تا ۱/۲۶ لیتر در ثانیه می‌تواند باشد. حد بالایی و پایینی ارتفاع هیدرولیکی برای چاههای تزریق به ترتیب ۳۳/۵ و ۲۷/۷ متر در نظر گرفته شد. در مدل شبیه‌سازی شده تنها واکنش‌های هوازی مد نظر بوده و واکنش‌های بی‌هوازی ناچیز فرض شده است. غلظت اکسیژن اولیه در محیط آبخوان ۵ ppm است. البته مقدار اکسیژن محلول اولیه در مناطق توده آلاینده به علت مصرف بیولوژیکی صفر و تبادل اکسیژن با منطقه غیر اشباع ناچیز فرض شد. غلظت اکسیژن تزریقی توسط چاههای مربوطه ۸ ppm در نظر گرفته شده است. نرم افزار بیوپلوم فرض را بر آن داشته که اکسیژن محلول تزریقی از طریق چاهها، مواد مغذی کافی را برای انجام

بهینه پارتوی موجود در مجموعه آرشیو بهنگام می‌گردند. بعد از این گام، به مورچه‌ها در هر دو جامعه این اجازه داده می‌شود تا بر اساس استراتژی ذکر شده، به فرایند کاوشی خود برای یافتن مسیر بهینه تا رسیدن به تکرار از پیش تعیین شده بعدی ادامه دهند. در انتهای اجرای این الگوریتم، جوابهای پارتوی موجود در مجموعه آرشیو به عنوان مقادیر نهایی توابع هدف و مسیرهای متناظر با آن، به عنوان راه‌حلهای مسئله گزارش می‌شوند.

صحت سنجی کارایی الگوریتم چندجامعه‌ای مورچه‌ها در تحقیق افشار و همکاران انجام شده است [۳۱]. تحقیق مربوطه مدل‌های دو هدفه تحلیلی ZDT1 و ZDT2 را مورد بررسی قرار داده و نتایج حاکی از کارایی این الگوریتم در حل مسائل چندهدفه در مقایسه با الگوریتم‌های NSGA-II^۱ و ACSAMO^۲ را در بر دارد [۳۳ و ۳۴].

۲-۴- مطالعه موردی

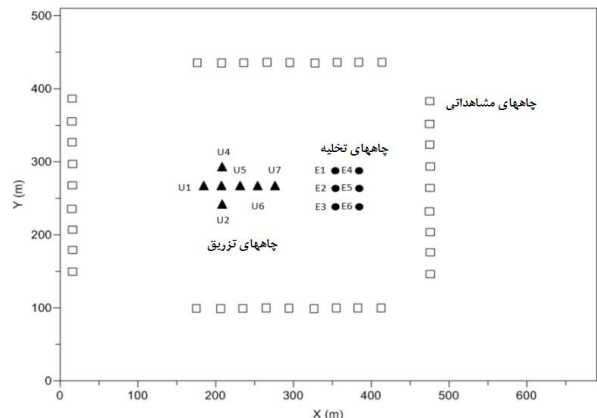
مسئله‌ای که مورد بررسی قرار می‌گیرد از تحقیق شیعه و پراتنا برگرفته شده است [۱۳]. شکل ۲ منطقه مورد مطالعه فرضی را به همراه توده آلودگی اولیه نشان می‌دهد. جدول ۱ نیز پارامترهای ورودی شبیه ساز بیوپلوم نسخه ۲ برای منطقه‌ای با ابعاد ۵۱۰ در ۶۹۰ متر را نشان می‌دهد. آبخوان همگن است و دارای ضریب هدایت هیدرولیکی 6×10^{-5} متر بر ثانیه با ضخامت ۱۵ متر است. در مرزهای غربی و شرقی به ترتیب دو ارتفاع 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 است. در مرزهای شمالی و جنوبی جریانی وجود ندارد. مدل آبهای زیرزمینی به صورت دائمی فرض شده و ضریب جذب آلاینده در محیط آبخوان برابر یک در نظر گرفته شد. اثرات مربوط به تغییرات هدایت هیدرولیکی، پخشیدگی، ضریب جذب در مدل مدیریتی، در قالب سناریوهای مختلف توسط شیعه در سال ۱۹۹۷ مورد بررسی قرار گرفته است [۳۴].

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؛ به طوری که به چاههای کنترل کیفیت آب خواهد رسید. کاهش شیمیایی که به صورت طبیعی انجام می‌شود، بعد از این مدت تنها ۱۶/۴ درصد آلاینده را تجزیه می‌کند. بنابراین برای جلوگیری از مشاهده آلاینده در چاههای کنترل، باید یک سیستم در جای احیای بیولوژیکی در منطقه طراحی شود. این

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

² Adaptive Clonal Selection Algorithm for Multiobjective Optimization

عملیات میکروبی تأمین 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 ۱/۲۶ لیتر در ثانیه را دارند. حد بالایی و پایینی ارتفاع هیدرولیکی برای چاه‌های تخلیه به ترتیب ۳۰/۵ و ۲۴/۴ متر است. غلظت مجاز برای کل منطقه مورد مطالعه ۳ppm لحاظ شد.



شکل ۳- موقعیت چاه‌های پمپاژ و تزریق در سیستم بهینه یابی احیای بیولوژیکی [۱۳]

چاه‌های تزریق در بالادست و تخلیه در پایین دست در نظر گرفته شدند. توزیع مکانی چاه‌ها به گونه‌ای 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 باقیمانده از واکنش‌های میکروبی به سمت پایین دست مهاجرت نکرده و از دامنه سیستم طراحی شده خارج نشوند. این چاه‌ها به عنوان محصورکننده حرکت توده آلودگی عمل می‌کنند. علاوه بر آن آب آلوده به سطح زمین پمپاژ شده و در سیستم تصفیه سطحی مورد پالایش قرار می‌گیرد. شکل ۳ چاه‌های پایش^۱ را نیز مشخص می‌کند. این چاه‌ها در عملیات بهینه‌یابی مستقیماً وارد نمی‌شوند و تنها برای 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. در صورتی که چاه‌های بالادست با دبی‌های تزریق بالا فعال باشند، امکان پخشیدگی ناخواسته آلودگی در بالادست وجود دارد. از این رو یک سری از چاه‌های کنترلی در بالادست جریان یعنی حاشیه غربی تعبیه شده است. حداکثر میزان غلظتی که به چاه‌های پایش می‌رسد، نباید بیش از ۱ باشد. این موضوع نیز در قالب قیدی وارد معادلات بهینه‌یابی شده است. ضرایب هزینه 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 به صورت مستقیم بوده و با افزایش دبی تزریق و تخلیه هزینه نیز به صورت 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 لازم برای پمپاژ در مقابل تزریق نیز مشاهده می‌شود و نسبت هزینه‌ها ۱/۵ برابر است. این موضوع پر هزینه بودن امور مربوط به تخلیه را نشان می‌دهد. هزینه‌های مربوط به تصفیه آب بعد از پمپاژ بر اساس فناوریهای کربن فعال و برج هوادهی^۲ حساب شده و هزینه احداث تسهیلات مربوط به تزریق و تخلیه بر اساس ظرفیت عملکرد آنها محاسبه شده است [۱۳].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل نتایج

۳-۱-۱- پارامترهای مدل بهینه‌یابی

هر یک از جوامع الگوریتم مورچه‌ها شامل چندین پارامتر ورودی است که 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، اجرای الگوریتم شروع شده و مقادیر پارامترهای ورودی در تمامی جوامع یکسان در نظر گرفته شد [۳۵]. پارامترهای ورودی برای بهترین عملکرد الگوریتم در جدول ۳ آمده است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی، مربوط به تعداد مورچه‌های به‌کار گرفته شده در الگوریتم است. این تعداد از مسئله‌ای به مسئله دیگر متفاوت است. هر چه پیچیدگی مربوط به فضای جواب بیشتر باشد، از تعداد بیشتری مورچه باید استفاده شود. از طرف دیگر هر چقدر تعداد مورچه‌ها بالا می‌رود، زمان اجرای برنامه نیز افزایش می‌یابد. از این رو رسیدن به تعداد مناسبی از مورچه‌ها نیاز به اجراهای متعدد برنامه دارد. در این تحقیق تعداد مناسب مورچه‌ها برای مدل هزینه-زمان ۳۰۰ و برای مدل هزینه-تختی ۲۵۰ به دست آمد.

پارامتر مهم دیگری که زمان اجرای برنامه و میزان همگرایی به جواب بهینه را کنترل می‌کند، مقدار تکرارهای داخلی برنامه جامعه مورچه‌ها است. این پارامتر به همراه تعداد مورچه‌ها، تعداد فراخوانی شبیه‌سازی را مشخص می‌کنند. ضرب تعداد مورچه‌ها در تکرارهای داخلی برنامه، تعداد دفعاتی که شبیه‌سازی اجرا خواهد شد را نشان می‌دهد. مقدار تکرارهای داخلی برنامه برای مدل هزینه-زمان ۴۰

² Air Stripping

¹ Monitoring wells

جدول ۲- ضرایب هزینه [۱۳]

مقدار	تعریف	ضرایب
۰/۰۵	ضریب تخفیف	i_r
۴۷۵۵ (\$perL/s – year)	هزینه تزریق (اکسیژن، مواد مغذی، و پمپاژ)	C^P
۱۵۸۵۰ (\$perL/s – year)	هزینه تخلیه (تصفیه و پمپاژ)	C^{IP}
۱۲۰۰۰	هزینه احداث چاه	C^{IP}
$D_{1.26 L/s} = 20000 \$$	هزینه تسهیلات تزریق	D
$D_{2.52 L/s} = 24000 \$$		
$D_{3.79 L/s} = 28000 \$$		
$D_{5.05 L/s} = 32000 \$$		
$D_{6.31 L/s} = 36000 \$$		
$D_{7.57 L/s} = 40000 \$$		
$D_{8.83 L/s} = 44000 \$$		
$E_{1.26 L/s} = 30000 \$$	هزینه تسهیلات تخلیه	E
$E_{2.52 L/s} = 38000 \$$		
$E_{3.79 L/s} = 46000 \$$		
$E_{5.05 L/s} = 54000 \$$		
$E_{6.31 L/s} = 62000 \$$		
$E_{7.57 L/s} = 70000 \$$		

بخش، مدل چندین بار اجرا شود. در هر یک از بخشهای این تحقیق مدل شبیه‌سازی-بهینه‌یابی ۱۰ بار اجرا شد.

در صورتی که سناریوی اجرا شده از قیدهای کمی و یا کیفی مدل تخطی داشته باشد، مقدار تابع هدف متناظر با آن جواب جریمه می‌شود. مقدار این جریمه متناسب با تعداد گره‌هایی است که تخطی در آنها صورت گرفته است. این مقدار جریمه باعث می‌شود که سناریوی مورد نظر با سناریوهای دیگری که تخطی نداشته‌اند، قابل رقابت نباشد.

۳-۱-۲- مدل حداقل هزینه-زمان

مدل‌سازی دوهدفه حداقل هزینه-زمان برای مسئله احیای آبهای زیرزمینی با ۱۴ متغیر تصمیم، شامل دبی پمپاژ در ۷ چاه تزریق، ۶ چاه تخلیه و ۱ متغیر زمان، انجام شد. نتایج به‌دست آمده مطابق جدول ۴ نشان می‌دهند که با امکانات منظور شده، دوره احیا بین ۲/۵ تا حدود ۵ سال خواهد بود. همان‌طور که در ابتدای تحقیق اشاره شد، در شرایطی که توده آلودگی به‌صورت طبیعی در جهت جریان آب حرکت کند، بعد از گذشت ۵ سال به چاههای کنترل در پایین دست خواهد رسید. مطابق با جدول ۴ اگر در ۵ سال عملیات احیا انجام شود، بهترین جواب به‌دست آمده برابر با ۱۶۳ میلیون دلار است. این در حالی است که کوتاه‌ترین زمان ممکن برای انجام عملیات احیا برابر با ۲/۵ سال به‌دست آمده است که حدود ۵۰ درصد بر هزینه عملیات می‌افزاید. الگوریتم بهینه‌یابی در مدل‌سازی

جدول ۳- پارامترهای ورودی الگوریتم بهینه‌یابی مورچگان

ردیف	پارامتر	مقادیر	توضیحات
۱	τ_0	۱	مقدار اولیه ماتریس فرمان
۲	ρ	۰/۱	مقدار تبخیر فرومان
۳	q_0	۰/۹	کنترل‌کننده احتمال انتخاب تصادفی در الگوریتم جامعه مورچگان
۴	β	۰	پارامتر احتمال انتخاب مسیر
۵	α	۱	پارامتر احتمال انتخاب مسیر
۶	η	-	هدایت‌کننده کاوشی

و برای مدل هزینه-تخطی ۳۰ به‌دست آمد. مقدار اولیه فرومان در 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. مقدار تبخیر فرومان از مسیرهای مختلف نیز ۰/۱ به‌دست آمد. برای پیشگیری از همگرایی الگوریتم به حداقل‌های محلی، پارامتری در داخل الگوریتم مورچه‌ها در نظر گرفته شده است که این پارامتر q_0 ، مقداری حدود ۰/۹ را به خود گرفته است. پارامترهای α, β, η و نیز مطابق با توصیه‌های تحقیقات گذشته اتخاذ شد [۳۶]. بعد از نهایی کردن پارامترهای ورودی، مدل شبیه‌سازی-بهینه‌یابی آماده بهره‌برداری است. رفتار احتمالاتی و تصادفی الگوریتم جامعه مورچه‌ها باعث می‌شود تا برای اطمینان از نتیجه حاصله در هر

انجام گرفته، جواب شدنی برای ۲ سال پیدا نکرده است. در صورتی که حداکثر میزان دبی‌های تزریق و تخلیه مجاز در مدت ۲ سال اعمال شوند، از قیدهای کمی مسئله تخطی می‌شود و مسئله فاقد جواب شدنی می‌شود. از طرفی دیگر در صورتی که دبی‌های پمپاژ و تزریق مقادیر کمتری را داشته باشند، برای دوره احیای کوچک‌تر از ۲ سال قید کیفیت وارد عمل شده و دوباره مسئله فاقد جواب شدنی می‌شود. به این ترتیب جوابهای شدنی در بین ۲/۵ تا ۵ سال به دست آمده‌اند. برای بیش از ۵ سال جواب قابل رقابت و غالب (پارتو) به دست نیامد. این نشان می‌دهد که با توجه به سرعت جریان و فاصله‌ای که توده آلودگی تا محل چاههای پایین دست دارد، جواب بهینه غالب برای بیش از ۵ سال به دست نمی‌آید. به عبارتی دیگر با افزایش زمان احیا هزینه‌ها کاهش پیدا نمی‌کنند. در تمامی سناریوهای منتخب، الگوریتم از چهار چاه (U1, U2, U4, E2) استفاده کرده است. چاههای تزریق در حوالی حداکثر غلظت توده آلودگی قرار دارند و چاه تخلیه در بخش میانی پایین دست جریان واقع شده است. در جوابهای غالب، هزینه احداث هر ۴ چاه در مقدار ۴۸۰۰۰ دلار به صورت ثابت بوده است. این در حالی است که هر چه زمان بیشتری برای عملیات احیا وجود داشته باشد، هزینه مربوط به عملیات تزریق و تخلیه و تاسیسات مورد نیاز کاهش پیدا می‌کند. البته مطابق با نتایج، روند بهینه تا جایی ادامه دارد که مدت زمان پروژه از حد نهایی تجاوز نکند که در این تحقیق ۵/۵ سال بود.

همان طوری که ذکر شد، زمان پاک‌سازی و احیای آبخوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای مورد علاقه مدیران است. یک مدیر با توجه به اهمیت زمان بازدهی پروژه و همچنین هزینه انجام آن تصمیم نهایی را خواهد گرفت. نمودار مصالحه به دست آمده در این بخش از ارزش ویژه‌ای برای مدیران برخوردار خواهد بود (شکل ۴).

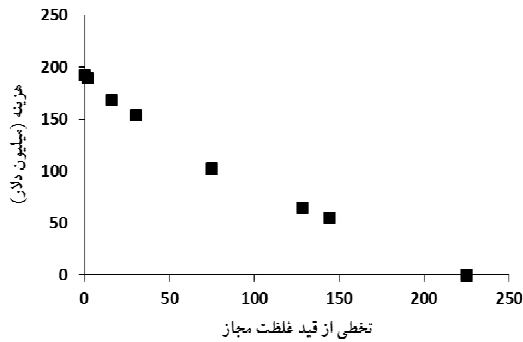
۳-۱-۳- مدل حداقل هزینه- تخطی از غلظت مجاز آلاینده

نتایج مدل‌سازی دوهدفه حداقل هزینه-تخطی مطابق با جدول ۵ است. در این مدل‌سازی تعداد متغیرهای تصمیم ۱۳ بوده و زمان اجرای پروژه احیا برابر ۳ سال در نظر گرفته شد. مطابق با نتایج به دست آمده، بازه هزینه‌ها در نمودار مصالحه از ۱۹۲ میلیون دلار تا صفر گسترده شد. مقدار حد بالا همان مقداری است که در بخش قبلی تحقیق بهترین جواب برای سناریوی با زمان ۳ سال به دست آمده بود. همان طور که ملاحظه می‌شود مقدار تخطی از قید برای این جواب صفر است. در واقع بهترین جواب به دست آمده برای حالتی است که قید $C_{k,T} \leq C_{cl}$ برقرار بوده است. با کاهش هزینه‌ها، تخطی از قید شروع شده و روند افزایشی به خود می‌گیرد. حد پایین جوابها مربوط به حداقل هزینه و حداکثر تخطی است که برای حالتی برقرار می‌شود که هیچکدام از ۱۳ چاه در نظر گرفته شده، فعال نباشند. در واقع جریان بدون اعمال سناریوی مدیریتی بوده و آلودگی به صورت طبیعی کاهش می‌یابد. همان طور که از نمودار مصالحه شکل ۵ مشخص است حداکثر تخطی را جواب اخیر به دنبال خواهد داشت.

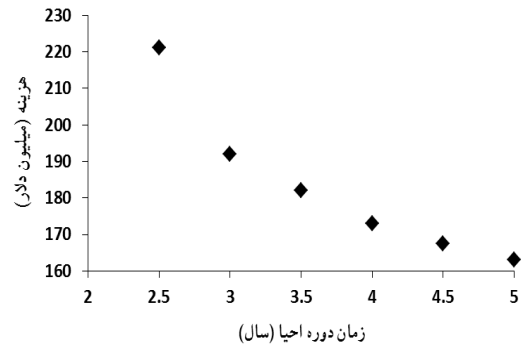
مطابق با نتایج جدول ۵ می‌توان با قبول مجموعاً ۱۶ ppm تخطی از مقدار مجاز غلظت در کل آبخوان (۷/۱ درصد از کل توده آلودگی)، حدود ۲۴ میلیون دلار از هزینه‌های پروژه کاست. مسئله مذکور به صورت فرضی بوده و مقیاس اعداد طرح شده در آن طوری است که هزینه احداث چاهها در جوابهای به دست آمده قابل توجه است و به صورت متوسط ۲۵ تا ۳۵ درصد کل هزینه‌ها را شامل می‌شود در صورتی که مقیاس هزینه احداث چاه در مسائل واقعی درصد مشارکت کمی را در بر می‌گیرد. بنابراین به احتمال بسیار می‌توان کاهش هزینه‌های بیشتری را در قبال استفاده از مدل هزینه-تخطی در مسائل واقعی انتظار داشت.

جدول ۴- نتایج مدل دو هدفه هزینه- زمان انجام پروژه احیا

زمان دوره احیا (سال)	هزینه احداث چاه (میلیون دلار)	هزینه تزریق (میلیون دلار)	هزینه تخلیه (میلیون دلار)	هزینه تسهیلات تزریق (میلیون دلار)	هزینه تسهیلات تخلیه و تصفیه (میلیون دلار)	هزینه کل
۲	-	-	-	-	-	جواب نشدنی
۲/۵	۳۰.۰۰۰	۳۲.۰۰۰	۵۹.۸۴۰	۵۶.۶۲۱	۴۸.۰۰۰	۲۲۱
۳	۳۰.۰۰۰	۲۸.۰۰۰	۴۵.۲۵۸	۴۰.۷۳۱	۴۸.۰۰۰	۱۹۲
۳/۵	۳۰.۰۰۰	۲۴.۰۰۰	۴۱.۲۷۱	۳۱.۶۲۰	۴۸.۰۰۰	۱۸۲
۴	۳۰.۰۰۰	۲۴.۰۰۰	۳۷.۱۱۱	۳۱.۱۶۹	۴۸.۰۰۰	۱۷۳
۴/۵	۳۰.۰۰۰	۲۴.۰۰۰	۳۴.۶۱۱	۳۰.۸۸۷	۴۸.۰۰۰	۱۶۷/۵
۵	۳۰.۰۰۰	۲۴.۰۰۰	۳۲.۷۰۹	۲۸.۲۸۱	۴۸.۰۰۰	۱۶۳
۵/۵	-	-	-	-	-	جواب مغلوب



شکل ۵- نمودار مصالحه هزینه -تختی از قید غلظت مجاز



شکل ۴- نمودار مصالحه هزینه - زمان

جدول ۵- نتایج مدل دو هدفه هزینه - تختی از غلظت مجاز

هزینه کل (میلیون دلار)	۱۹۲	۱۸۹/۳	۱۶۷/۸۵	۱۵۳	۱۰۲	۶۴/۳	۵۴/۸۷	۰
کل تختی از غلظت مجاز (ppm)	۰	۲	۱۶	۳۰	۷۵	۱۲۸	۱۴۴	۲۲۵
تختی (%)	۰	۰/۰۱	۷/۱	۱۳/۳	۷۳/۵	۵۶/۹	۶۴	۱۰۰

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه الگوریتم چندهدفه چندجامعه مورچه‌ها، در قالب دو مدل مدیریتی پیشنهادی هزینه-زمان و هزینه-تختی، برای مسئله احیای آلودگی آبهای زیرزمینی با استفاده از فناوری ارتقا یافته بیولوژیکی توسعه پیدا کرد. با توجه به خاصیت گسسته الگوریتم مورچه‌ها، دامنه متغیرهای تصمیم (که مقادیر پمپاژ و زمان بوده‌اند) به بازه‌های معینی تقسیم شد. با استفاده از مدل توسعه داده شده هزینه-زمان، بهترین طراحی در کمترین زمان به دست آمد. این نتیجه مورد علاقه طراحان و تصمیم گیرندگان مربوطه است. در واقع با استفاده از مدل‌های پیشنهادی می‌توان مسئله را با کمترین هزینه و در عین حال کمترین زمان حل کرد. همچنین نشان داده شد که برای حل بهینه مسئله، محدودیت زمانی نیز وجود دارد. در صورتی که زمان اجرای دوره احیا از ۵/۵ سال بیشتر شود، سناریوی بهینه قابل رقابتی با جوابهای غالب بدست آمده قبلی، مشاهده نمی‌شود. در واقع مدت زمان عکس‌العمل تیم اجرایی برای رفع مشکل نیز در اختیار مدیران قرار می‌گیرد. یکی دیگر از دغدغه‌های برنامه‌ریزان، داشتن مشکل آلودگی و در عین حال کمبود بودجه است. این مسئله باعث ارائه دومین مدل دوهدفه حداقل هزینه-

تختی از غلظت مجاز شد. با آزادسازی قید غلظت، می‌توان هزینه‌ها را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. آنچه مشخص است هرچه مقادیر هزینه کاهش یابد، مقادیر تختی از غلظت مجاز نیز افزایش پیدا می‌کند. نمودار مصالحه به دست آمده پیشنهادات مختلفی را برای تیم مدیریتی ارائه می‌دهد تا بر اساس توان مالی بتوانند تصمیمات کیفی مختلفی بگیرند.

۵- پیشنهاد

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که نتایج به دست آمده از الگوریتم چندهدفه جامعه مورچه‌ها با سایر الگوریتم‌های بهینه‌یابی چند هدفه، برای حل این مسئله، مقایسه شود. ارتباط ساده با مدل شبیه ساز و مصرف پایین حافظه پردازشگر از جمله مزایای الگوریتم بهینه‌یابی چند جامعه مورچه‌ها است. همچنین برای رسیدن به سایر اهداف مدیریتی مانند تعدیل توده آلودگی، مقادیر جرم باقیمانده در آبخوان، پیشنهاد می‌شود مدل‌هایی با بیش از دو هدف تشکیل شود تا بتوان نتایج جامع‌تری را در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان کلان کشوری قرار داد

۶- مراجع

- 1-Flathman, P. E., Jerger, D. E., and Exner, J. H. (1993). *Bioremediation field experience*, Lewis, Boca Raton, Fla.
- 2-Hinchee, R. E., Alleman, B. C., Hoeppe, R. E., and Miller, R. N. (1994). *Hydrocarbon bioremediation*, Lewis, Boca Raton, Fla.
- 3-Cookson, J. T. (1995). *Bioremediation engineering: Design and application*, McGraw-Hill, N.Y.

- 4-Alexander, M. (1994). *Biodegradation and bioremediation*, Academic Press, N.Y.
- 5-Safavi, H.R., Sookhak Lari, K., and Taebi, A. (2006). "Simulation of 'Pump-and-Treat' and 'Air Sparging' for in situ remediation of contaminated groundwater." *Journal of Water and Wastewater*, 51, 31-38 (In Persian).
- 6-Sookhak Lari, K., and Safavi, H.R. (2008). "A simulation-optimization model for air sparging and pump and treat groundwater remediation technologies." *J. of Environmental Informatics*, 12(1),44-53.
- 7-Sookhak Lari, K., and Safavi, H.R. (2006). "Using regression model for optimal groundwater remediation and comparison with genetic algorithm." *Secound Iran Water Resource Management Conference*, Isfahan (In Persian)
- 8-Minsker, B. S., and Shoemaker, C. A. (1996). "Differentiating a finite element biodegradation simulation model for optimal control." *Water Resour. Res.*, 32(1), 187-192.
- 9-Minsker, B. S., and Shoemaker, C. A. (1998). "Dynamic optimal control of in situ bioremediation of groundwater." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 124(3), 149-161.
- 10-Yoon, J-H., and Shoemaker, C. A. (1999). "Comparison of optimization methods for groundwater bioremediation." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 125(1), 54-63.
- 11-Smally, J. B., and Minsker, B. S., (2000). "Risk-based insitu bioremediation design using noisy genetic algorithm." *Water Resource Research*, 36(10), 3043-3052.
- 12-Prasad, R. K., and Mathur, S. (2006). "Potential ell locations in insitu bioremediation design using neural network embedded Monte Carlo approach." *Practice Periodical Hazardous, Toxic, and Radioactive Management*, 12(4), 260-269.
- 13-Shieh, H. J., and Peralta, R. C., (2005), "Optimal insitu bioremediation design by hybrid genetic algorithm-simulated annealing." *J. of Water Resources Planning and Management*, 131(1), 67-78.
- 14-Kollat, J. B., and Reed, P. M. (2006). "Comparing state-of-the-art evolutionary multi-objective algorithms for long-term groundwater monitoring design." *Advances in Water Resources*, 29(6), 792-807.
- 15-Beckfort, O., Amy, B., Hilton, C., and Liu, X. (2004) "Development of an enhanced multi objective robust genetic algorithm for groundwater remediation design under uncertainty." *Proceeding of Water Resource systems*, ISBN: 0-7844-0685-5.
- 16-Erickson, M., Mayer, A., and Horn, J. (2002). "Multi-objective optimal design of groundwater remediation Systems: Application of the niched Pareto genetic algorithm (NPGA)." *Advances in Water Resources*, 25(1), 51-65
- 17-Park, C. H., and Aral, M. M. (2004). "Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers." *J. of Hydrology*, 290(1-2), 80-99.
- 18-Baveye, P., and Valocchi, A. (1989). "An evaluation of mathematical models of the transport of biologically reacting solutes in saturated soils and aquifers." *Water Resour. Res.*, 25(6), 1413-1421.
- 19-Rittmann, B. E., McCarty, P. L., and Roberts, P. V. (1980). "Traceorganics biodegradation in aquifer recharge." *Groundwater*, 18(3), 236-243.
- 20-Molz, F. J., Widdowson, M. A., and Benefield, L. D. (1986). "Simulation of microbial growth dynamics coupled to nutrient and oxygen transport in porous media." *Water Resour Res.*, 22(8), 1207-1216.
- 21-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), 1973-1982.
- 22-Rifai, H. S., and Bedient, P. B. (1990). "Comparison of biodegradation kinetics with an instantaneous reaction model for groundwater." *Water Resour. Res.*, 26(4), 637-645.
- 23-Burges, K. S., Rifai, H. S., and Bedient, P. B. (1993). "Flow and transport modeling of a heterogeneous field site contaminated with dense chlorinated solvent waste." *Proceedings of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection, and Restoration*, American Petroleum Institute and NGWA, Houston, Texas, 693-707.

- 24-Wiedemeier, T. H., Wilson, J. T., Miller, R. N., and Campbell, D. H. (1994). "United air force guidelines for successfully supporting intrinsic remediation with an example from hill air force base." *Proceeding of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater: Prevention, Detection, and Restoration*, NGWA and American Petroleum Institute, Houston, Texas, 317-334.
- 25-USEPA. (1998). *BIOPLUME III natural attenuation decision support system—User's manual version 1.0*, EPA/600/R-98/010, Washington, D. C.
- 26-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.
- 27-Mariano, C. E., and Morales, E. (2002). *A multiple objective ant-Q algorithm for the design of water distribution irrigation networks*, Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua, Mexico.
- 28-Iredi, S., D., and Middendorf, M. (2001). "Bi-criterion optimization with multi colony ant algorithms." *Proceeding of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin.
- 29-Doerner, K., Gutjahr, W.J., Hartl, R.F., Strauss, C. and Stummer, C. (2004). "Pareto ant colony optimization: A metaheuristic approach to multiobjective portfolio selection, *Annals of Operations Research*, to appear.
- 30-Baran, B., and Schaerer, M. (2003). "A multiobjective ant colony system for vehicle routing problem with time windows." *Twenty first IASTED International Conference on Applied Informatics*, Innsbruck, Austria, 97-102.
- 31-Afshar, A., Sharifi, F., and Jalali, M. R. (2008). "Nondominated ARCHRIVING multicoloni and ant algorithm for multi objective optimization; Application to Multi purpose reservoir operation." *J. of Engineering Optimization*, 41 (4), 313-325.
- 32-Hosseinzadeh, H., Afshar, A., and Sharifi, F. (2010). "Multi objective ant colony algorithm for waste load allocation." *Iran Water Resources Research*, 17, (2), 1-13. (In persian).
- 33-Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002) "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II" *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6, 182-197.
- 34-Wang, X. L., and Mahfouf, M. (2004). "ACSAMO: An adaptive multiobjective optimization algorithm using the clonal selection principle." The Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China
- 35-Shieh, H. J. (1997). "Optimal system design of insitu bioremediation using simulated annealing and parallel recombinative simulated annealing." Ph. D. Thesis, Utah State University.
- 36-Jalali M. R., Afshar A., and Marino, M. A. (2006). "Reservoir operation by ant colony optimization algorithms." *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 30. (B1), 107-117.