

بهینه‌سازی گزینه‌های زیست‌پالایی در آبخوان‌های آلوده نفتی: مطالعه موردی پالایشگاه نفت شیراز

سروش امیراکبری^۱، سعید علیمحمدی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی s_amirakbari@mail.sbu.ac.ir

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی s_alimohammadi@mail.sbu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

چکیده

در این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی با هدف به حداقل‌سازی هزینه زیست‌پالایی در یک آبخوان آلوده نفتی، ارائه شده است. شبیه‌سازی جریان و آلودگی با مدل‌های MODFLOW6 و MT3D-USGS و بهینه‌سازی زیست‌پالایی با الگوریتم تکامل تفاضلی انجام شد، و صحت مدل‌سازی با یک مسئله آزمون کنترل گردید. در ادامه پالایشگاه شیراز به عنوان مطالعه موردی انتخاب و پاکسازی آلودگی BTEX (بنزن، تولوئن، اتیل‌بنزن و زایلن)، حاصل از نشت محتمل در چهار گزینه بررسی شد. نتایج گزینه ۱ نشان داد که زیست‌پالایی طبیعی قادر به کاهش غلظت آلاینده بنزن تا مقدار مجاز نیست. سه گزینه دیگر بر اساس موقعیت، تعداد چاه‌های زیست‌پالایی و مدت زمان اجرا تعریف شدند و در هر سه گزینه، غلظت آلاینده در انتهای دوره ده ساله، به کمتر غلظت استاندارد رسید. نتایج

بهینه‌سازی نشان داد که سناریوی دوم (با ۲ چاه تزریق و ۲ چاه پمپاژ، طی ۴ سال) با هزینه کل ۱۵۷۶۳۴ دلار، ۱۲/۱ درصد ارزان‌تر از گزینه سوم و ۹/۵ درصد ارزان‌تر از گزینه چهارم است. در مقابل گزینه سوم سریع‌ترین نرخ پاک‌سازی را داشت. به طور خلاصه، گزینه دوم هزینه پاک‌سازی کمتری داشته و به علت طولانی‌تر بودن اجرا، نرخ پمپاژ و تغذیه کمتری نیز دارد، و گزینه سوم دارای اثربخشی پاک‌سازی سریع‌تری است.

کلمات کلیدی: پاک‌سازی آب زیرزمینی، BTEX، زیست‌پالایی، پالایشگاه شیراز، الگوریتم تکامل تفاضلی،

MT3D-USGS, MODFLOW6

Optimization of Bioremediation Alternatives in Petroleum-Contaminated Aquifers: A Case Study of Shiraz Oil Refinery

Soroush Amirakbari¹, Saeed Alimohammadi^{2*}

1-PhD student of Civil Engineering, Shahid Beheshti University

s_amirakbari@mail.sbu.ac.ir

2-Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University

s_alimohammadi@mail.sbu.ac.ir

Received: 30/11/2024

Revised: 28/04/2025

Accepted: 26/05/2025

Abstract

In this study, a simulation-optimization model was developed to minimize the cost of bioremediation in a petroleum-contaminated aquifer. Groundwater flow and contaminant transport were simulated using MODFLOW6 and MT3D-USGS, while bioremediation optimization was performed using the differential evolution algorithm. The accuracy of the modeling approach was verified through a benchmark test.

Subsequently, the Shiraz Oil Refinery was selected as a case study, and the remediation of BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene) contamination resulting from a potential spill was evaluated under four scenarios. The results of Scenario 1 indicated that natural bioremediation alone could not reduce benzene concentrations to the regulatory limit. The other three scenarios were defined based on the location, number of bioremediation wells, and remediation duration. In all three cases, the contaminant concentration was reduced below the regulatory standard by the end of the ten-year period. Optimization results showed that Scenario 2 (with two injection wells and two extraction wells over four years) had the lowest total cost of \$157,634, making it 12.1% cheaper than Scenario 3 and 9.5% cheaper than Scenario 4. In contrast, Scenario 3 exhibited the fastest remediation rate. In summary, Scenario 2 was the most cost-effective option due to its lower bioremediation cost and lower pumping and injection rates over a longer duration, whereas Scenario 3 was more effective in achieving rapid remediation.

Keywords: Groundwater remediation, BTEX, Bioremediation, Shiraz refinery, Differential evolution algorithm, MODFLOW6, MT3D-USGS

۱-مقدمه

برخلاف آب‌های سطحی، آلودگی در آب‌های زیرزمینی مدت طولانی‌تری باقی مانده و در اغلب حالات به‌خودی‌خود از بین نمی‌رود (David Keith Todd, Larry W. Mays, 2005). از این‌رو، شناخت انواع آلاینده‌های آب زیرزمینی و تلاش برای حذف آنها به کمک روش‌های مختلف پاک‌سازی ضروری است (Mayer and Endres, 2007). پاک‌سازی آبخوان‌ها، می‌تواند یک فرآیند پرهزینه باشد اما در دراز مدت در مقایسه با هزینه‌های بالقوه مرتبط با اثرات آلودگی آب‌های زیرزمینی مقرون به صرفه است.

یک دسته مهم از آلاینده‌های آب زیرزمینی LNAPLها هستند که آلاینده‌های مایع آلی نامحلول یا بسیار کم محلول در آب هستند، اما همین مقدار کم گاهی از استانداردهای لازم برای سلامت انسان فراتر می‌رود، و بنابراین اگر این آلاینده‌ها وارد خاک و آب زیرزمینی شوند منبع آلاینده خطرناکی برای مدت زمان طولانی خواهند بود. این آلاینده‌ها بر اساس چگالی خود به دو دسته تقسیم می‌شوند: LNAPLها که سبک‌تر و DNAPLها که سنگین‌تر از آب هستند (Rajandrea Sethi, Antonio Di Molffetta, 2019).

در میان LNAPLها، گروهی از مواد هیدروکربنی معطر تک‌حلقه‌ای با عنوان BTEX شناخته می‌شوند که مخفف چهار ترکیب بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن است. این مواد به دلیل اثرات زیست محیطی و سمیت بالا، بیش از سایر آلاینده‌های نفتی مورد توجه قرار گرفته‌اند؛ جدول (۱) برخی از مهمترین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ترکیبات BTEX، و جدول (۲) مهمترین اثرات و پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی این ترکیبات را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ترکیبات BTEX (U.S. Environmental Protection Agency (EPA)., 2012a, 2012b, 2012c, 2012d)

ترکیب	فرمول شیمیایی	توصیف فیزیکی	فشار بخار (mmHg در ۲۵°C)	حلالیت در آب (mg/L)	نقطه جوش (C°)
بنزن (B)	C ₆ H ₆	مایع بی‌رنگ یا زرد کم‌رنگ با بوی شیرین و معطر	۹۵/۲	۱/۷۸۰	۸۰/۱
تولون (T)	C ₆ H ₅ CH ₃	مایع بی‌رنگ با بوی ملایم و شیرین	۲۸/۴	۵۳۴/۸	۱۱۰/۶
اتیل‌بنزن (E)	C ₆ H ₅ C ₂ H ₅	مایع بی‌رنگ با بوی مشابه بنزن	۹/۵۳	۱۶۱	۱۳۶/۲
زایلن (X)	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	مایع بی‌رنگ و معطر	۶/۶ - ۸/۷	۱۳۰-۱۹۸	۱۳۸-۱۴۴

جدول ۲- اثرات بهداشتی و زیست محیطی ترکیبات BTEX (U.S. Environmental Protection Agency (EPA)., 2012a, 2012b, 2012c, 2012d)

ترکیب	اثرات زیست محیطی	اثرات بهداشتی
بنزن (B)	تبخیر سریع آن موجب آلودگی هوا می‌شود؛ آب و خاک را آلوده می‌کند و برای حیات آبریان مضر است	تماس طولانی مدت باعث بروز لوسمی و اختلالات خونی می‌شود؛ تماس حاد باعث سرگیجه، سردرد و حالت تهوع می‌شود.
تولون (T)	موجب تشکیل ازن سطحی می‌شود؛ می‌تواند منابع آبی را آلوده کند و به اکوسیستم‌های آبی آسیب بزند	ایجاد اختلال سیستم عصبی مرکزی مانند سرگیجه، سردرد، تهوع و خستگی؛ تماس طولانی مدت می‌تواند باعث آسیب به کبد و کلیه‌ها می‌شود.
اتیل‌بنزن (E)	مشابه بنزن و تولون، می‌تواند منابع آب و خاک را آلوده کرده و برای حیات آبریان خطرناک باشد	تحریک چشم‌ها، پوست و سیستم تنفسی. تماس طولانی مدت ممکن است به سیستم عصبی آسیب بزند.
زایلن (X)	تبخیر سریع آن باعث آلودگی هوا می‌شود؛ آب و خاک را آلوده کرده و به اکوسیستم‌های آبی آسیب می‌زند	سرگیجه، سردرد و مشکلات تنفسی و در تماس طولانی مدت می‌تواند منجر به آسیب به کبد و کلیه‌ها شود.

سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، مقادیر مجاز برای اجزای تشکیل‌دهنده BTEX و سایر آلاینده‌های شیمیایی در آب را به دقت تعیین کرده است. این مقادیر، تحت عنوان حداکثر سطح غلظت آلاینده‌ها (MCL) شناخته شده‌اند که برای بنزن ۰/۰۰۰۰۰۵، برای تولون ۰/۰۰۱، برای اتیل بنزن ۰/۰۰۰۰۷ و برای زایلن ۰/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین شده است (US EPA, 2015). ذکر این نکته مهم است که اغلب با تزریق اکسیژن، سیستم‌های اکسیداسیون هوازی بهبود یافته، امکان تجزیه زیستی سریع‌تر آلاینده‌ها را نسبت به سیستم‌های بی‌هوازی فراهم می‌کنند (US EPA, 2014).

زیست‌پالایی طبیعی یا تخریب زیستی به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن آلاینده‌ها به‌طور طبیعی توسط میکروارگانیسم‌ها بدون دخالت انسان کاهش می‌یابند. برای تکمیل و تسریع این فرآیند، زیست‌پالایی پیشرفته به کار می‌رود که با تغییر شرایط محیطی و تحریک میکروارگانیسم‌ها، سرعت تجزیه آلاینده‌ها افزایش می‌یابد. زیست‌پالایی پیشرفته شامل تقویت زیستی (افزودن میکروارگانیسم‌های انتخابی خاص)، تحریک زیستی (تامین مواد مغذی و گیرنده‌های الکترون)، و هوادهی زیستی (تامین اکسیژن) می‌شود (US

(EPA, 2013). از آنجایی که زیست‌پالایی پیشرفته سرعت واکنش تجزیه زیستی را تسریع می‌کند، به زمان کمتری نیز نسبت به زیست‌پالایی ذاتی نیاز دارد (National Research Council, 1993)، در نتیجه ادغام روش‌های پیشرفته می‌تواند کارایی و سرعت پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

(Shieh and Peralta (2005) از یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای سیستم زیست‌پالایی درجا استفاده کردند. آنها از مدل BIOPLUMEII برای شبیه‌سازی جریان و فرآیند زیست‌پالایی آبخوان و از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده کردند؛ هدف مدل، به حداقل رساندن هزینه کل اجرایی سیستم و جانمایی چاه‌ها بر اساس یک مدل بهینه در حالت ماندگار است. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که بکارگیری استراتژی پمپاژ متغیر با زمان در مقایسه با مدل ماندگار، هزینه پمپاژ را ۳۱ درصد کاهش می‌دهد (Shieh and Peralta, 2005).

(Rezaei et al. (2020) مدل بهینه‌سازی-شبیه‌سازی چندهدفه‌ای برای سیستم‌های زیست‌پالایی درجا ارائه کردند که هدف آن به حداقل رساندن هزینه‌ها و به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان سیستم بود. در این مدل از نرم‌افزار BIOPLUMEII برای شبیه‌سازی فرآیند زیست‌پالایی و از الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) برای بهینه‌سازی استفاده شد. این مدل نشان داد که زیست‌پالایی درجا می‌تواند زمان مورد نیاز برای کاهش بنزن را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد (Rezaei et al., 2020).

(Raei et al. (2017) یک مدل شبیه‌سازی چندهدفه به منظور بهینه‌سازی پاک‌سازی آب زیرزمینی به روش زیست‌پالایی درجا را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، مدل شبیه‌سازی BIOPLUMEIII با الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) برای طراحی بهینه سیستم زیست‌پالایی درجا آب زیرزمینی، توسعه داده شده است. نتایج نشان داد که مکان‌یابی بهینه چاه‌ها می‌تواند هزینه‌ها را ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش داده و پراکندگی هاله آلاینده را نیز کاهش دهد (Raei et al., 2017).

(Taravatroy et al. (2019) از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه با منطبق فازی برای زیست‌پالایی درجا استفاده کردند؛ در این پژوهش نیز همان مسئله (Shieh and Peralta (2005) بررسی و از مدل BIOPLUMEIII برای شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده استفاده شد؛ نتایج آن نشان داد که مکان‌یابی چاه‌های زیست‌پالایی در سطح مطالعه می‌تواند تأثیر قابل توجهی در پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی داشته باشد (Taravatroy et al., 2019).

در پژوهشی دیگر واعظی‌هیر و همکاران در سال ۱۳۹۹، پتانسیل نشت آلاینده‌های هیدروکربنی از پالایشگاه شازند و مجتمع پتروشیمی شازند به‌عنوان دو مجتمع عظیم که با آلاینده‌های خطرناک سروکار دارند، را مورد بررسی قرار دادند؛ در این پژوهش، وضعیت آبخوان منطقه برای تجزیه زیستی آلاینده‌های هیدروکربنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شرایط آبخوان برای

زیست‌پالایی آلاینده‌های نفتی به روش هوازی مساعد است و باکتری‌های موجود در آبخوان قادر به پاک‌سازی طبیعی آلاینده‌ها خواهند بود (واعظی هیر و همکاران ۱۳۹۹).

جنت رستمی و همکاران در سال ۱۳۹۹، به مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی فرآیند زیست‌پالایی آلودگی‌های نفتی (BTEX) در مقیاس آزمایشگاهی در آب زیرزمینی پرداختند. به منظور شبیه‌سازی رفتار میکروارگانیسم‌ها در تجزیه زیستی آلاینده‌ها از مدل RT3D استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل‌سازی ریاضی و شرایط آزمایشگاهی همخوانی دارند و این مدل قابلیت شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای زیستی را داراست. (جنت رستمی و همکاران ۱۳۹۹).

هدف این پژوهش، توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی پاک‌سازی آبخوان‌های آلوده به مواد نفتی سبک (LNAPL) به روش زیست‌پالایی است؛ به گونه‌ای که هزینه کل توسعه و بهره‌برداری سیستم حداقل شود. شایان ذکر است که بهینه‌سازی پاک‌سازی آب‌های زیرزمینی، مستلزم به حداکثر رساندن کارایی و اثربخشی فرآیند است.

در اغلب مطالعات پیشین، از مدل BIOPLUME به منظور شبیه‌سازی انتقال جریان و آلاینده و فرآیند زیست‌پالایی استفاده شده است. مدل مذکور اگر چه به دلیل شبیه‌سازی همزمان سه فرآیند مذکور دارای مزیت است، اما دارای محدودیت‌هایی می‌باشد؛ از جمله اینکه یک مدل دوبعدی بوده و و به دلیل به‌روز نشدن، مشکلاتی در سازگاری نرم‌افزاری دارد. به همین دلیل در این مطالعه از دو مدل جامع و جدید سه‌بعدی MODFLOW6 و MT3D-USGS به ترتیب برای شبیه‌سازی جریان، و انتقال آلاینده و فرآیند زیست‌پالایی، همراه با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی (DE) برای توسعه یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی غیرماندگار استفاده شده است که هر دو، مدل‌های جدیدتری می‌باشند. شایان ذکر است که در اکثر مطالعات پیشین، از مثال فرضی Shieh and Peralta (2005) استفاده شده است؛ در پژوهش حاضر، علاوه بر شبیه‌سازی این مثال، مدل‌سازی جریان و پیشروی آلاینده‌های BTEX در یک مثال واقعی، یعنی فاز جدید پالایشگاه نفت شیراز، انجام شده است. همچنین در مطالعات پیشین، مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی که از ترکیب سه مدل یعنی MODFLOW6، MT3D-USGS و DE برای بهینه‌سازی فرآیند زیست‌پالایی استفاده نشده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معادلات حاکم در زیست‌پالایی

زیست‌پالایی، فرآیندی است که طی آن، آلاینده‌ها توسط میکروارگانیسم‌ها به‌طور طبیعی و بدون دخالت انسان (زیست‌پالایی طبیعی) و یا با ورود عوامل خارجی و تسریع فرآیند تحریک میکروارگانیسم‌ها (زیست‌پالایی پیشرفته)، تجزیه می‌شوند. (US EPA, 2013). رابطه (۱) یک فرم کلی برای نرخ تغییر در غلظت یک گیرنده الکترون را توصیف می‌کند (Vivek Bedekar et al., 2016):

$$\frac{\partial EA_n}{\partial t} = Y_{EA_n} \times ED \times \frac{1}{R_{EA_n}} \times k_{EA_n} \left(\frac{EA_n}{K_{EA_n} + EA_n} \right) \times \left(\frac{Ki_{EA_{n-1}}}{Ki_{EA_{n-1}} + EA_{n-1}} \right)! \quad (1)$$

که در آن ED غلظت اهداکننده الکترون (M/L^3)، EA غلظت پذیرنده الکترون (M/L^3)، تعداد کل گیرندگان الکترون، R_{ED} نرخ تأخیر ED، k_{EA_n} نرخ فروپاشی مرتبه اول EA مصرف شده توسط ED، ki_{EA_n} ثابت بازدارندگی برای EA، K_{EA_n} ثابت نیمه اشباع برای EA، Y_{EA_n} ضریب بازده EA_n از طریق تخریب ED است و علامت! نشان می‌دهد که عبارات در پرانتز قبلی یک سری هستند. شایان ذکر است که ترکیبات BTEX در این واکنش‌ها نقش اهدا کننده الکترون را دارند؛ این ترکیبات طی واکنش با مواد مغذی (گیرنده الکترون) به ترکیباتی بی خطر یا کم خطر تبدیل می‌شود. واکنش‌های تجزیه برای اجزای مختلف بنزن، با استفاده از گیرنده‌های الکترون خاص، از روشی پیروی می‌کنند که توسط لو و همکاران ۱۹۹۹ توضیح داده شده است. به عنوان مثال، در ادامه مشاهده می‌شود که چگونه بنزن (C_6H_6) تجزیه می‌شود (Vivek Bedekar et al., 2016).

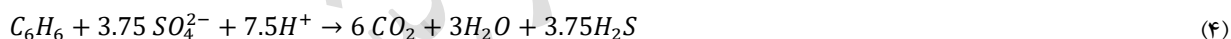
در تنفس هوازی، اکسیژن (O_2) مصرف می‌شود و دی اکسید کربن (CO_2) تولید می‌شود،



در حین نیترات زدایی هم‌زمان نیترات (NO_2) مصرف و گاز نیتروژن (N_2) تولید می‌شود،



همچنین، گوگرد (SO_4^{2-}) مصرف می‌شود که منجر به تولید سولفید هیدروژن (H_2S) می‌شود.



۲-۲- مدل سازی جریان و انتقال آلاینده در آب زیرزمینی

در این پژوهش، مدل‌های MODFLOW6 و MT3D-USGS که آخرین نسخه‌های این نرم‌افزارها هستند به ترتیب برای شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده‌ها در آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است (Hughes et al., 2017; Bedekar et al., 2016). هردو این مدل‌ها معادلات دیفرانسیلی جریان و انتقال آلاینده در آب زیر زمینی (معادلات ۵ و ۶) را به روش تفاضل محدود حل نموده و به گونه‌ای تهیه شده‌اند که با هم سازگاری داشته باشند.

معادله دیفرانسیلی حاکم بر جریان آب زیرزمینی که در مدل MODFLOW عبارتست از:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q'_s = S_s \frac{dh}{dt} \quad (5)$$

که در آن Q'_s شار حجمی تغذیه یا تخلیه در واحد حجم در واحد زمان، S_s ذخیره ویژه مواد متخلخل (L^{-1})، و t زمان (T) می باشد. K بردار هدایت هیدرولیکی (L/T) است؛ K_x, K_y, K_z مقادیر هدایت هیدرولیکی در امتداد محورهای مختصات x, y و z هستند که موازی با محورهای اصلی هدایت هیدرولیکی (L/T) فرض می شوند؛ h بار آبی یا هد جریان (L) است.

معادله دیفرانسیلی انتقال آلاینده آب زیرزمینی در مدل MT3D-USGS عبارتست از:

$$\theta \frac{\partial C^k}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}^k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \theta v_i C^k + q_s C_s^k - q'_s C^k - \lambda_1 \theta C^k - \lambda_2 \rho_b \bar{C}^k \quad (6)$$

که آن، θ تخلخل، C^k غلظت محلول گونه k بر حسب واحد جرم در حجم (M/L^3)، t زمان (T)، ρ_b چگالی بالک مصالح آبخوان (M/L^2)، \bar{C}^k غلظت گونه k جذب شده به مصالح (M/M)، x_j, x_i فاصله در امتداد محورهای مختصات مربوطه (L)، D_{ij} تانسور ضریب پخشیدگی (L^2/T)، V_i سرعت منفذی آب (L/T)، q_s مقدار دبی جریان در واحد حجم و نشان دهنده منابع (T)، C_s^k منبع یا غلظت سینک گونه k (M/L^2)، q'_s تغییرات ذخیره آب در واحد حجم ($1/T$)، λ_1 سرعت واکنش مرتبه اول برای فاز محلول ($1/T$)، λ_2 سرعت واکنش مرتبه اول برای فاز جذب شده (جامد) ($1/T$) متغیر می باشد.

۳-۲- مدل بهینه سازی

به منظور بهینه سازی سیستم زیست پالایی، در این مطالعه از روش به کار رفته توسط (Shieh and Peralta, 2005) استفاده شده است. تابع هدف مدل بهینه سازی سیستم زیست پالایی، به حداقل رساندن هزینه کل سیستم است (Shieh and Peralta, 2005):

$$\text{Minimize } U = \sum_{t=1}^{M^n} \left(\frac{1}{(1+i_r)^{ty_p}} \sum_{e=1}^{M^p} C^p(e) p(e,t) \right) + \text{Max} \left\{ D \left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e,t) \right) \right\}_{t=1}^{M^n} \quad (7)$$

$$+ \text{Max} \left\{ E \left(\sum_{e=1}^{M^e} p(e,t) \right) \right\}_{t=1}^{M^n}$$

که در آن U مجموع ارزش فعلی هزینه پمپاژ و هزینه های سرمایه ای تاسیسات، $p(e,t)$ نرخ تزریق یا پمپاژ در محل e برای دوره تنش t ، $C^p(e)$ ضریب هزینه برای تزریق (شامل اکسیژن، مواد مغذی) و یا پمپاژ (شامل تصفیه و هزینه های عملیاتی پمپاژ)، y_p طول یک دوره زمانی، i_r نرخ بهره، M^n تعداد کل دوره های مدل سازی، y_p طول دوره استرس، M^p تعداد کل چاه های پمپاژ و تزریق، M^i تعداد کل چاه های تزریق، M^e تعداد کل چاه های پمپاژ، $D \left(\sum_{e=1}^{M^i} p(e,t) \right)$ تابع هزینه سرمایه گذاری تاسیسات ($M^p = M^i + M^e$)

تزریق اکسیژن و مواد مغذی است که به شکل رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

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

، $q = 1, 2, \dots, M^Q$

(۸)

D_q هزینه سرمایه‌گذاری تا سیستمات تزریق، زمانی که نرخ کل تزریق بین دو مقدار ظرفیت طراحی CD_q و CD_{q-1} باشد. مقادیر D_q مطابق شکل (۱) تعریف شده است.

M^Q تعداد کل ظرفیت‌های تزریق طراحی جایگزین، $E(\sum_{e=1}^{M^e} p(e.t))$ هزینه سرمایه‌گذاری تاسیسات تصفیه، که تابعی از نرخ کل پمپاژ است و مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

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

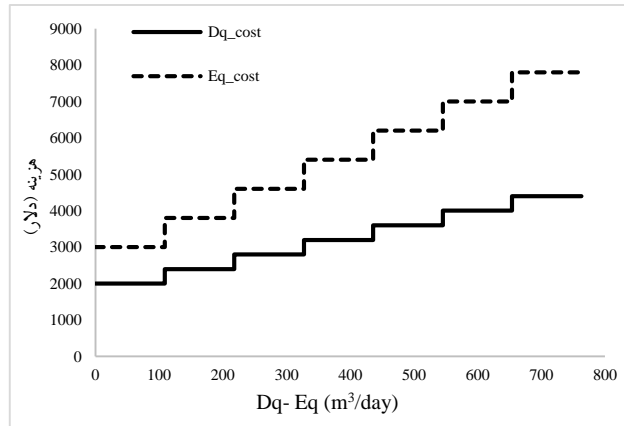
$$E \left(\sum_{e=1}^{M^e} p(e) \right) = E_q \quad \text{if} \quad CE_{q-1} < \sum_{e=1}^{M^e} p(e) \leq CE_q$$

، $q = 1, 2, \dots, M^R$

(۹)

E_q تابع هزینه سرمایه‌گذاری تصفیه است زمانی که نرخ کل پمپاژ بین دو مقدار ظرفیت تصفیه طراحی CE_q ، CE_{q-1} باشد، M^R تعداد کل ظرفیت‌های تصفیه طراحی جایگزین است.

شکل (۱) توابع هزینه مورد استفاده برای برآورد هزینه‌های سیستم را نشان می‌دهد که در آن ضریب تزریق بر اساس مواد مغذی، اکسیژن، و هزینه‌های عملیات پمپاژ است. ضریب هزینه پمپاژ، هزینه‌های مربوط به تصفیه و پمپاژ آب زیرزمینی آلوده را نیز در نظر می‌گیرد (Shieh and Peralta, 2005).



شکل(۱): نمودار هزینه‌های سرمایه‌گذاری تاسیسات پمپاژ و تزریق

قیود مدل بهینه‌سازی به شرح زیر است:

۱. حدود بالا و پایین نرخ تزریق و پمپاژ هر چاه، که در اینجا محدوده‌ی ۰ الی ۲۰۰ مترمکعب بر روز، در نظر گرفته شده‌اند.

۲. حدود بالا و پایین هد هیدرولیکی آبخوان در چاه‌های تزریق و پمپاژ که بیانگر آن است که سطح آب‌زیرزمینی در عملیات زیست‌پالایی پیشرفته پس از پمپاژ و تزریق، از یک محدوده‌ای کمتر یا بیشتر نشود. این شرط با جستجو در نتایج و فایل‌های خروجی‌های MODFLOW6 کنترل می‌شود.

۳. حد بالای غلظت نهایی آلاینده در مرحله مورد نظر برای دستیابی به استانداردهای پاکسازی:

$$C_{k,Te} \leq C_{CL} \quad , \quad \forall k \in \psi \quad (10)$$

که در آن $C_{k,Te}$ ، غلظت آلاینده در نقطه k در پایان پاکسازی (M/L^3) ، Te زمان پایان پاکسازی، C_{CL} غلظت مجاز و استاندارد آلاینده، ψ مجموعه مکان‌هایی که غلظت استاندارد پاکسازی در آن‌ها اجرا می‌شود؛ در این مطالعه، ψ شامل تمام نقاط منطقه مطالعه در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- مقادیر ضرایب موجود در تابع هدف (Shieh and Peralta, 2005)

مقدار	واحد	ضریب
۰/۰۵	-	i_r (ضریب تنزیل)
۲۷/۵۳	\$(m³/day)	C^p (ضریب هزینه تزریق)
۹۱/۷۲	\$(m³/day)	C^p (ضریب هزینه پمپاژ)

۱۲۰۰۰	دلار (\$))	C^{IP} (هزینه نصب هر چاه)
-------	-------------	-----------------------------

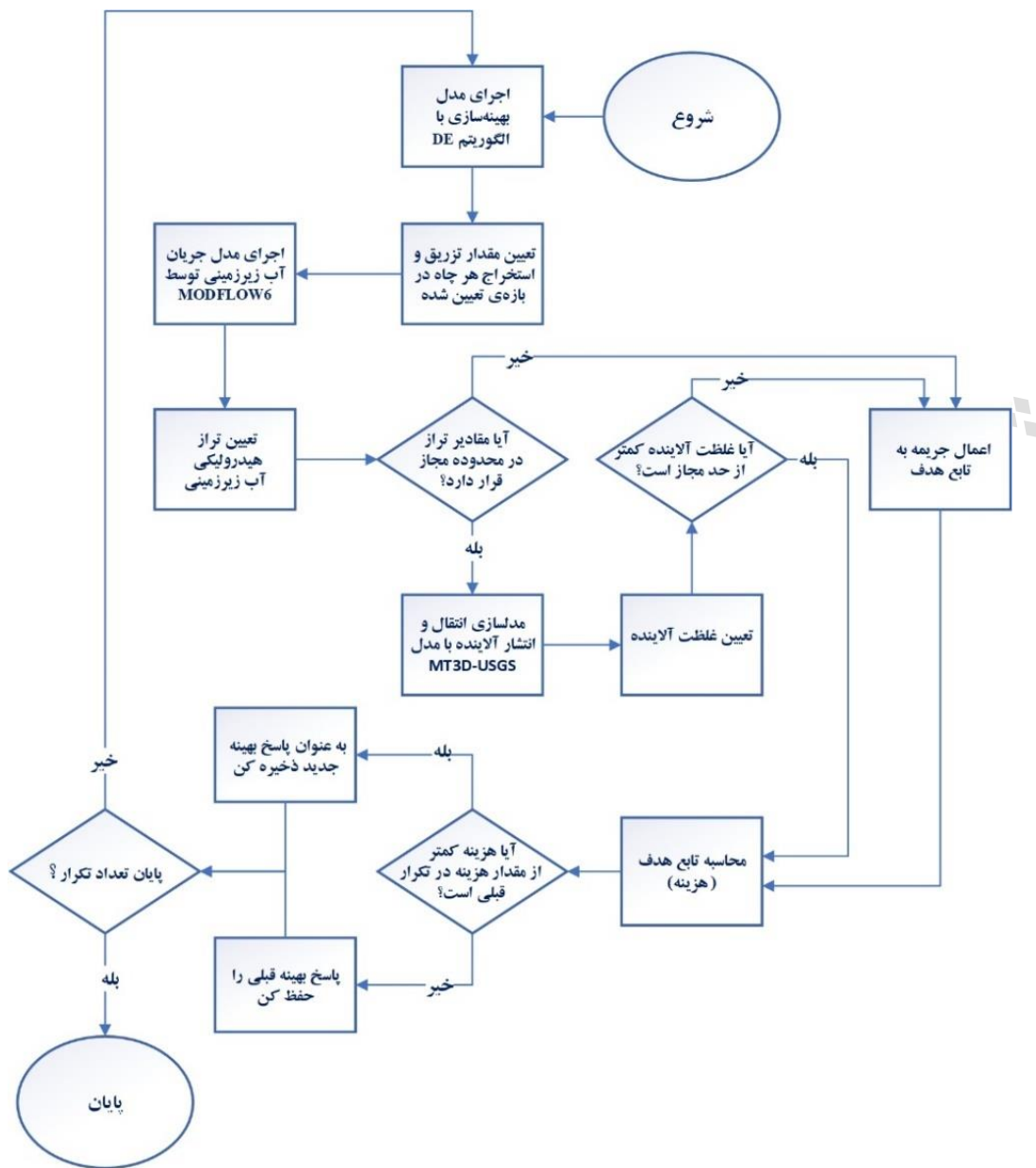
۴. حداکثر غلظت در مکان‌های خاص از منطقه برای اطمینان از محدود شدن آلودگی در عملیات زیست‌پالایی (جلوگیری از جابجایی غیر قابل قبول آلاینده):

$$C_{o,t} \leq C_{ca} , \forall k \in U \quad (11)$$

که در آن، $C_{o,t}$ غلظت آلاینده در نقطه O و در پایان دوره زمانی $(M/L3)$ C_{ca} حداکثر غلظت مجاز تعریف شده برای آلاینده $(M/L3)$. این مقدار برای بنزن در پایان دوره مدل‌سازی در تمام ستون‌هایی که نزدیک‌ترین چاه شرب در آن قرار دارد برابر با 0.0000017 فرض شد تا از تسخیر و عدم انتقال و انتشار آلاینده به نقاط دورتر حتی با غلظت کم، اطمینان حاصل شود و این شرط نیز با جستجو در نتایج نهایی مدل MT3D-USGS کنترل می‌شود. U نیز مجموعه نقاط نظارتی است که کنترل روی آن‌ها انجام می‌شود.

مدل بهینه‌سازی با الگوریتم تکامل تفاضلی یا DE حل شده است. الگوریتم تکامل تفاضلی و یا به اختصار DE از خانواده الگوریتم‌های تکاملی است و در سال ۱۹۹۵ توسط استورن و پرایس معرفی گردید و به طور گسترده در حل مسائل مختلف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. DE یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی هوشمند و مبتنی بر جمعیت است که نحوه عملکرد آن، حفظ جمعیتی از پاسخ‌های کاندید و بهبود مکرر آنها از طریق کاوش و بهره‌برداری از فضای جستجو می‌باشد (Storm and Price, 1997).

مراحل حل مدل شامل اجرای مکرر مدل‌های شبیه‌سازی جریان و انتقال آلاینده در الگوریتم DE می‌باشد. بدین منظور یک کد در محیط نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. شایان ذکر است در پژوهش از کدهای اصلی دو نرم‌افزار شبیه‌سازی (MT3D-USGS, MODFLOW6) در یک ساختار کلی شبیه‌سازی/بهینه‌سازی مطابق شکل ۲ استفاده شده است.

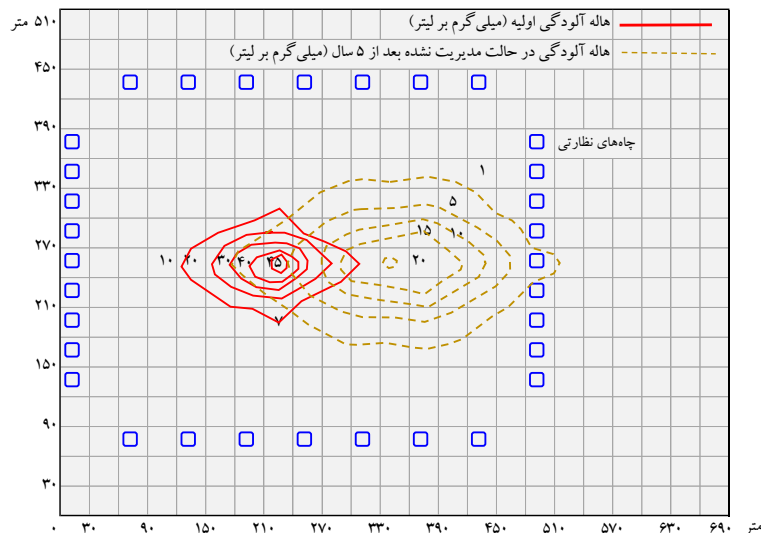


شکل ۲- ساختار کلی مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی فرایند زیست‌پالایی در این مطالعه

۲-۴- مدل‌سازی مسئله آزمایشی

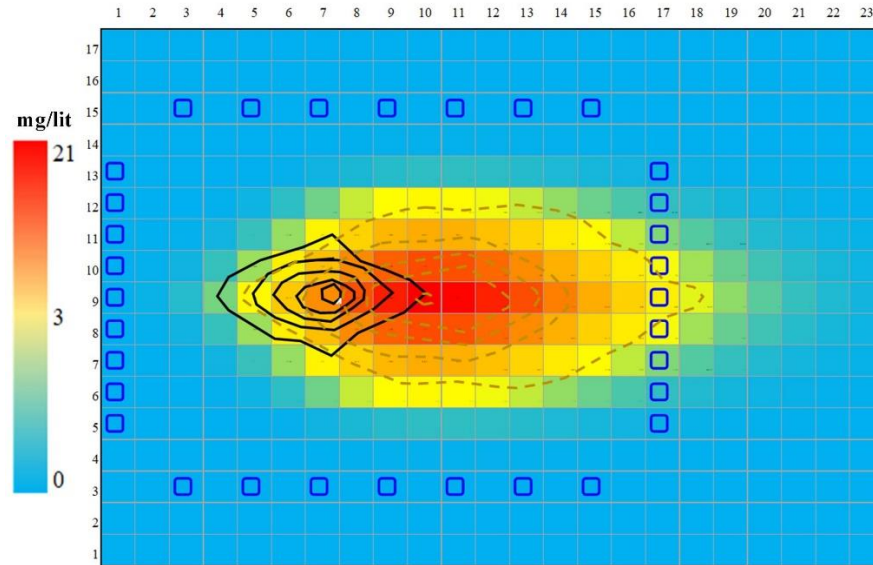
با توجه به اینکه مسئله فرضی (Shieh and peralta (2005) به عنوان یک مسئله آزمون توسط بسیاری از مطالعات پس از ایشان مورد استفاده قرار گرفته است، در این پژوهش نیز ابتدا برای کنترل درستی مدل توسعه یافته و ارزیابی عملکرد آن از این مسئله استفاده شده است. آن‌ها شبیه‌سازی جریان آبخوان و انتقال و انتشار هاله آلودگی موجود در محدوده مطالعه را ابتدا برای مدت پنج سال، در حالت زیست‌پالایی طبیعی و سپس به مدت سه سال برای حالت زیست‌پالایی پیشرفته، با استفاده از مدل BIOPLUMEII انجام

داده و در ادامه زیست‌پالایی پیشرفته را توسط الگوریتم ترکیبی GA-SA (الگوریتم ژنتیک-شبیه‌سازی تبرید) بهینه‌سازی کردند. مدل‌سازی زیست‌پالایی طبیعی مطابق شکل (۳) تغییر و تحول هاله آلودگی را پس از ۲۰ سال نشان می‌دهد.



شکل (۳): غلظت اولیه هاله آلودگی و تغییرات آن در مدت ۵ سال در شرایط زیست‌پالایی طبیعی (Shieh and Peralta, 2005)

تفاوت مطالعه حاضر در این است، که مدل‌سازی جریان آب‌برزمینی توسط MODFLOW6 و مدل‌سازی انتقال آلاینده و فرایند زیست‌پالایی توسط MT3D-USGS و نهایتاً بهینه‌سازی توسط الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) انجام گرفته است. همانطور که در شکل (۴) مشخص است نتایج شبیه‌سازی برای حالت مدیریت نشده مشابه شکل (۳) است. غلظت حداکثر از ۴۰ میلی‌گرم بر لیتر پس از ۵ سال به مقدار ۲۰,۳ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است که با خروجی‌های مقاله Shieh and Peralta (2005) که در آن به ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است هماهنگی دارد. همچنین، حداکثر غلظت آلاینده در مدل‌سازی MT3D-USGS حدود ۱۲۰ متر پیشروی داشته است، اما در مدل Shieh and Peralta (2005) این پیشروی حدود ۱۴۰ متر می‌باشد. دلیل اختلاف نتایج این است که از مدل‌های شبیه‌سازی متفاوتی در دو مطالعه استفاده شده است.



شکل ۴- تغییرات مکانی هاله آلودگی و منحنی‌های هم‌غلظت اولیه و نهایی پس از پنج سال در شرایط زیست‌بایایی طبیعی غلظت

۳- مطالعه موردی

پالایشگاه شیراز یا شرکت پالایش نفت شیراز، در ۲۲ کیلومتری شهر شیراز و در محدوده شهرستان زرکان واقع شده است. شکل (۵) موقعیت پالایشگاه شیراز را نمایش می‌دهد. آبخوان موجود در پالایشگاه، بخشی از آبخوان دشت زرکان می‌باشد که به صورت باریکه‌ای در جنوب شرق این دشت واقع شده است و از نوع آزاد می‌باشد. رسوبات کواترنری محدوده پالایشگاه، با ضخامت متوسط ۴۰ متر عمدتاً از کنگلومرای سست و ماسه‌سنگ با لایه‌های مارن تشکیل شده است. عمق متوسط سطح ایستایی، ۵ تا ۷ متر بوده و متوسط گرادیان هیدرولیکی آبخوان منطقه ۰/۰۱۷ می‌باشد. تعداد ۵ چاه آب شرب در منطقه قرار دارد و نزدیک‌ترین چاه بهره‌برداری ۱۲۰ متر از محل نشت فرضی آلودگی فاصله دارد (Vaezihir et al., 2012). غلظت ورودی آلاینده بنزن $1/7 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، تولوئن $0/53 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، اتیل بنزن $0/152 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ و زایلن $0/152 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه عمق سطح ایستایی در منطقه مورد مطالعه به طور متوسط بین ۵ تا ۷ متر است، تأثیر ناحیه غیراشباع بر توزیع مکانی آلاینده‌ها ناچیز است. نتایج مطالعه aliabad and alimohammadi (2024) نیز این مسئله را تایید می‌کند (Aliabad and Alimohammadi, 2025). بنابراین، در این تحقیق به دلیل اثر محدود ناحیه غیراشباع، مدل‌سازی این ناحیه در نظر گرفته نشده است. از سوی دیگر، تأثیر ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند عمق بستر و جنس خاک به صورت غیرمستقیم از طریق ضرایب انتقال و واکنش در مدل لحاظ شده است.



شکل ۵- عکس ماهواره‌ای پالایشگاه شیراز در محدوده شهرستان زرگان (Google Earth, 2024)

۴- گزینه‌های بهینه‌سازی زیست‌پالایی

محدوده مدل‌سازی مطابق شکل (۶)، بخش تازه تاسیس پالایشگاه نفت شیراز می‌باشد، که با توجه به وجود سابقه نشت مواد نفتی از مخازن در سایت قدیمی، یک آلودگی محتمل فرضی در سایت جدید در نظر گرفته شده است. با ایجاد تغییر در تعداد چاه‌ها و مدت زمان انجام زیست‌پالایی پیشرفته، گزینه‌ها تعیین و کارایی هر کدام مشخص شده است. مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال-انتشار آلاینده در یک شبکه ۳۶ در ۶۴ سلولی انجام شده است. در هر چهار گزینه، یک سال (دو دوره زمانی) برای ورود آلودگی به آبخوان در نظر گرفته شده و در تمامی دوره‌ها، زیست‌پالایی طبیعی لحاظ شده است. حد بالای پمپاژ ۲۰۰ مترمکعب بر روز و حد پایین آن صفر می‌باشد. در ادامه گزینه‌ها تشریح شده‌اند.

گزینه اول: در این گزینه پس از آن ورود آلاینده در سال اول، اقدامی برای پاکسازی آبخوان انجام نشده و تا ده سال (بیست دوره)، تنها تجزیه زیستی یا زیست‌پالایی طبیعی در آبخوان انجام می‌شود.

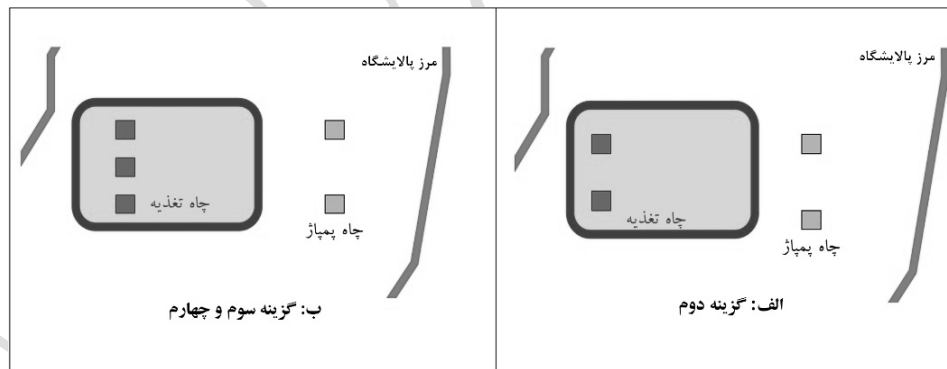
گزینه دوم: در این گزینه پس از ورود آلاینده در سال اول مطابق شکل (۷ الف) دو چاه تزریق در بالادست و داخل هاله آلودگی و دو چاه پمپاژ در پایین‌دست جریان و در محدوده پالایشگاه احداث شده و به مدت چهار سال (هشت دوره) عملیات زیست‌پالایی ادامه یافته و پس از آن به مدت پنج سال، فقط زیست‌پالایی طبیعی انجام می‌شود.

گزینه سوم: در این گزینه پس از ورود آلاینده در سال اول، مطابق شکل (۷ ب) سه چاه تزریق در بالادست و داخل هاله آلودگی و دو چاه پمپاژ در پایین‌دست جریان و در محدوده پالایشگاه احداث شده و به مدت سه سال عملیات پاکسازی ادامه یافته و پس از آن به مدت شش سال، فقط زیست‌پالایی طبیعی انجام می‌شود.

گزینه چهارم: در این گزینه پس از یکسال ورود آلاینده، مطابق شکل (۷) سه چاه تزریق در بالادست و داخل هاله آلودگی و دو چاه پمپاژ در پایین دست جریان و در محدوده پالایشگاه احداث شده و به مدت چهار سال عملیات پاکسازی ادامه خواهد داشت و پس از آن به مدت پنج سال، فقط زیست پالایی طبیعی انجام می شود.



شکل ۶- نمایش منطقه مدل سازی شده، فاز جدید پالایشگاه نفت شیراز و جانمایی هاله آلاینده و چاه های آب شرب



شکل ۷- جانمایی چاه های تزریق و پمپاژ در گزینه های دوم، سوم و چهارم

۴-۱- گزینه اول - تجزیه زیستی (زیست پالایی طبیعی)

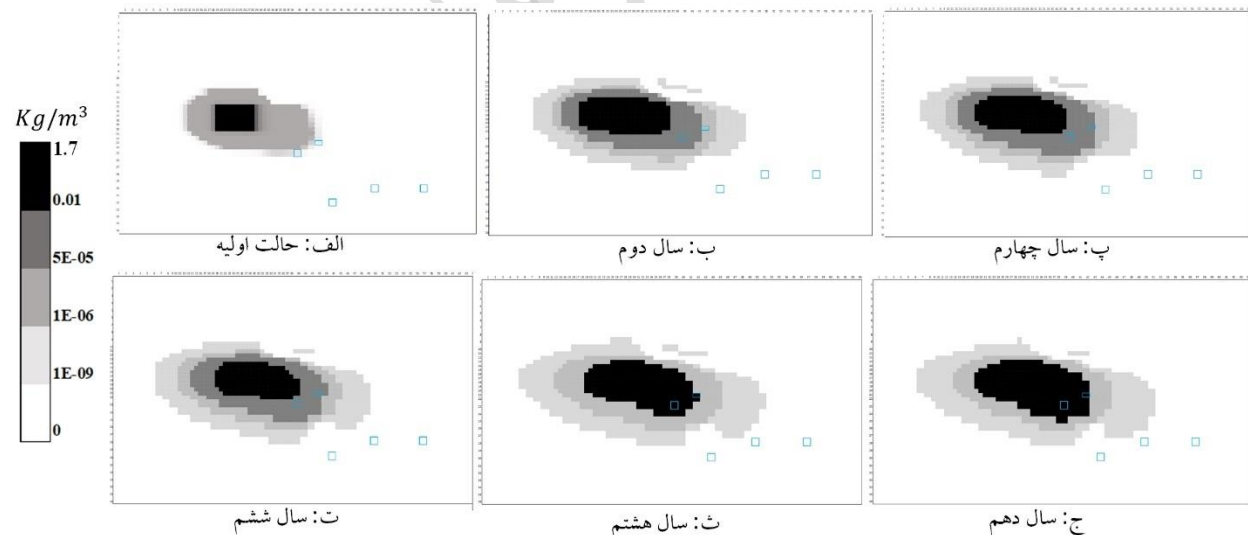
این گزینه توانایی بالقوه و طبیعی آبخوان و طبیعت در تجزیه و پاکسازی آلاینده ها را نشان می دهد. به طور طبیعی برخی ترکیبات مثل اکسیژن، نیترات، سولفات، و آهن در خاک یا آب زیرزمینی وجود دارند و با ترکیبات آلاینده تبادل الکترون و واکنش شیمیایی انجام می دهند و با گرفتن الکترون از مواد آلاینده باعث تجزیه زیستی می شوند. در این گزینه با توجه به اینکه سه گیرنده الکترون

شامل اکسیژن، سولفات و نیترات به طور طبیعی در سایت آلوده وجود دارد، با فرض اینکه هیچ اقدام مدیریتی و مهندسی شده‌ای در آبخوان انجام نگردد، شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلاینده انجام شد.

مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی توسط کد MODFLOW6 انجام و برای این محدوده مطالعه در دو سمت شرق و غرب هد ثابت تعریف شد و مشخص شد جریان آب زیرزمینی به دلیل وجود چاه‌های بهره‌برداری به سمت جنوب شرق گرایش بیشتری دارد.

مدل‌سازی انتقال و انتشار آلاینده توسط کد MT3D-USGS انجام شده و نتایج تغییر و تحول آلاینده بنزن طی ده سال فرایند مدل‌سازی مطابق شکل (۸) حاصل شد. با توجه به اینکه بنزن بیشترین مقدار غلظت (۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب) و بیشترین خطر را برای سلامت مصرف‌کنندگان دارد و مقدار مجاز آن نیز از سایر آلاینده‌های تشکیل دهنده BTEX کمتر است (۰/۰۰۰۰۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب)، نتایج و خروجی مدل‌سازی انتقال این آلاینده به عنوان آلاینده بحرانی بررسی و نمایش داده شده است.

شبیه‌سازی مشخص کرد که زیست‌پالایی طبیعی توانایی به پاکسازی این حجم از آلاینده را ندارد. همانطور که در شکل (۸) مشخص است، غلظت آلاینده در انتهای سال اول به مرز چاه‌های آشامیدنی رسیده و در انتهای سال دوم، یکی از چاه‌ها را کاملاً در برگرفته و تا انتهای مدل‌سازی (سال دهم) این دو چاه کاملاً در ناحیه آلود قرار دارند و پلوم آلودگی همچنان نیز در حال پیشروی است و در سال‌های بعد این آلودگی چاه‌های دیگر را نیز در برمی‌گیرد. در انتهای مدل‌سازی، آلودگی در جهت طولی جریان یعنی به سمت شرق (به سمت چاه‌های شرب) ۲۷۵ متر پیشروی کرده و در جهت عرضی نیز به سمت جنوب ۱۱۲ متر پیشروی داشته است. حداکثر غلظت آلاینده از مقدار اولیه ۱/۷ به ۰/۰۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب رسیده است که بسیار فراتر از غلظت مجاز بنزن می‌باشد.

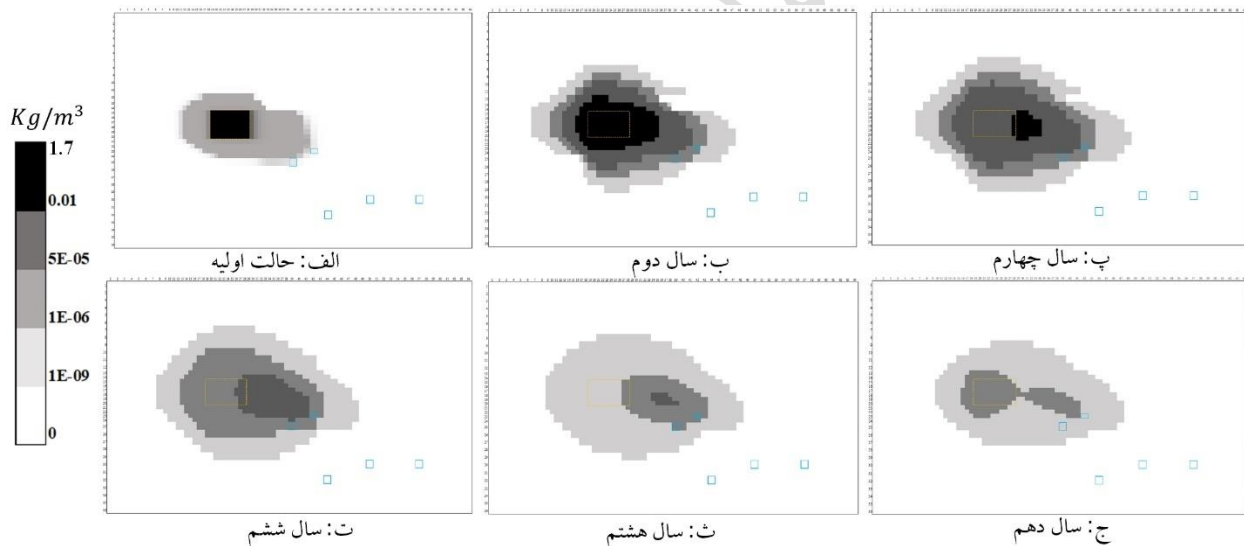


شکل ۸- تغییر، انتقال و پخش غلظت آلاینده بنزن در سیستم زیست‌پالایی طبیعی در مدت ده سال مدل‌سازی با MT3D-USGS

۴-۲- گزینه دوم - دو چاه تزریق در بالادست، دو چاه پمپاژ در پایین دست جریان و زیست پالایی به مدت چهار سال

با توجه به این که در این گزینه تعداد چاه های زیست پالایی کم تر از سایر گزینه های زیست پالایی پیشرفته می باشد لذا هزینه سرمایه گذاری اولیه در این روش کم می باشد. در مقابل مدت زمان زیست پالایی در این گزینه ۴ سال در نظر گرفته شده است.

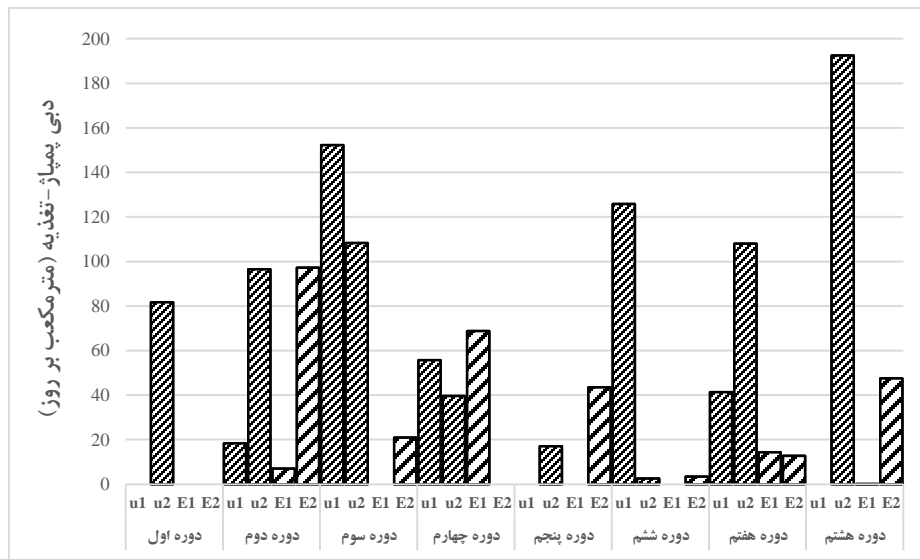
پس از اجرای مدل بهینه سازی، نتایج نهایی انتقال و انتشار آلاینده، مطابق شکل (۹) حاصل شد. چاه های شرب و مکان اولیه هاله آلودگی در شکل مشخص شده است. همان طور که در شکل (۹ب) دیده می شود، آلودگی در انتهای سال دوم همچنان در حال گسترش می باشد ولی طی چهار سال یعنی از سال دوم تا انتهای سال پنجم، مطابق شکل (۹ت)، زیست پالایی پیشرفته تاثیر چشمگیری بر کاهش غلظت آلاینده گذاشته و چاه های شرب در ناحیه ایمن قرار گرفته اند. از سال ششم تا انتهای سال دهم، زیست پالایی طبیعی به تنهایی غلظت باقی مانده بنزن را کاهش داده و آن را در کل آبخوان به کمتر از حد مجاز رسانده است.



شکل ۹- انتقال و پخش غلظت آلاینده بنزن در سیستم زیست پالایی پیشرفته طراحی شده در گزینه دوم در طی ده سال

شکل (۱۰) مقادیر بهینه پمپاژ و تزریق متغیر در طول ۸ دوره زیست پالایی را به طور مجزا برای هر دوره زمانی نمایش می دهد. u_1 و u_2 چاه های تزریق و E_1 و E_2 چاه های پمپاژ هستند. این الگوی پمپاژ همان طور که قبلا هم گفته شد با الگوریتم تکامل تفاضلی محاسبه شد و اجرای هر مدل بهینه سازی زیست پالایی پیشرفته در متلب حدودا ۷۲ ساعت به طول انجامید.

هزینه نهایی طراحی سیستم زیست‌پالایی در گزینه دوم مطابق جدول (۴) است. هزینه اولیه برای اجرای این طرح ۱۰۶۰۰۰ دلار برآورد شد. همچنین هزینه های پمپاژ و تزریق در طول دوره پاکسازی ۵۱۶۳۴ دلار برآورد شد. هزینه کل پاکسازی آبخوان در گزینه دوم، ۱۵۷۶۳۴ دلار محاسبه گردید.

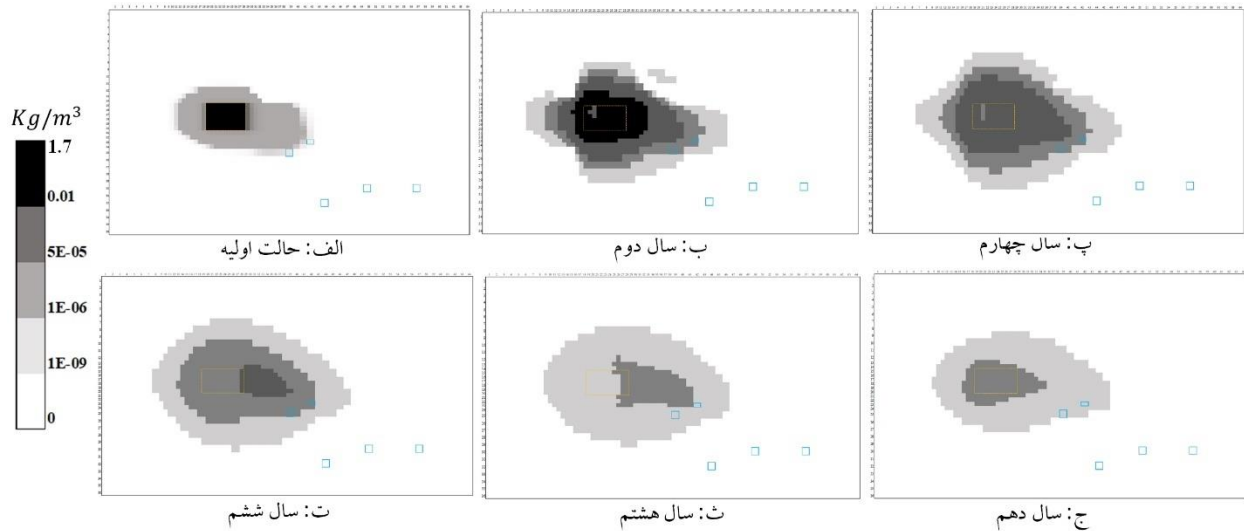


شکل ۱۰- الگوی بهینه پمپاژ و تغذیه در هشت دوره (چهارسال) زیست‌پالایی پیشرفته در گزینه دوم

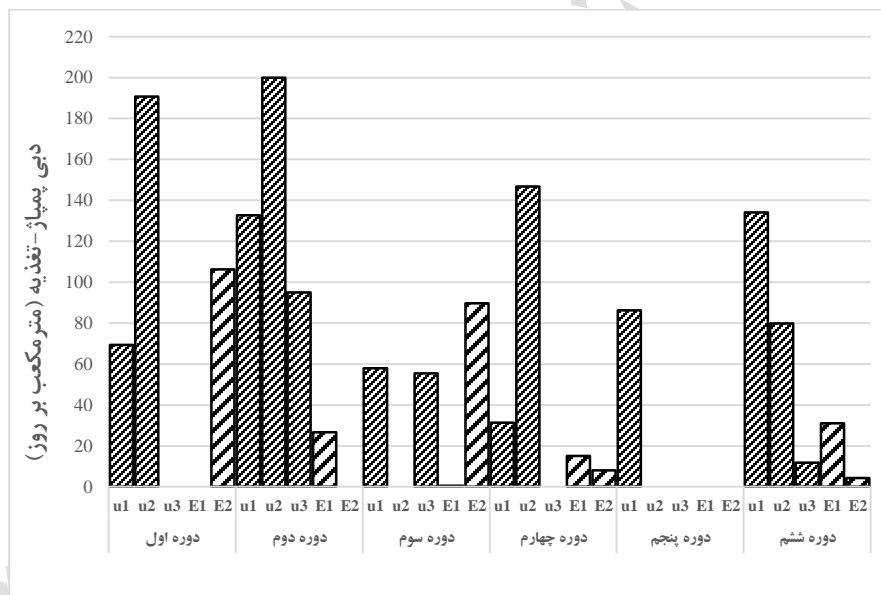
۳-۴- گزینه سوم - سه چاه تزریق در بالادست، دو چاه پمپاژ در پایین دست جریان و زیست‌پالایی به مدت سه سال نتایج مدل‌سازی انتقال و انتشار آلاینده بنزن در این گزینه مطابق شکل (۱۱) حاصل شد. مشابه گزینه قبل تا انتهای سال دوم غلظت در حال گسترش می‌باشد ولی با اجرای سیستم زیست‌پالایی مهندسی شده به مدت سه سال، آلودگی کنترل می‌شود و در انتهای سال هشتم همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است، غلظت آلودگی در تمامی نقاط آبخوان به کمتر از حد مجاز رسیده است.

شکل (۱۲) مقادیر بهینه پمپاژ متغیر در طول ۶ دوره زیست‌پالایی پیشرفته را برای هر دوره زمانی نمایش می‌دهد که u1 و u2 و u3 چاه‌های تزریق و E1 و E2 دو چاه پمپاژ طراحی شده در این گزینه و حد بالای پمپاژ ۲۰۰ مترمکعب بر روز و حد پایین آن صفر می‌باشد.

هزینه نهایی طراحی سیستم زیست‌پالایی در گزینه سوم طبق جدول (۴) شامل، هزینه اولیه برای اجرای طرح ۱۲۲۰۰۰ دلار، هزینه‌های پمپاژ و تزریق در طول دوره پاکسازی ۵۷۲۵۸ دلار و در نهایت هزینه کل پاکسازی آبخوان در گزینه سوم، ۱۷۹۲۴۰ دلار، محاسبه گردید.



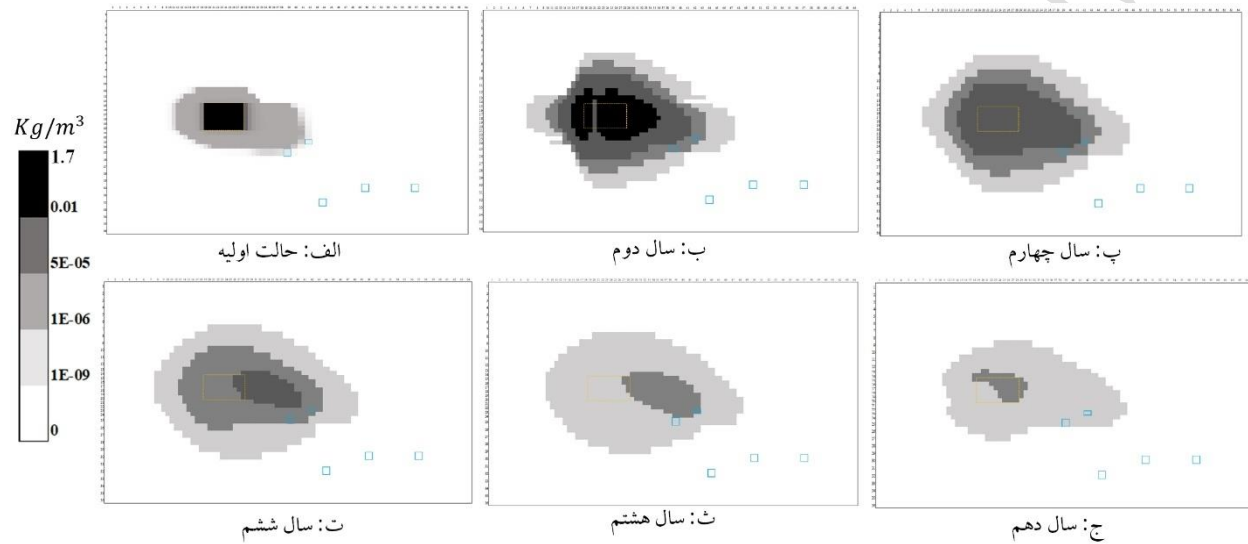
شکل ۱۱- انتقال و پخش غلظت آلاینده بنزن در سیستم زیست پالایی پیشرفته طراحی شده در گزینه سوم در ده سال



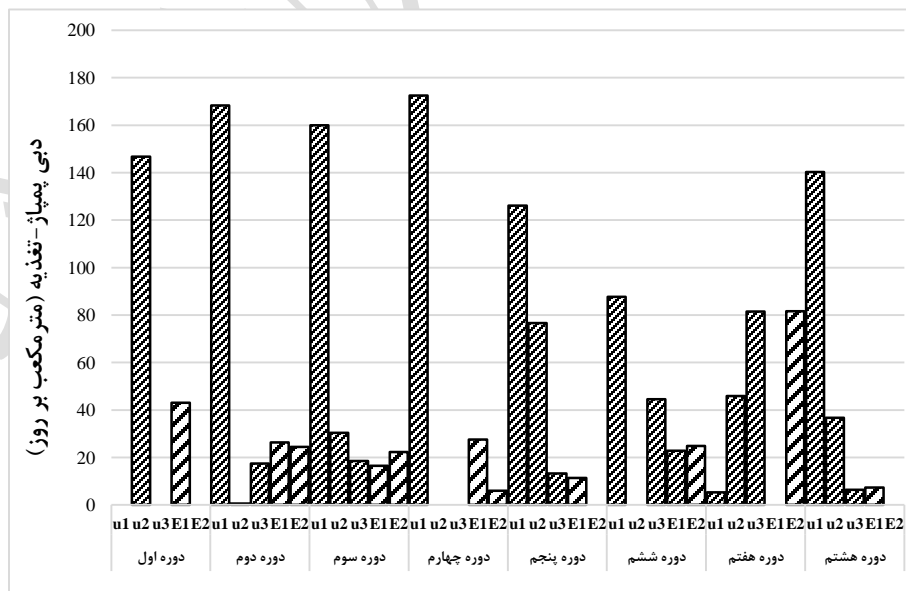
شکل ۱۲- الگوی بهینه پمپاژ متغیر در شش دوره (سه سال) زیست پالایی پیشرفته در گزینه سوم

۴-۴- گزینه چهارم - سه چاه تزریق در بالادست، دو چاه پمپاژ در پایین دست جریان و زیست پالایی به مدت چهار سال نتایج مدل سازی این گزینه برای آلاینده بنزن در شکل (۱۳) آمده است. تا انتهای سال دوم غلظت در حال گسترش می باشد و با اجرای سیستم زیست پالایی پیشرفته به مدت چهار سال، غلظت آلاینده موجود در آبخوان کنترل شده و کاهش می یابد. غلظت موجود در سایت در انتهای سال دهم نسبت به گزینه قبل کمتر است که این موضوع به دلیل اختلاف تزریق و پمپاژ و همچنین اختلاف در مدت زمان اجرای سیستم زیست پالایی می باشد. همان طور که در

شکل (۱۳) مشخص است، در انتهای سال هشتم، غلظت آلودگی در تمامی نقاط آبخوان به کمتر از حد مجاز (0.000005 کیلوگرم بر متر مکعب) رسیده است و حداکثر غلظت در انتهای مدلسازی در این گزینه کمتر از سایر گزینه ها (0.0000038 کیلوگرم بر متر مکعب) محاسبه شد که این موضوع هم اثر بخشی سریع سیستم زیست پالایی پیشرفته در این گزینه را نشان می دهد. شکل (۱۴) مقادیر بهینه پمپاژ متغیر در طول هشت دوره زیست پالایی پیشرفته را برای هر دوره زمانی نمایش می دهد.



شکل ۱۳- انتقال و پخش غلظت آلاینده بنزن در سیستم زیست پالایی پیشرفته طراحی شده در گزینه چهارم در مدت ده سال



شکل ۱۴- الگوی بهینه پمپاژ متغیر در هشت دوره (۴ سال) زیست پالایی پیشرفته در گزینه چهارم

هزینه نهایی سیستم در گزینه چهارم نیز مطابق جدول (۴) شامل هزینه اولیه اجرای طرح ۱۱۴۰۰۰، و هزینه‌های پمپاژ و تزریق در طول دوره پاکسازی ۶۰۰۶۶ دلار و هزینه کل پاکسازی آبخوان در گزینه چهارم، ۱۷۴۰۶۶ دلار محاسبه گردید.

جدول ۴- مدت و هزینه (به دلار) سیستم‌های زیست‌پالایی پیشرفته در گزینه‌های مختلف

سیستم طراحی	گزینه ۲	گزینه ۳	گزینه ۴
مدت اجرای طرح	سال ۴	سال ۳	سال ۴
هزینه کل تزریق	۲۵۵۴۶	۳۳۰۱۹	۳۴۱۱۸
هزینه کل پمپاژ	۲۶۰۸۸	۲۴۲۳۸	۲۵۹۴۸
هزینه احداث چاه‌ها	۴۸۰۰۰	۶۰۰۰۰	۶۰۰۰۰
هزینه اجرا و تجهیزات	۵۸۰۰۰	۶۲۰۰۰	۵۴۰۰۰
هزینه کل سیستم طراحی	۱۵۷۶۳۴	۱۷۹۲۴۰	۱۷۴۰۶۶

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه بهینه‌سازی زیست‌پالایی در چهار گزینه، مدل‌سازی و بررسی شد. در گزینه اول زیست‌پالایی طبیعی (تجزیه زیستی) برای یک دوره ده ساله انجام شد و هیچ چاه تزریق و پمپاژی در مدل تعریف نشد؛ لذا هزینه‌ای هم در این گزینه وجود نخواهد داشت. پس از مدل‌سازی آلاینده بنزن به چاه‌های شرب واقع در فاصله ۱۲۰ متری رسیده و آن‌ها را در بر گرفته و همچنان نیز در حال پیشروی بود.

در گزینه دوم پس از تعبیه ۲ چاه تزریق و ۲ چاه پمپاژ و انجام زیست‌پالایی به مدت چهار سال، آلودگی در تمامی نقاط سایت به حد مجاز رسید و هزینه کل معادل ۱۵۷۶۳۴ دلار حاصل شد. در گزینه سوم پس از تعبیه ۳ چاه تزریق و ۲ چاه پمپاژ و مدت سه سال زیست‌پالایی، آلودگی در تمامی نقاط سایت به حد مجاز رسید و هزینه کل ۱۷۹۲۴۰ دلار شد. در گزینه چهارم پس از تعبیه ۳ چاه تزریق و ۲ چاه پمپاژ و مدت چهار سال زیست‌پالایی، آلودگی در تمامی نقاط سایت به حد مجاز رسید و هزینه کل ۱۷۴۰۶۶ دلار محاسبه شد. با توجه به محاسبات فوق، اقتصادی‌ترین حالت، گزینه دوم می‌باشد که ۱۲/۱ درصد ارزان‌تر از گزینه سوم و ۹/۵ درصد ارزان‌تر از گزینه چهارم است.

با توجه به اینکه یکی از قیود بهینه‌سازی این است که در انتهای سال دهم، غلظت آلاینده‌ها کمتر از حد مجاز باشد، در هر سه گزینه طراحی زیست‌پالایی پیشرفته، آبخوان به پاکسازی کامل رسیده و غلظت تمامی آلاینده‌ها، در انتهای مدل‌سازی به کمتر از غلظت مجاز رسیده و همچنین آلاینده چند تکه نشده است ولی با توجه به نتایج مدل MT3D-USGS می‌توان دریافت روند پاکسازی و رسیدن به غلظت استاندارد در گزینه چهارم کمی سریع‌تر بوده است. در نهایت با توجه به بودجه و ضرورت تسریع در انجام پروژه می‌توان بهترین سیستم را برای پاکسازی آبخوان آلوده نفتی برگزید.

نتایج حاصل از این پژوهش که در جدول (۴) نیز به طور کلی نمایش داده شده است، در درجه اول لزوم بهینه‌سازی سیستم پاکسازی آبخوان و طراحی یک الگوی پمپاژ بهینه را نشان می‌دهد. همچنین با مرور نتایج، گزینه دوم طراحی که بر تعداد چاه‌های زیست‌پالایی کمتر تاکید دارد (۴ چاه) اما مدت‌زمان اجرای طولانی‌تری دارد (۴سال) اقتصادی‌ترین حالت می‌باشد، چون اولاً به هزینه اولیه کمتری احتیاج داشته و ثانیاً به علت طولانی‌تر بودن مدت زمان فرایند، در هر دوره مقادیر کمتری پمپاژ و تزریق انجام می‌شود و بنابراین به لوله‌هایی با قطر کوچکتر، و پمپ‌هایی با توان کمتر نسبت به طرح‌های ۴ ساله احتیاج دارد.

در نهایت لازم است که به چالش‌ها، فرصت‌ها و چشم‌اندازهای آینده در زمینه بهینه‌سازی گزینه‌های زیست‌پالایی در آبخوان‌های آلوده نفتی اشاره شود. یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، محدودیت داده‌های مورد نیاز و در نتیجه عدم قطعیت بالا در تشریح سیستم آبخوان، و تعیین هندسه و ابعاد هاله آلودگی است که ممکن است اثربخشی فرآیندهای زیست‌پالایی را محدود کند. در این خصوص تعریف یک سیستم پایش کمی-کیفی، قبل و هم‌زمان با اجرای فرایند زیست‌پالایی، ضروری است. از سوی دیگر، فرصت‌های قابل توجهی نیز در این مسیر وجود دارد؛ به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته‌تر و توابع دو هدفه یا چند هدفه (مانند حداقل‌سازی هزینه، حداقل‌سازی زمان، و حداکثرسازی اعتمادپذیری سیستم) می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان این امکان را بدهد که در انتخاب بهترین راهکار، هم‌زمان به هزینه‌ها و بهبود عملکرد فرآیندهای پاکسازی آلاینده‌ها توجه داشته باشند.

مراجع

جنت رستمی، س.، خیاط خلقی، م.، علیخانی، ح.، هورفر، ع.، و محمدی، ک.، (۱۳۹۹) "مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی فرآیند زیست‌پالایی آلودگی‌های نفتی در آب زیرزمینی"، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۶(۱)، ۲۹-۴۱.

واعظی‌هیر، ع.، قبادیان، س.، و گل محمدی، ع.، (۱۳۹۹) "بررسی آلودگی آب زیرزمینی محدوده پالایشگاه شازند به BTEX و MTBE"، *علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۲(۶)، ۴۹-۵۹.

Aliabad, H. M. and Alimohammadi, S., (2025) "Probabilistic health risk assessment of BTEX contamination in groundwater using the set of triplets methodology: a case study near Shiraz Oil Refinery, Iran", *Sustainable Water Resources Management*, 11(3).
<https://doi.org/10.1007/s40899-024-01184-2>.

- Bedekar, V., Morway, E. D., Langevin, C. D. and Tonkin, M. J. (2016), MT3D-USGS version 1: *A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW*, Techniques and Methods, 6-A53, US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm6A53>.
- Hughes, J. D., Langevin C. D. and Edward R. Banta (2017), *Documentation for the MODFLOW6 framework*, 6-A57, US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm6A57>.
- Mayer, A. and Endres, K. L. (2007) “Simultaneous optimization of dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) source and contaminant plume remediation”, *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(3-4), 288–311. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.11.009>.
- National Research Council, Division on Engineering, Physical Sciences, Commission on Engineering, Technical Systems, and Committee on In Situ Bioremediation (1993), *In situ bioremediation: When does it work?*, National Academies Press. <https://www.nationalacademies.org/publications/2131>
- Raei, E., Nikoo, M. R. and Pourshahabi, S. (2017) “A multi-objective simulation-optimization model for in situ bioremediation of groundwater contamination: Application of bargaining theory”, *Journal of Hydrology*, 551, 407–422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.010>.
- Rezaei, H., Bozorg-Haddad, O. and Loáiciga, H. A. (2020) “Reliability-Based Multi-Objective Optimization of Groundwater Remediation”, *Water Resources Management*, 34(10), 3079–3097. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02573-w>.
- Sethi, R. and Di Molfetta, A., (2019). “Remediation of contaminated groundwater. Groundwater engineering: a technical approach to hydrogeology”, *contaminant transport and groundwater remediation*, 331-409. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20516-4_17.
- Shieh, H.-J. and Peralta, R. C. (2005) “Optimal In Situ Bioremediation Design by Hybrid Genetic Algorithm-Simulated Annealing”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(1), 67–78. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2005\)131:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2005)131:1(67)).
- Storn, R., & Price, K. (1997). “Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces”. *Journal of global optimization*, 11(4), 341-359
- Taravatroy, N., Nikoo, M. R., Adamowski, J. F. and Khoramshokoo, N. (2019) “Fuzzy-based conflict resolution management of groundwater in-situ bioremediation under hydrogeological uncertainty”, *Journal of Hydrology*, 571, 376–389. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.063>.
- Todd, D. K., and Mays, L. W. (2004), *Groundwater Hydrology*, John Wiley and Sons.
- U.S. EPA. (2012a), *Chemical-Specific Reference Values for Benzene (CASRN 71-43-2)*, U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2012b), *Inhalation Health Effect Reference Values for Ethylbenzene (CASRN 100-41-4)*, U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2012c), *Inhalation Health Effect Reference Values for Toluene (CASRN 108-88-3)*, U.S. Environmental Protection Agency.

- U.S. EPA. (2012d), *Inhalation Health Effect Reference Values for Xylene – All Isomers (CASRNs Mixed Isomers – 1330-20-7; m-Xylene – 95-47-6; o-Xylene – 108-38-3; p-Xylene – 106-42-3)*, U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2013), *Introduction to In Situ Bioremediation of Groundwater*, U.S. Environmental Protection Agency. <https://semspub.epa.gov/work/11/171054.pdf>
- U.S. EPA. (2014), *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers*, U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ust/how-evaluate-alternative-cleanup-technologies-underground-storage-tank-sites-guide-corrective>.
- U.S. EPA. (2015), National Primary Drinking Water Regulations, U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>.
- Vaezihir, A., Zare, M., Raeisi, E., Molson, J. and Barker, J. (2012) “Field-Scale Modeling of Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX) Released from Multiple Source Zones”, *Bioremediation Journal*, 16(3), 156–176. <https://doi.org/10.1080/10889868.2012.687415>.