شبیه‌سازی روشهای "پمپاژ-تصفیه" و "هوادهی" در احیای محلی آبهای‌زیرزمینی آلوده

حمیدرضا صفوی [۱] کاوه سوخک لاری [۲]
امیر تائبی [۳]

(دریافت ۸٤/۸/۱۲ پذیرش ۸٤/۹/۳۰)

چکیده

با رشد و توسعه فعالیتهای صنعتی، نفوذ انواع آلاینده‌ها به آبهای زیرزمینی روند رو به رشدی یافته است. بر خلاف آبهای‌سطحی، پایداری انواع آلاینده‌ها در آبهای زیرزمینی بسیار بالاست و از اینرو هزینه پاکسازی آبخوان‌های آلوده بسیار زیاد است. با توجه به این مسائل، از روشهای مختلف احیای آبهای زیرزمینی برای احیای آبخوان‌ها از آلاینده‌های گوناگون استفاده می‌شود که از جمله آنها می‌توان به روشهای هوادهی و پمپاژ- تصفیه اشاره نمود. علیرغم وجود توصیه‌ها و پیشنهادها در خصوص امکان به کارگیری همزمان این دو روش برای آلاینده‌های فرّار نظیر بنزن و MTBE، تاکنون مدل جامعی در شبیه‌سازی همزمان این دو روش ارائه نشده است. دراین تحقیق به کمک مدل‌های موجود شبیه‌سازی روش پمپاژ - تصفیه و تلفیق آنها با مدل شبیه‌ساز روش هوادهی، امکان شبیه‌سازی این دو روش در مقیاسهای کاربردی فراهم آمده است. همچنین پس از صحت‌سنجی مدل و در طی یک مطالعه موردی، پاکسازی هاله آلودگی نفتی آبخوان باقر شهر واقع در غرب پالایشگاه تهران از آلاینده MTBE به کمک روشهای هوادهی و پمپاژ - تصفیه بررسی شده است. بر این اساس، برای احیای منطقه‌ای این آبخوان در طی یک دوره ۵ ساله شبیه‌سازی و بدون نصب ادوات احیای آبخوان در منطقه شهری، مقدار آلاینده موجود در زیر سطح شهر تقریباً به نصف کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: *احیای آبهای زیرزمینی، هوادهی، پمپاژ- تصفیه، شبیه سازی، پالایشگاه تهران، MTBE.*

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان
hasafavi@cc.iut.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

Simulation of "Pump and Treat" and Air Sparging for In-Situ Remediation of Contaminated Groundwater

Hamid Reza Safavi[1], Kaveh Sookhaklari[2], Amir Taebi[3]

Abstract

Industrial contamination leakage into groundwater resources is increasing during recent years. Unlike surface water resources, lots of contaminants are stable in groundwater. Hence, several technologies, like Pump-and-Treat (PAT) and Air Sparging (AS), are being used in order to remedy contaminated aquifers. Despite of suggestions about using these two technologies together, there is no integrated simulation model for these two technologies. Using existing models for PAT simulation and combining them with AS simulation model, an integrated model for simulation of these technologies in field scale has been developed in this study. In addition to model validation, remediation of Bagher-Shahr aquifer (west of Tehran refinery) from MTBE by using AS and PAT technologies has been evaluated during a case study. Based on the suggested design for local remediation of MTBE plume in Bagher-Shar aquifer (without facility installation inside the city area) and during a five- year simulation period, mass of contaminant inside the city area is decreased to half of the initial mass.

Keywords: *Groundwater Remediation, Air Sparging, Pump-and-Treat, Simulation, Tehran Refinery, MTBE.*

1- Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology-hasafavi@cc.iut.ac.ir
2- M.Sc. Student (of Environmental Engineering) of Civil Engineering, Isfahan University of Technology
3- Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

۱ – مق

بخش مهمّی از منابع آب قابل استحصال را آبهای زیرزمینی تشکیل می‌دهند. اهمیت این بخش از منابع آبی در اقلیمهای خشک ونیمه خشک، نظیر کشور ایران، بیش از سایر نقاط است. از سوی دیگر، گسترش صنایع و جوامع شهری در اغلب کشورهای جهان سوم بدون وجود زیرساختهای لازم جهت توسعه پایدار صورت می‌گیرد. در این شرایط، نفوذ انواع آلاینده‌ها از مبادی مختلف نظیر پالایشگاهها، خطوط انتقال فاضلاب، پساب صنایع و شیرابه محلهای دفن مواد زائد باعث آلودگی آبهای زیرزمینی می‌گردد. برخلاف آبهای جاری و سطحی، پایداری آلاینده‌ها در آبهای‌زیرزمینی بسیار بالاست و جهت پاکسازی آبخوان‌ها می‌بایست از روشهای احیای آبهای زیرزمینی استفاده نمود. یکی از مهمترین گروه‌های آلاینده آبهای زیرزمینی را مواد آلی فرّار تشکیل می‌دهند.

آبخوان‌های آلوده به این مواد را می‌توان از طریق روشهای "پمپاژ-تصفیه" یا "هوادهی" احیاء نمود. در طی سالهای اخیر امکان استفاده مشترک و همزمان روشهای "پمپاژ-تصفیه" و "هوادهی" برای احیای آبخوان‌های آلوده به مواد آلی فرّار مطرح شده است. استفاده مشترک از این دو روش امکان ارائه طرح مناسب‌تری را در احیاء آبخوان‌های آلوده می‌دهد [۱]. با این وجود، شبیه‌سازی روش هوادهی در مقیاس کاربردی چه به صورت مجزا و چه به صورت ترکیبی با روش "پمپاژ-تصفیه" به علت پیچیدگی پدیده‌های حاکم بر این روش و جدید بودن آن چندان گسترش نیافته است [۲، ۳، ۴ و ۵].

مدل‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی روش هوادهی که تنها قادر به شبیه‌سازی این روش به صورت منفرد هستند دو دسته‌اند. دسته اول که مبتنی بر حل عددی معادلات انتقال جرم و انرژی در محیط چند فازی متخلخل می‌باشند، عمدتاً در مقیاسهای کوچک و آزمایشگاهی مناسب بوده و پیچیدگی زیادی از جهات کاربردی و حجم محاسبات دارند. از مهمترین مدل‌های این گروه می‌توان به مدل T2VOC اشاره کرد. دسته دوم، مدل‌های توده‌ای[1] (متمرکز) هستند که بیشتر مبنای تجربی دارند. دراین مدل‌ها، چندین ضریب و متغیر دخیل در فرآیند شبیه‌سازی به صورت یک پارامتر توده‌ای در مدل اعمال می‌شود. این مدل‌ها علاوه بر سادگی کاربرد، جهت مطالعات میدانی نیز مناسب‌تر می‌باشند. از مشهورترین این مدل‌ها، مدل‌های مبتنی بر رابطه هانری[2] در محیط متخلخل هستند که منجر به ارائه پاسخ‌های با دقت قابل قبول در مقیاس میدانی می‌گردند [۶ و ۲].

از سوی دیگر، مدل‌های قدرتمندی در شبیه‌سازی روش پمپاژ- تصفیه علی الخصوص در مورد آلاینده‌های محلول ارائه شده‌اند. به علت سابقه بیشتر روش پمپاژ- تصفیه و وجود اطلاعات دقیق‌تر در مورد فرآیندهای حاکم بر پخش آلاینده محلول در آبخوان، مدل‌های شبیه‌سازی روش پمپاژ-تصفیه به شکل جامع با در نظر گرفتن انواع شرایط مرزی حاکم بر آبخوان در دسترس می‌باشند. از جمله مدل‌های شبیه‌سازی روش پمپاژ-تصفیه که اکثراً مبتنی بر روش حل عددی تفاضلات محدود می‌باشند می‌توان به مدل MODFLOW/MT3DMS اشاره کرد [۷، ۸ و ۹].

در این تحقیق، جهت ارائه یک مدل شبیه‌سازی روشهای پمپاژ-تصفیه و هوادهی در احیای آبخوان‌های آلوده به مواد آلی فرّار و جهت بهره‌گیری از قابلیتهای مدل‌های موجود، تلفیقی بین مدل‌های MODFLOW2000، MT3DMS4b و یک مدل تجربی شبیه‌سازی روش هوادهی ایجاد شده است. این مدل تلفیقی علاوه بر قابلیتهای مدل‌های موجود به کار رفته در آن، امکان شبیه‌سازی همزمان روش هوادهی را نیز به کاربر می‌دهد.

۲- روش انجام کار

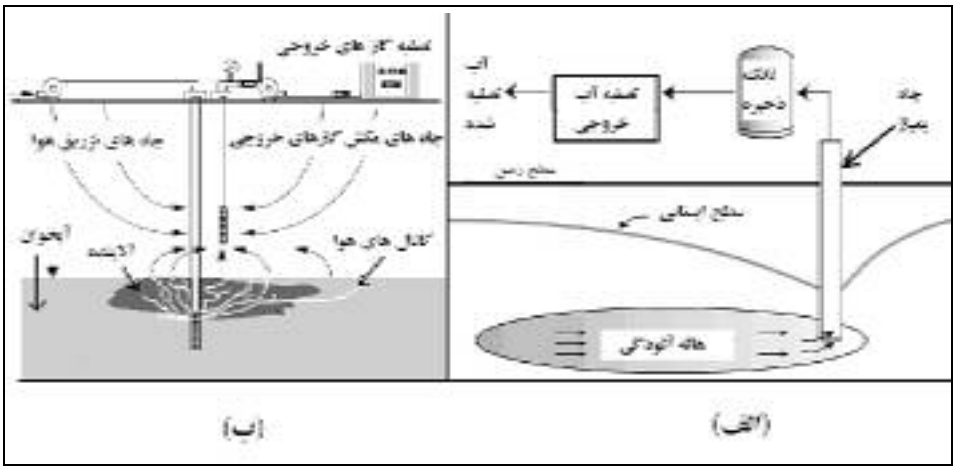
۲-۱- معادلات حاکم و فرضیات مدل تلفیقی

روش "پمپاژ- تصفیه" مبتنی بر حفر چاههایی در آبخوان‌های آلوده و پمپاژ آب آلوده به سطح زمین و تصفیه آن می‌باشد. آبخوان‌های آلوده به طیف وسیعی از آلاینده‌ها، از مواد آلی فرّار تا فلزات سنگین، از طریق این روش احیاء، قابل پاکسازی می‌باشند. از سوی دیگر، روش "هوادهی" بر مبنای تزریق هوای تحت فشار به درون آبخوان‌های آلوده به مواد آلی فرّار است. هوای تزریق‌شده باعث جدا شدن مواد آلی فرّار از آب شده و پس از رسیدن به ناحیه تهویه خاک توسط سیستم‌های مکش، جمع‌آوری و تصفیه می‌گردد . در شکل ۱ نحوه کاربرد دو روش احیاء نشان داده شده است.

فرضیاتی در امر شبیه‌سازی در مدل تلفیقی لحاظ شده‌اند که مهمترین آنها به شرح زیر می‌باشند:

- فرض شرایط هم دما در کل دامنه شبیه‌سازی
- شرایط نزدیک به همگن در بافت خاک و نفوذپذیری مناسب خاک جهت اعمال روشهای احیاء هوادهی و پمپاژ - تصفیه
- غیر محصور بودن آبخوان
- ناچیز بودن گسترش جانبی جریان هوا در طی فرآیند هوادهی در مقایسه با ابعاد سلولهای محاسباتی
- وجود شرایط اختلاط کامل بین هوا، آب و مواد آلی فرّار
- مقدم بودن مکانیزم جداسازی گاز از مایع نسبت به تجزیه

[1] Lumped Models
[2] Henry



شکل ۱- نحوه کاربرد روشهای احیاء (الف: روش پمپاژ - تصفیه، ب: روش هوادهی)

بیولوژیکی در روش هوادهی

- عدم تأثیر تزریق هوا در آبخوان بر نحوه کلّی حرکت آب
- وجود سیستم مکش گازهای خروجی در ناحیه تهویه خاک
- کم بودن میزان کربن آلی خاک به گونه‌ای که بتوان از بازپخش و بازجذب آلاینده صرف‌نظر کرد
- محلول بودن آلاینده در آب و عدم وجود فازهای مایع آب گریز
- تناسب عمق و ابعاد هاله آلودگی با دو فناوری احیاء مورد بحث

اغلب فرضیات یاد شده از جمله شرایط لازم جهت به کارگیری همزمان دو روش "پمپاژ-تصفیه" و "هوادهی" در احیای آبهای زیرزمینی آلوده می‌باشند[۱].

در شبیه‌سازی روش پمپاژ- تصفیه، دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم شامل معادله بوسینسک[1] برای شبیه‌سازی کمّی آبهای زیرزمینی در منطقه اشباع و معادله انتقال جرم برای شبیه‌سازی کیفی آن به این صورت استفاده می‌گردد[۷ و ۸]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_X\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_Y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_Z\frac{\partial h}{\partial z}\right)+q_s=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\theta D_{ij}\frac{\partial C}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(q_iC\right)+q_sC_S+R=\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} \qquad (۲)$$

که در معادله ۱، K_X، K_Y و K_Z به ترتیب ضرایب هدایت هیدرولیکی در جهت‌های x، y و z [L/T]، h ارتفاع پیزومتریک [L]، q_s دبی حجمی تزریقی یا تخلیه ای در واحد حجم لایه آبدار [T^{-1}] و S_s ضریب ذخیره ویژه [L^{-1}] می‌باشد. همچنین در معادله ۲، C_s غلظت آلاینده [ML^{-3}]، D_{ij} ضریب پخشیدگی هیدرودینامیکی [L^2T^{-1}]، q_i شار دارسی [LT^{-1}]، C_s غلظت در شار حجمی ورودی[ML^{-3}]، R واکنش آلاینده [$ML^{-3}T^{-1}$] و θ تخلخل (بی بعد) می‌باشد. (M ، L و T به ترتیب معرف جرم، طول و زمان می باشند). با حل معادله دیفرانسیل جزئی اول، میدان ارتفاع نظیر فشار[2] و در نتیجه آن، سرعت در نقاط مختلف آبخوان به دست می‌آید و سپس امکان حل معادله دوم که معرف انتقال جرم آلاینده در آبخوان است فراهم می‌گردد. پس از حل معادله دوم، غلظت آلاینده در نقاط و زمانهای مختلف در آبخوان به دست می‌آید.

همانطور که اشاره شد، به علت پیچیدگی فرآیندهای حاکم بر روش هوادهی، انواع مدل‌های شبیه‌سازی با انواع فرضیات ساده‌کننده در این خصوص ارائه شده‌اند. صحت برخی از مدل‌های تجربی ارائه شده، مانند مدل هانری در محیط متخلخل، در مقیاسهای کاربردی به تأیید محققان رسیده است[۲]. در این تحقیق با توجه به ابعاد مسأله و فرض محلول بودن آلاینده در آب، از مدل تجربی هانری در محیط متخلخل جهت شبیه‌سازی روش هوادهی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$C_{GAS}= C_{WATER}\times H\times K \qquad (۳)$$

در رابطه فوق، C_{GAS} غلظت آلاینده در هوای تزریقی [ML^{-3}]، C_{WATER} : غلظت آلاینده در آب [ML^{-3}]، H ضریب بی بعد هانری و K ضریب بی بعد تماس بین هوا و فاز آبی است که از طریق آزمایش تعیین می‌گردد. مقدار این ضریب با توجه به نحوه دانه‌بندی خاک از ۰/۲ تا ۰/۴ متغیر است[۱۰، ۱۱ و ۱۲]. در مدل تجربی هانری فرض بر تعادل بین فاز گازی و آبی بوده و فرضیات شبیه‌سازی مطابق فرضیات بیان شده می‌باشد.

[1] Boussinesq

[2] Head

۲-۲- ساختار مدل تلفیقی

ایده اصلی حاکم بر شبیه‌سازی همزمان روشهای "هوادهی" و "پمپاژ- تصفیه"، تقسیم دوره زمانی شبیه‌سازی به زیر دوره‌هاست. ابتدا معادله ۱ به صورت پایدار[1] و توسط مدل MODFLOW2000 با روش تفاضلات محدود حل می‌شود تا میدان سرعت و هد در آبخوان مشخص گردد. سپس در هر زیردوره، شبیه‌سازی، مدل MT3DMS4b برای یک بازه زمانی معادل زیر دوره، معادله ۲ را در یک شبکه تفاضلات محدود منطبق با شبکه به کار رفته در مدل MODFLOW2000 حل می‌کند. به این ترتیب میدان توزیع جرم محلول در پایان زیر دوره در آبخوان مشخص می‌شود. سپس در گره‌هایی که چاههای هوادهی در آنها تعریف شده است، مقادیر غلظت به دست آمده در پایان زیر دوره اصلاح می‌گردد. اصلاح مقادیر غلظت این گره‌ها از طریق اعمال معادله ۳ در گره مربوطه می‌باشد. به این ترتیب در یک بازه زمانی معادل زیردوره، به گره مورد نظر هوا تزریق شده و از غلظت آن کاسته می‌شود. سپس مقادیر اصلاح شده غلظت گره‌های محیط شبیه‌سازی به عنوان شرط اولیه غلظت در زیر دوره بعدی به کار رفته و مدل MT3DMS4b مجدداً به مقدار یک زیر دوره اجراء می‌گردد. این فرآیند تا پایان دوره شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. فلوچارت شبیه‌سازی این مدل در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲-۳- صحت سنجی مدل تلفیقی

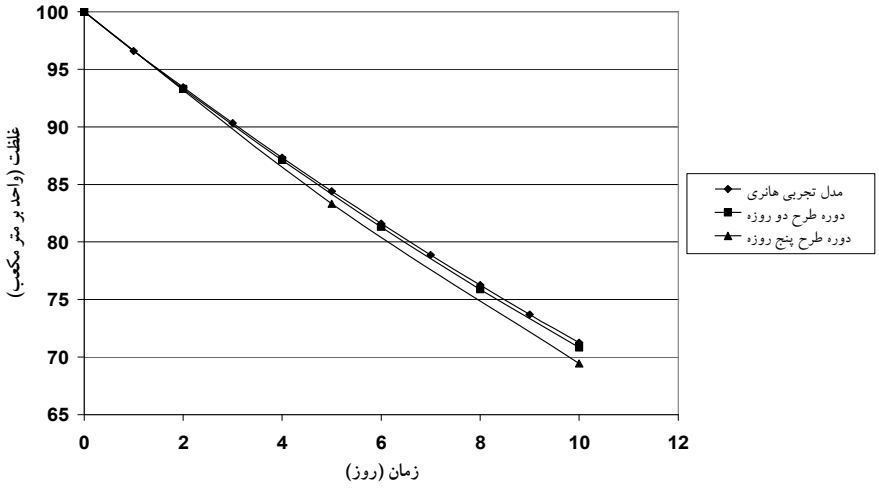
۲-۳-۱- بررسی تطابق شبیه‌سازی هوادهی با مدل تجربی هانری

از آنجا که صحت سنجی مدل در مقیاس واقعی نیاز به زمان طولانی و امکانات اجرایی خاص خود را دارد، لذا در این مرحله و با استفاده از شرایط فرضی با جوابهای قابل پیش‌بینی، اقدام به صحت سنجی مدل جامع گردیده است. در این رابطه مدل تجربی هانری به کار رفته است.

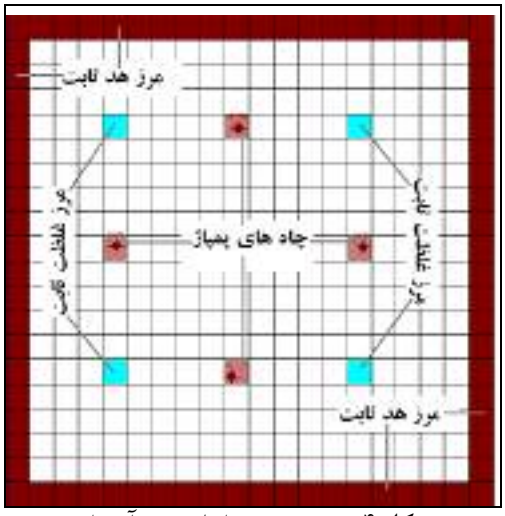
یک محیط متخلخل اشباع به طول و عرض ۶۰ متر و عمق ۱۰ متر با تخلخل ۰/۵ در نظرگرفته شده است. غلظت اولیه آلاینده در این محیط برابر ۱۰۰ واحد بر متر مکعب فرض گردیده و هد ثابت ۱۰ متر در چهار ضلع محیط متخلخل لحاظ می‌گردد تا حرکت آب به خارج یا داخل محیط محدود گردد. تعداد ۲۵ عدد دیفیوزر، هوا را به صورت پیوسته و با دبی ۱۰۰ متر مکعب در ساعت به داخل محیط متخلخل تزریق می‌کنند. ضریب هانری آلاینده و ضریب

[1] Steady state

شکل ۲- فلوچارت شبیه سازی مدل تلفیقی



شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از استفاده مستقیم از مدل هانری و استفاده اززیر دوره‌ها در مدل تلفیقی



شکل ۴- موقعیت و شرایط مرزی آبخوان

تماس آلاینده و هوا هر دو برابر ۰/۱ در نظرگرفته می‌شوند. عملیات تزریق هوا به محیط متخلخل نیز ۱۰ روز ادامه می‌یابد.

شکل ۳ نتایج به دست آمده در خصوص روند کاهش غلظت در محیط متخلخل را برای حالت استفاده مستقیم از مدل هانری و استفاده از مدل تلفیقی با زیر دوره های دو و پنج روزه نشان می‌دهد. با توجه به این شکل حداکثر خطای نسبی نسبت به مدل تجربی هانری برای زیردوره پنج روزه رخ می دهد. مقدار این خطای نسبی برابر ۳درصد می‌باشد.

۲-۳-۲- حساسیت مدل به طول زیردوره

آبخوانی به طول و عرض ۱۰۰۰ متر و ضخامت لایه آبدار معادل ۲۰ متر با ضریب تخلخل ۰/۳ و ضریب هدایت هیدرولیکی ۵ متر بر روز در سه جهت در نظر گرفته شده است. در چهار ضلع این آبخوان مرز هد ثابت برابر ۲۰ متر فرض گردیده است. همچنین ۴ عدد چاه پمپاژ با دبی ۶۰۰ متر مکعب در روز از این آبخوان، آب برداشت می‌کنند. چهار منبع نقطه‌ای نیز به عنوان شرط مرزی غلظت ثابت برابر ppb ۱۰۰۰ در این آبخوان مشخص شده‌اند. همچنین نسبت ضریب پخشیدگی طولی به عرضی آلاینده برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. در شکل ۴، موقعیت آبخوان و شرایط مرزی آن نشان داده شده است.

در طی یک دوره طرح ۱۰۰۰ روزه، شبیه‌سازی کمّی و کیفی آبخوان توسط مدل‌های MODFLOW2000 و MT3DMS4b انجام گرفت. همچنین با فرض تقسیم دوره طرح ۱۰۰۰ روزه به زیر دوره‌های ۵۰، ۲۵ و ۲ روزه مدل تلفیقی نیز اقدام به شبیه‌سازی گسترش آلاینده درآبخوان کرده است. گسترش نهایی آلاینده در آبخوان در پایان روز هزارم شبیه‌سازی در چهار سناریوی یاد شده

به ترتیب در شکلهای ۵-الف، ۵-ب، ۵-ج و ۵-د نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵ ملاحظه می‌شود که طول زیر دوره تأثیری بر گسترش نهایی مرز بیرونی و نحوه توزیع جرم درون هاله آلودگی ندارد.

۳- مطالعه موردی

۳-۱- موقعیت آبخوان و مشخصات آلاینده

منطقه مورد مطالعه در محدوده باقرشهر واقع در غرب پالایشگاه تهران است. این منطقه از شمال به شهر ری و تهران، از غرب به پالایشگاه و روستای اسماعیل آباد، از جنوب به روستاهای قمصر و دورسون آباد و از شرق به بهشت زهرا محدود می‌شود.

ضریب هدایت هیدرولیکی در این آبخوان ۵ متر در روز و متوسط ضخامت لایه آبدار ۳۵ متر در نظر گرفته شده است[۱۳]. در شکل ۶ منطقه مورد نظر در مختصات UTM[1] نشان داده شده است.

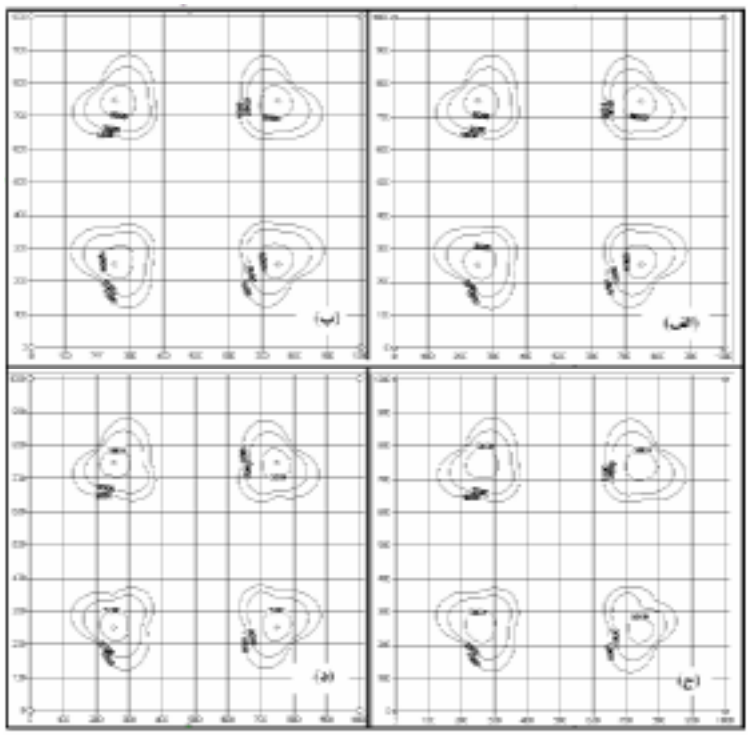
به علت مجاورت منطقه یاد شده با پالایشگاه تهران، از محدوده یاد شده تا اسماعیل‌آباد واقع در شرق پالایشگاه انواع مشتقات نفتی و فلزات سنگین در نمونه‌های آبهای زیرزمینی و خاک این منطقه مشاهده شده است. انواع ترکیبات بنزنی، هیدروکربن‌های آروماتیک وآلیفاتیک و متیل ترت - بوتیل اتر که به اختصار MTBE[2] خوانده می‌شود، از جمله آلاینده‌های یافت شده در نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه می‌باشند[۱۴].

MTBE که ماده‌ای بی‌رنگ و قابل اشتعال می‌باشد، از سال ۱۹۷۹ به عنوان جایگزین سرب در بنزین جهت بهبود نحوه سوخت آن مورد استفاده قرار گرفته است. حلالیت این ماده در آب ۱۰ برابر بنزن بوده و تا ۴۸۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در آب قابل حل است. ضریب هانری آن نیز در حدود ۰/۰۲ برآورد شده است. این ماده در مقابل تجزیه بیولوژیکی مقاوم بوده و جذب بافت خاک نمی‌گردد. علیرغم تأثیرات کم MTBE بر سلامت انسان، به علت تغییرات شدید در طعم و بوی آب حتی در غلظتهای پایین آن مقدار مجاز این ماده در آب به ۲۵ میکروگرم در لیتر محدود شده است. احیای آبخوان‌های آلوده به MTBE به علت خواص آن با روشهای هوادهی و پمپاژ-تصفیه امکان‌پذیر است. روش اندازه‌گیری این ماده در طی عملیات پمپاژ- تصفیه، روش EPA 5030 می‌باشد که بر کروماتوگرافی گاز استوار است [۱۵ و ۱۶].

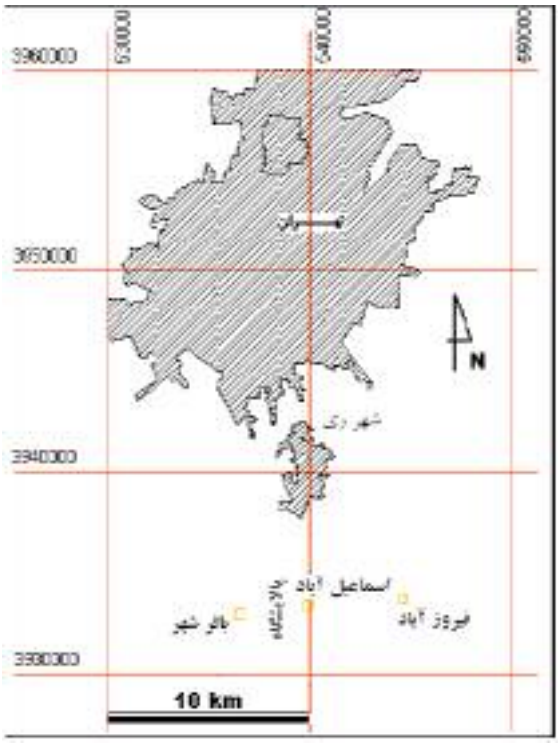
در جدول ۱ مقادیر اندازه‌گیری شده MTBE از آب چاههای منطقه مورد مطالعه در مختصات UTM مشخص شده است. لازم به

[1] Universal Transverse Mercator

[2] Methyl Tertiary Butyl Ether



شکل ۵ - گسترش نهایی هاله آلودگی (الف: دوره طرح شامل یک زیردوره ۱۰۰۰ روزه، ب: دوره طرح شامل ۲۰ زیر دوره ۵۰ روزه، ج: دوره طرح شامل ۴۰ زیردوره ۲۵ روزه، د: دوره طرح شامل ۵۰ زیر دوره ۲ روزه)



شکل ۶- نقشه منطقه مورد مطالعه

جدول ۱-غلظت MTBE اندازه‌گیری شده در چاههای منطقه به همراه مختصات چاههای نمونه‌برداری بر مبنای UTM [۱۴]

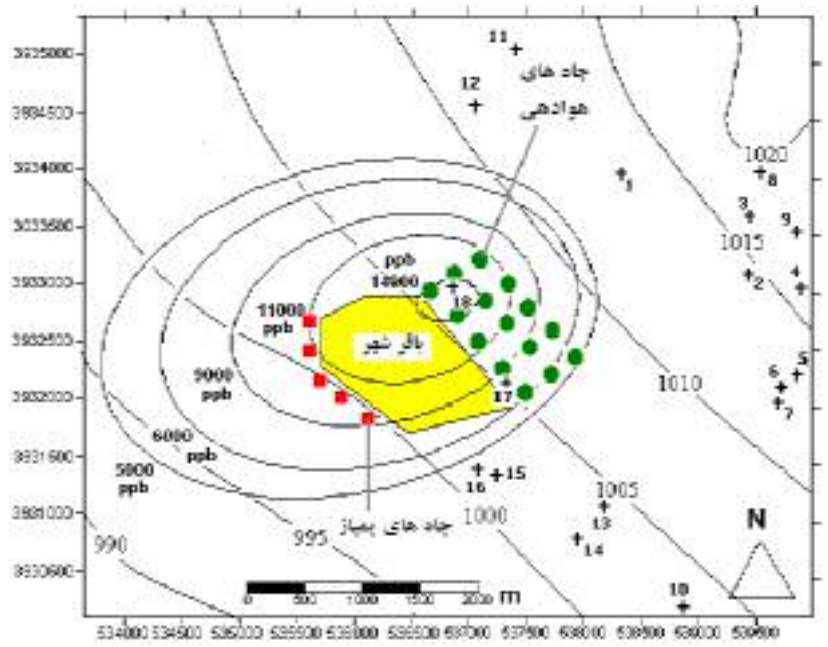
شماره چاه	UTMX	UTMY	غلظت MTBE (ppb)	شماره چاه	UTMX	UTMY	غلظت MTBE (ppb)
۱	۵۳۸۴۴۳	۳۹۳۴۰۷۸	۴۷۴	۱۰	۵۳۸۹۵۱	۳۹۳۰۱۷۷	۵
۲	۵۳۹۵۰۷	۳۹۳۳۱۳۹	۵۲	۱۱	۵۳۷۸۴۷	۳۹۳۵۴۰۸	۹۴
۳	۵۳۹۵۷۳	۳۹۳۳۵۴۷	۱۱۱۵	۱۲	۵۳۷۳۴۷	۳۹۳۴۵۵۳	۱۵۲۱
۴	۵۳۹۹۸۵	۳۹۳۲۹۱۰	۲۲۴۰	۱۳	۵۳۸۳۳۰	۳۹۳۱۱۶۹	۶۱۲
۵	۵۳۹۹۵۹	۳۹۳۲۳۴۲	۴۳۰۲	۱۴	۵۳۷۹۹۰	۳۹۳۰۷۴۸	۱۹۹
۶	۵۳۹۸۱۰	۳۹۳۲۲۹۰	۱۲	۱۵	۵۳۷۳۰۶	۳۹۳۱۲۷۶	۵
۷	۵۳۹۸۱۰	۳۹۳۲۱۵۷	۶۲	۱۶	۵۳۷۱۲۱	۳۹۳۱۲۱۵	۲۲۳۱
۸	۵۳۹۶۹۳	۳۹۳۳۸۰۸	۶۰۸	۱۷	۵۳۷۴۸۲	۳۹۳۱۹۰۸	۴۷۶۷
۹	۵۳۹۹۳۵	۳۹۳۳۵۳۴	۱۰۹۹	۱۸	۵۳۶۹۹۶	۳۹۳۲۹۳۹	۱۵۲۰۷

ذکر است که به علت تغییرات بسیار کند و سرعت ناچیز حرکت هاله آلودگی در لایه آبدار، این اندازه‌گیریها یک بار صورت گرفته است. همچنین به علت حلالیت بالای MTBE در آب، این داده‌ها به صورت یکسان در عمق در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اطلاعات تکمیلی در خصوص نحوه توزیع انواع آلاینده‌های نفتی در آبخوان و ترسیم خطوط هم عمق[1] منطقه، نقشه گسترش هاله آلودگی MTBE مطابق شکل ۷ و در مختصات UTM رسم شده است [۱۳ و ۱۴].

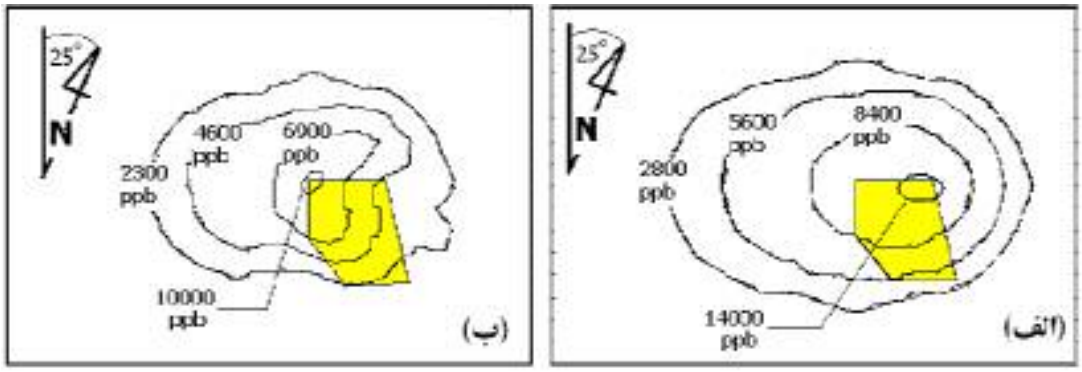
۳-۲- شبیه‌سازی همزمان روشهای "پمپاژ- تصفیه" و "هوادهی"

با توجه به نوع آلاینده هدف و نیز مشخصات آبخوان، روشهای هوادهی و پمپاژ-تصفیه دراحیاء مناسب به نظر می‌رسند. هدف این است که بدون نصب هیچ کدام از تجهیزات احیای آبخوان در منطقه شهری، غلظت هاله آلودگی در ناحیه شهری باقر شهر به صورت محلی کاهش یابد. از این رو تصمیم گرفته شد احداث ۵ حلقه چاه پمپاژ-تصفیه در پایین دست شهر و ایجاد یک شبکه هوادهی در بالادست شهر بررسی گردد. به این صورت چاههای هوادهی از ورود

[1] Isopiese



شکل ۷-گسترش هاله آلودگی، خطوط هم عمق، محل چاههای احیاء و چاههای نمونه‌گیری



شکل ۸- گسترش نهایی هاله آلودگی (الف: بدون استفاده از عملیات احیاء، ب: با استفاده از عملیات احیاء)

آلاینده به داخل حریم شهری در اثر عملیات پمپاژ جلوگیری کرده و شبیه یک مرز باز دارنده همراه با قابلیت احیاء عمل می‌کنند. موقعیت چاههای پمپاژ- تصفیه وهوادهی در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.

به کمک روش جدیدی که در این تحقیق برای شبیه‌سازی همزمان روشهای هوادهی و پمپاژ- تصفیه ارائه شده است، نحوه عملکرد روشهای احیاء یاد شده در پاکسازی این آبخوان بررسی گردید. طول دوره شبیه‌سازی برابر ۵ سال و نرخ پمپاژ چاههای پمپاژ- تصفیه برابر ۲۰۰۰ مترمکعب در روز در نظر گرفته شد.

جهت شبیه‌سازی از یک شبکه تفاضلات محدود با سلول‌های به ابعاد ۲۶۰ متر استفاده گردید. چاههای هوادهی نیز در نقاط نشان داده شده در شکل ۷ و بر روی گره‌های شبکه تعریف شدند. دبی تزریق هوا در این چاهها برابر ۱۵۰۰ مترمکعب در ساعت در نظر گرفته شد. در عمل چون لزومی به احداث چاههای هوادهی بر روی گره‌های شبکه وجود ندارد و شعاع همپوشانی چاههای هوادهی نیز می‌بایست در نظر گرفته شود، می‌توان از تعداد بیشتری چاه با فاصله و دبی تزریق کمتر استفاده نمود.تخلخل خاک و ضریب تماس بین آلاینده و هوا برابر ۰/۲ فرض گردید. همچنین از زیردوره‌های ۵ روزه جهت انجام عملیات شبیه‌سازی استفاده گردید.

۳-۳- نتایج حاصله با اجرای مدل تلفیقی شبیه‌سازی روشهای هوادهی و پمپاژ - تصفیه

در شکل ۸ گسترش نهایی هاله آلودگی موجود پس از طی ۵ سال در دو حالت بدون استفاده و با استفاده از عملیات احیاء نشان

جدول ۲-بیلان جرم MTBE در آبخوان

جرم اولیه (در ابتدای شبیه سازی) (تن)	جرم خروجی توسط پمپاژ (تن)	جرم خروجی توسط هوادهی (تن)	کل جرم خروجی (تن)	جرم باقی مانده (در پایان شبیه سازی) (تن)
۴۵۱	۱۵۲/۴	۲۴/۱	۱۷۶/۵	۲۷۰

داده شده است. ملاحظه می‌گردد که به علت سرعت کم حرکت آبهای زیرزمینی، هاله آلودگی در حالت بدون استفاده از عملیات احیاء تغییر مکان چندانی نداده است. از سوی دیگر در حالت استفاده از عملیات احیاء و به علت ایجاد گرادیان هیدرولیکی در اثر چاههای پمپاژ، ملاحظه می‌گردد که آلاینده موجود در زیر سطح شهر به خارج شهر حرکت کرده ضمن اینکه به علت وجود چاههای هوادهی در بالا دست شهر، آلاینده ورودی به شهر بسیار کمتر از آلاینده خروجی از آن است.

با استفاده از عملیات احیاء، مقدار آلاینده موجود در لایه آبدار واقع در زیر سطح شهر در مقایسه با حالت عادی به نصف کاهش می‌یابد، ضمن این که حداکثر غلظت آلاینده در این حالت به ۱۰۵۰۰ ppb می‌رسد. این عدد در حالت بدون عملیات احیاء، ۱۴۲۰۰ ppb می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله مشخص می‌شود که می‌توان با استفاده از ترکیب دو روش احیاء و به کارگیری همزمان آنها، بخشی از هاله آلودگی را که در زیر شهر واقع است به صورت محلی تا حد زیادی پاکسازی و حذف نمود. همچنین در جدول ۲ بیلان جرم آلاینده در آبخوان مشاهده می‌گردد. خطای نسبی موجود در بیلان جرم آلاینده در حدود یک درصد است که ناشی از حداکثر دقت قابل محاسبه غلظت آلاینده در پایان هر زیردوره می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

ویژگیهای خاص محیط متخلخل و رفتار آلاینده‌ها در آن موجب گردیده است که ایده‌های جدیدی در خصوص بهره‌گیری همزمان از دو یا چند روش احیاء ارائه گردد. در این تحقیق عملکرد همزمان روشهای هوادهی و پمپاژ- تصفیه در احیاء آبهای زیرزمینی بررسی گردید. با توجه به فرضیات مطرح شده و استفاده از مدل‌های موجود و با تلفیق آنها بامدل تجربی هانری، مدلی ارائه گردید که قابلیت شبیه‌سازی دو فناوری احیاء یاد شده را دارد. حالتهای خاصّی که به کمک مدل تلفیقی حل شد نشان داد که حساسیت این مدل به طول زیر دوره کم است. همچنین با استفاده از این مدل و در طی یک مطالعه موردی مشخص گردید که با ترکیب دو روش احیاء یاد شده می‌توان به صورت محلی بخشی از هاله آلودگی را مورد احیاء قرار داد بدون آن که در آن بخش تجهیزات احیای آبهای‌زیرزمینی نصب شود. بدیهی است که در صورت استفاده مجزا از روشهای احیاء یاد شده چنین امری میسر نمی‌گردید.

۵- قدردانی و تشکر

از دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران به دلیل حمایت مالی پروژه تحقیقاتی به شماره ENV1-۸۴۰۱۵ تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از دفتر آزمایشگاه سازمان حفاظت محیط زیست ایران به دلیل در اختیار گذاشتن نتایج آزمایشهای مربوط به آلاینده‌های آبخوان اسماعیل آباد تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

1- Khan, F.I., Husain, T., and Hejazi, R. (2004). "An Overview and Analysis of Site Remediation Technologies." *J. Environmental Management*, 71, 95-122.

2- McCray, J.E. (2000). "Mathematical Modeling of Air Sparging for Subsurface Remediation." *J. Hazardous Materials*, 72, 237-263.

3-Benner, M.L., Stanford, S.M., Lee, L.S., and Mohtar, R.H. (2000). "Field and Numerical Analysis of In- Situ Air Sparging." *J. Hazardous Materials*, 72, 217-236.

4-McKay, D.J., and Acomb, L.J. (1996). "Air Saturation During Air Injection in Porous Media." *J. Monit. Rem.*, 16, 86-94.

5-Falta, R.W., Pruess, K., Finsterle, S., and Battistelli, A. (1995). *T2VOC User's Guid,* Department of Energy, USA.

6-Group of researchers. (2002). *Air sparging design paradigm,* US Air Force Armstrong Laboratory, Ohio-USA.
7- U.S. Department of the Interior. (2000). *User guide to modularization concepts and the groundwater flow process-MODFLOW2000*, Virginia, USA.
8- U.S. Army Corps of Engineers. (1999). *MT3DMS; User's guide and documentation*, Washington DC, USA.
9-Fetter, C.W. (1993). *Contaminant hydrogeology,* Macmillan Publishing Company, New York.
10-Lesson, A., Hinchee, R.E., Headington, G.L., and Vogel, C.M. (1995). "Air distribution in three phase porous media."Proceeding from Third International In-situ and Bioremediation Symposium San Diego, CA. USA. 215-222.
11-LaBrecque, D., and Lundergaurd. P.D. (1998). "Air distribution in semi-homogenous soil." First national Conference on Remediation. Monterey, CA, USA. 59-71.
12- Thomson, N.R., and Johnson, R.L. (2000). "Air Distribution During in Site Air Sparging: An Overview of Mathematical Modeling." *J. Hazardous Materials*, 72, 265-282.
۱۳- کمپانی ژنرال دو فیزیک. (۱۳۵۶). *مطالعات ژئوفیزیک دشت تهران با متد الکتریک*، دفتر مطالعات آبهای زیرزمینی، سازمان امور آب استان تهران.
۱۴- دفتر امور آزمایشگاههای سازمان حفاظت محیط زیست. (۱۳۸٤). *"گزارش کمیته راهبری آلودگی نفتی پالایشگاه تهران و حومه آن، جلد دوم* : گزارش فنی کمیته.
15- Web Page: US EPA. (1998). "MTBE Fact Sheet #2",< www.epa.gov/OUST/mtbe/> (Jan. 10, 2005).
16- US EPA. (1997). "Testing Methods for Evaluating Solid Waste and Water." Washington DC., USA.