

مروری بر عملکرد سیستم‌های پمپاژ و تصفیه در رفع آلودگی آبهای زیرزمینی

مهسا طاهری^{۱*}، تقی عبادی^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران - محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۲- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

mahsa_taheri88@yahoo.com

چکیده

پمپاژ و تصفیه یکی از رایج‌ترین تکنولوژی‌های استفاده شده برای آلودگی زدایی از آبهای زیرزمینی است. این سیستم تصفیه شامل پمپ نمودن آب زیرزمینی به سطح زمین، حذف نمودن آلاینده‌ها، و سپس بازگرداندن آب تصفیه شده به داخل زمین یا تخلیه آن به آب سطحی و یا تصفیه خانه فاضلاب شهری است. در این راستا توجه به ویژگی‌های هیدرولیکی منطقه، طراحی سیستم پمپاژ و نیز خواص فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها جهت تصفیه آلودگی دارای اهمیت فراوان است. مقاله حاضر به بررسی عملکرد سیستم پمپاژ و تصفیه و همچنین ارائه راهکارهایی جهت ارتقاء آن می‌پردازد.

کلمات کلیدی: سیستم پمپاژ و تصفیه، آلاینده‌های آب زیر زمینی، مدیریت و پایش، بهبود عملکرد

۱- مقدمه

در بحث رفع آلودگی از آبهای زیر زمینی دو هدف می‌بایست مورد توجه قرار بگیرند، یکی کنترل آلودگی و جلوگیری از گسترش آن به مناطق غیر آلوده است و دیگری رفع آب زیرزمینی برای مثال با هدف دستیابی به زیر مقدار حداکثر سطوح آلاینده^۱ (MCLs) می‌باشد. منبع آلاینده خاک و آب زیرزمینی می‌تواند محل دفن زباله^۲، لوله‌های منتهی به یک معدن، مخازن زیرزمینی، خطوط لوله، مخازن و لوله‌های فاضلاب باشد. برخی از مواد آلاینده از این منابع اولیه می‌توانند در داخل آب و یا خاک باقی بمانند و پس از مدتی در محیط مجدداً منتشر شده و تولید آلودگی ثانویه کنند (Fetter W., 1999). یک دسته بسیار مهم از این مواد سیالات غیر ممزوج با آب^۳ (NAPL) هستند، که خود به دو دسته سبک^۴ (LNAPL) و سنگین^۵ (DNAPL) تقسیم می‌شوند. سیالات غیر ممزوج با آب می‌توانند بسته به سبک یا سنگین بودن روی آب شناور باقی بمانند یا روی سنگ بستر جمع شوند، پس وظیفه ما در حذف منبع آلاینده تنها حذف و جداسازی منبع آلاینده اولیه نیست، بلکه منابع آلاینده ثانویه نیز بایستی شناسایی و ایزوله شوند (Fetter W., 1999; MIT Open Course Ware., 2004a; Voudrias. E.A., 2001).

سطح پاکسازی منطقه بستگی به قوانین و مقررات منطقه یا کشور دارد. تقریباً در تمامی حالات امکان بازگرداندن بخش آلوده شده به شرایط طبیعی اولیه وجود ندارد. اینکه استانداردها چه حدی را برای پاکسازی مشخص کرده‌اند بستگی به صنعتی یا غیر صنعتی بودن منطقه دارد. همچنین در صورت تخلیه به آب زیرزمینی که امکان آشامیدن آن نیز وجود دارد، باید مقدار آلاینده حتماً زیر MCLs باشد. در هر صورت هنگام تصفیه باید به این نکته نیز توجه نمود که هزینه‌های پاکسازی متناسب با کاربرد منطقه یا آب تصفیه شده باشند، که این امر اغلب با توجه به ارزیابی ریسک انجام می‌شود (Fetter W., 1999). سیستم‌های پمپاژ و تصفیه

¹ Maximum Contaminant Levels

² Landfill

³ Non Aqueous Phase Liquid

⁴ Light Non Aqueous Phase Liquid

⁵ Dense Non Aqueous Phase Liquid

یکی از متداول ترین روشهای رفع آلودگی می باشد (MIT Open Course Ware., 2004b; Soga. K. et al., 2004; Yan. Y.L., 2011). حسن استفاده از این روشها امکان بکار بردن انواع تصفیه‌ها روی آب برداشت شده از زیر زمین و بکار بردن آن آب برای مصارف گوناگون یا تزریق مجدد آن به زیر سطح زمین می باشد (Fetter W., 1999). هدف از این مقاله بررسی عملکرد سیستم‌های پمپاژ و تصفیه و همچنین ارائه راهکارهایی جهت ارتقاء آنها می باشد. بنا بر اطلاعات ما تاکنون مطالعه‌ای در ایران در زمینه توضیح اصول روش پمپاژ و تصفیه به ویژه در مقالات کنفرانسی انجام نشده است.

۲- سیستم‌های پمپاژ و تصفیه

۱-۲- مدیریت

اولین گام در رفع آلودگی یک منطقه، شناسایی آن ناحیه می باشد. در این راستا به موارد گوناگون شامل پارامترهای هیدرولیکی و هیدروژئولوژی؛ نوع ماده آلاینده و ویژگی‌های آن؛ شیمی آب مانند pH، دما، قلنایت و غیره؛ میزان جریان و سرعت آب توجه می گردد. در نهایت طراحی سیستم‌های پمپاژ و تصفیه با در نظرگیری تمام موارد ذکر شده و قوانین و مقررات مربوطه انجام می شود (Suthersan S.S., 1996). یکی از راهها برای جلوگیری از عبور جریان و گسترش آلودگی این است که تا سنگ بستر اطراف پلوم آلودگی را دیوار جداکننده^۱ یا مانع^۲ بکشیم و سپس در منطقه محصور پاکسازی انجام گردد (American Petroleum Institute., 2003; Fetter W., 1999; Sara M.N., 2003; United States Environmental Protection Agency., 1994, 1996). در پاکسازی منطقه ویژگی‌های خاک، آب و آلاینده بسیار تاثیرگذار است. مثلا ممکن است به دلیل اینکه بخشی از آلاینده جذب خاک می شود یا انحلال رسوبات و یا ویژگی‌های خاک مانند نامگون بودن؛ کاهش غلظت آلاینده محلول کمتر از مقدار پیش‌بینی شده باشد. به چنین پدیده‌ای "مقدار باقیمانده"^۳ می گویند، که کاهش کم شدن تدریجی غلظت آلاینده محلول در زمان عملکرد سیستم پمپاژ و تصفیه است. مشکل دیگری که ممکن است با آن مواجه شویم، پدیده "بازگشت به حالت اولیه"^۴ است. در این حالت با نزدیک شدن به استاندارد پاکسازی و رسیدن به سطح غلظت آلاینده ظاهراً باقیمانده^۵ پمپاژ متوقف می شود، ولی پس از مدتی غلظت آلاینده افزایش می یابد. اثرات "مقدار باقیمانده" و "بازگشت به حالت اولیه" ممکن است نتیجه فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی باشند که بر پاکسازی منطقه نیز تاثیر می گذارند (United States Environmental Protection Agency., 1994, 1996). شکل ۱ نمایانگر تغییرات غلظت در مقابل زمان یا حجم پمپاژ است که بیان کننده اثرات "مقدار باقیمانده" و "بازگشت به حالت اولیه" می باشد. شکل ۲ نیز نحوه مدیریت منطقه را به منظور متوقف کردن به موقع یا تعیین موفقیت سیستم پمپاژ و تصفیه را نشان می دهد. توجه به این نکته نیز ضروری است که تنها روش تصفیه، پمپاژ و تصفیه نیست و در هر ناحیه (ناحیه غیر اشباع^۶، آب زیر زمینی و یا خاک آغشته به آلاینده^۷) روش تصفیه مناسب با توجه به نفوذ پذیری و سایر شرایط وجود دارد (American Petroleum Institute. 2003)، که در صورت عدم موفقیت سیستم پمپاژ و تصفیه استفاده از این روشها به منظور بهبود عملکرد سیستم یا جایگزینی آن توصیه می شود. به عنوان نمونه، حتی خود سیستم پمپاژ و تصفیه انواع گوناگون دارد، برای مثال می توان به جای حفر چاه، در مناطق با سطح آب زیرزمینی بالا تراشه ایجاد نمود و یا با افزودن مواد مختلف به آب زیر زمینی راندمان سیستم را بالا برد (United States Environmental Protection Agency., 1996).

¹ Cutoff wall

² Barrier

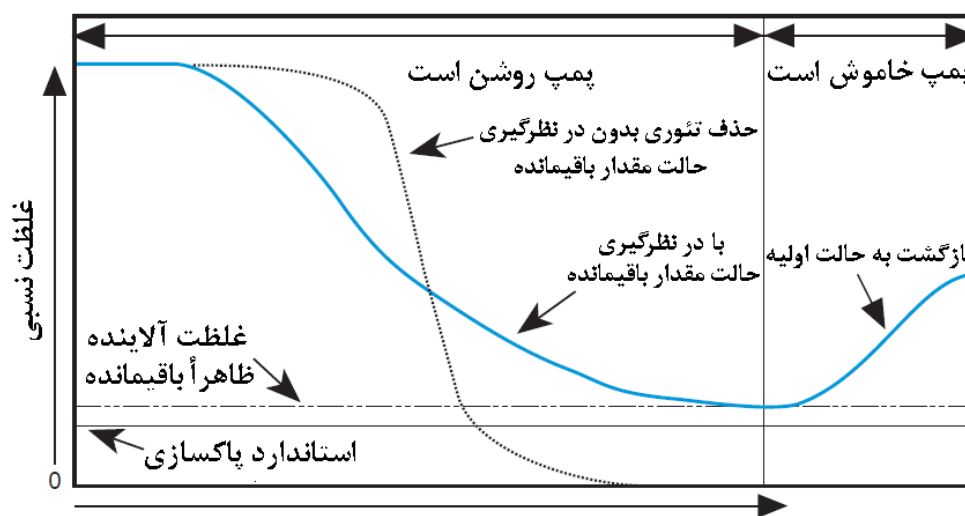
³ Tailing

⁴ Rebound

⁵ Apparent residual contaminant concentration

⁶ Vadose zone

⁷ Smear zone



شکل ۱- غلظت در مقابل زمان یا حجم پمپاژ؛ نشان دهنده اثرات "مقدار باقیمانده" و "بازگشت به حالت اولیه"
(United States Environmental Protection Agency., 1994, 1996)

آب بیرون کشیده شده از زمین نیز بایستی به طریق مناسبی تصفیه گردد. برای یافتن روش تصفیه مناسب باید به نوع آلاینده توجه کرد. ساده ترین روش این است که مواد آلاینده را به دو دسته آلی و غیر آلی تقسیم کرد، سپس نوع تصفیه را تعیین نمود (Fetter W., 1999). رایج ترین شیوه‌ها عبارتند از ترسیب فلزات، تبادل یونی برای حذف مواد غیر آلی، استفاده از برجهای عریان ساز- هوا برای مواد آلی دارای فراریت مناسب، کربن فعال برای مواد آلی با فراریت پایین، حذف بیولوژیکی مواد آلی، استفاده از انواع روشهای اکسیداسیون و اشعه ماوراء بنفش برای شکستن ترکیبات آلی مقاوم در برابر روشهای عریان سازی یا کربن فعال و یا بیولوژیکی. انواع فیلترها نیز می‌توانند برای جداسازی مواد آلاینده و در ترکیب با فرآیندهای بالا بکار روند (Fetter W., 1999; MIT Open Course Ware., 2004b). در مرجع United States Environmental Protection Agency., 2005 مزایا و معایب این روشها بررسی شده است و در نهایت ارزیابی اقتصادی برای سیستم تصفیه انجام گردیده است (United States Environmental Protection Agency., 2005). سایر دسته بندی‌ها در مراجع دیگر گسترده تر هستند. برای مثال در مرجع (United States Environmental Protection Agency., 1996). در جدولی تمامی آلاینده‌های موجود در آبهای زیرزمینی و روش تصفیه آنها لیست شده‌اند. کلیه روشهای تصفیه برای تمام آلاینده‌های موجود در جدول مذکور به سه دسته کاربردی، بالقوه کاربردی و غیر کاربردی تقسیم گردیده‌اند (United States Environmental Protection Agency., 1996).

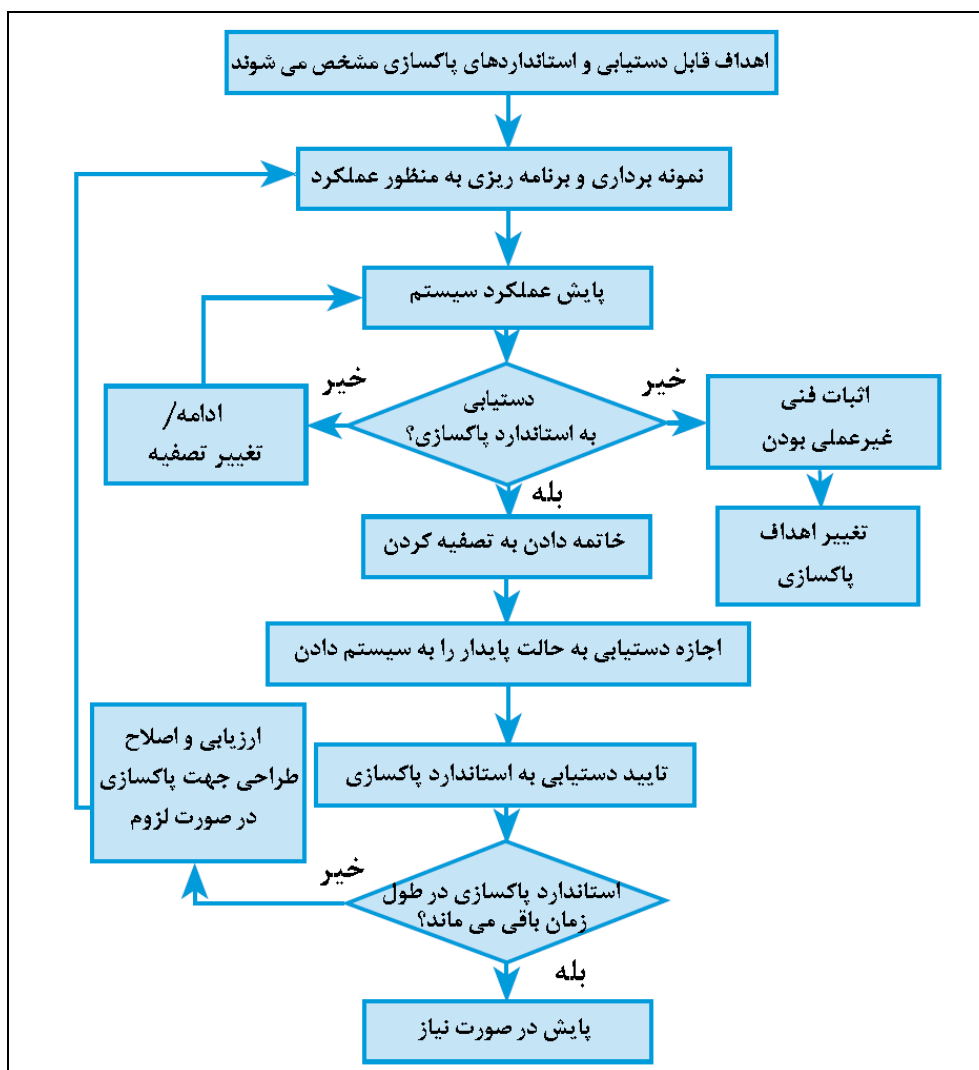
۲-۲- طراحی

به منظور طراحی یک سیستم پمپاژ و تصفیه در یک سفره آب زیر زمینی با عمق محدود بایستی ابتدا خطوط جریان و هم پتانسیل، با توجه به معادلات لاپلاس مشخص گردند. برای محاسبه این خطوط ابتدا جریانهای یکنواخت محاسبه شده و سپس جریانهای به سمت چاه به آن اضافه می‌شوند. در نهایت رابطه بدست آمده برای تعیین ناحیه در برگیرنده هر چاه حل می‌شود. مکان چاه می‌تواند در انتهای پلوم آلودگی در جهت جریان باشد. شکل ۳ نشان دهنده روابط حاکم بر نقطه ایستایی و محدوده در برگیرنده هر چاه است. در این روابط Q_w نشان دهنده دبی هر چاه بر حسب متر مکعب بر ثانیه، i گرادیان هیدرولیکی (بدون واحد) و T قابلیت انتقال بر حسب متر مربع بر ثانیه می‌باشند. به روابط شکل ۳ می‌توان دو رابطه زیر را نیز اضافه کرد:

$$Ti = BU \quad (1)$$

$$y = \pm \frac{Q}{2BU} - \frac{Q}{2pBU} \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2)$$

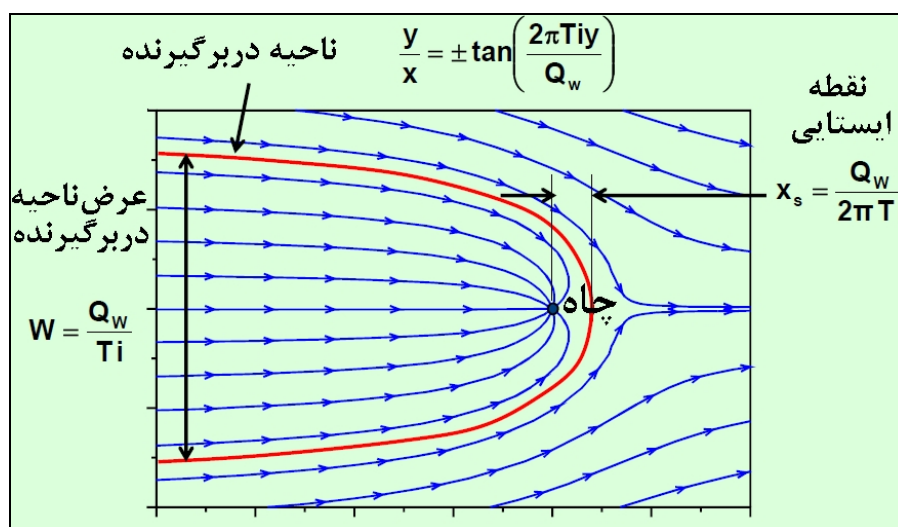
که در آن B عمق آب زیر زمینی تا سنگ بستر بر حسب متر و U حاصل ضریب هدایت پذیری هیدرولیکی در گرادیان هیرولیکی بر حسب متر بر ثانیه است (Fetter W., 1999; MIT Open Course Ware., 2004b). هدایت پذیری هیدرولیکی در ناحیه اشباع از راههای مختلف (آزمایشگاهی و میدانی) بر حسب متر بر ثانیه قابل حصول است (Sara M.N., 2003)



شکل ۲- مدیریت یک سیستم پمپاژ و تصفیه جهت تعیین موفقیت و یا متوقف کردن آن
(United States Environmental Protection Agency., 1996)

رابطه ۲ همان رابطه ناحیه در برگیرنده است، که در آن مقدار Q/BU بر حسب متر تنها پارامتر مساله می باشد. هر یک از خطوط آبی رنگ جریان در شکل ۳ منتهی به چاه دارای یک مقدار Q/BU ثابت هستند. پس در مسائل مختلف با داشتن یک چاه با دبی پمپاژ مشخص (Q/BU های مختلف منتهی به چاه) و همچنین موقعیت پلوم آلودگی، می توان مقدار دبی عبوری از پلوم را برای پاکسازی تعیین کرد. نکته مهم دیگر این است که گاهی با حفر یک چاه نمی توان به حداکثر مقدار پمپاژ مورد نیاز دست

یافت. این مساله می تواند به علت افت هد زیاد در چاه و بیشتر شدن آن از عمق آب زیرزمینی (B) باشد. در این حالت چند چاه معمولاً در یک راستا حفر می گردند، و افت هد مجدداً در مرکزی ترین چاه کنترل می گردد. بنابراین مشابه رابطه ۲ را می توان برای ۲ و ۳ چاه (با فرض حفر چاهها در امتداد y در شکل ۳) نیز بیان نمود (Fetter W., 1999; MIT Open Course Ware., 2004b). برای محاسبه افت هد نیاز به شعاع دهانه چاه، پارامتر ذخیره سازی^۱، قابلیت انتقال و زمان پمپاژ می باشد. با داشتن این مقادیر افت هد از روابط مربوطه به صورت تقریبی محاسبه می گردد (Fetter W., 1999).



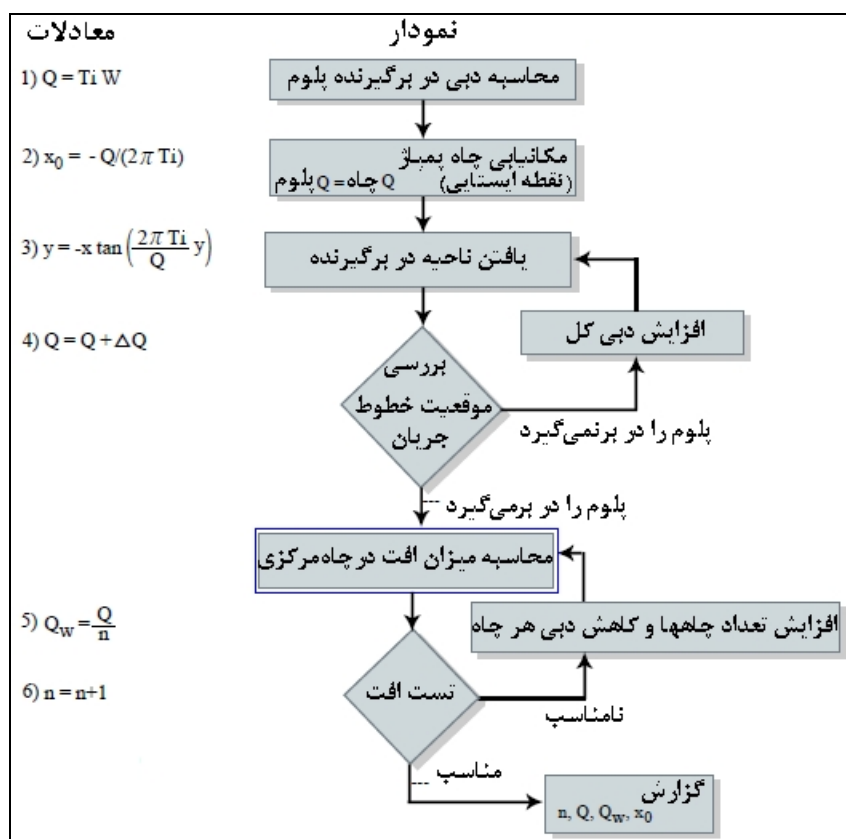
شکل ۳- نقطه ایستایی و ناحیه در برگیرنده هر چاه (MIT Open Course Ware., 2004b)

در اغلب موارد نیاز است که برای یک سیستم پمپاژ چاههای مناسب حفر گردند. در این موارد بایستی آنها طراحی گردند. شکل ۴ مراحل طراحی یک یا چند چاه پمپاژ را نشان می دهد. زمانی که از چند چاه پمپاژ استفاده می شود فاصله بین آنها باید به گونه ای تنظیم شود که هیچ کدام از خطوط جریان از بین دو چاه عبور نکنند. حداکثر این فاصله برای دو، سه و چهار چاه به ترتیب $Q/(\pi BU)$ ، $1/2Q/(\pi BU)$ و $1/2Q/(\pi BU)$ می باشد. طراحی روش پمپ کردن نیز بر حسب نوع آلاینده دارای اهمیت است. مثلاً اگر آلاینده LNAPL باشد سه نوع پمپاژ امکان پذیر است. یکی استفاده از پمپهای ویژه که دقیقاً بر روی سطح قرار گرفته و LNAPL سبکتر از آب را جمع آوری می کنند. روش دیگر پمپاژ با پمپهای با دقت کمتر و ارزانتر و سپس تصفیه و جداسازی مخلوط LNAPL و آب، و در نهایت روش سوم استفاده از دو پمپ یکی در سطح برای جمع آوری LNAPL و دیگری در عمق آب برای جمع آوری مقدار محلول آلاینده در آب. اگر در منطقه از قبل چاههایی حفر شده باشند ولی دهانه آنها برای عبور دو پمپ مناسب نباشد، می توان در هر کدام یک پمپ در سطح یا عمق قرار داد. طراحی چاه پمپاژ نیز بایستی با دقت انجام شود و از به کار بردن مصالح و چیدمان نادرست جهت جلوگیری از گرفتگی به ویژه در چاههای تزریق - در صورت وجود - باید اجتناب گردد. استفاده از چاههای پایش نیز به منظور کنترل دقیق فرآیند پمپاژ ضروری است (Fetter W., 1999; MIT Open Course Ware., 2004b).

چیدمان چاهها مسئله دیگری در طراحی سیستم پمپاژ است. سادکین و بردی انت در سال ۱۹۸۸ به بررسی چیدمان و ترکیب بهینه چاههای پمپاژ پرداختند. در هفت طرح ارائه شده توسط آنها، سه طرح دارای سه جفت چاه پمپاژ و تزریق بودند، دو طرح

¹ Storativity

فقط چاه پمپاژ داشتند و دو طرح دارای یک چاه پمپاژ و بیش از یک چاه تزریق بودند. در انتخاب طرح مناسب برای یک منطقه بایستی توجه زیادی به شرایط محیطی کرد. برای مثال در جایی که گرادیان هیدرولیکی بالاست نیازی به چاه تزریق در بالادست نیست، بلکه تزریق می‌تواند جهت کاهش سرعت انتشار آلودگی در پایین دست انجام گردد. همچنین چاههای تزریق دارای مشکلاتی نیز هستند. برای مثال آنها مستعد گرفتگی هستند و نیاز به نگهداری دارند. از طرف دیگر برخی از ایالتها (مناطق) استانداردهای سختگیرانه‌ای برای آب استفاده شده جهت تزریق دارند، که این مساله مشکلاتی را نیز به همراه دارد (United States Environmental Protection Agency., 1996). (Fetter W., 1999).



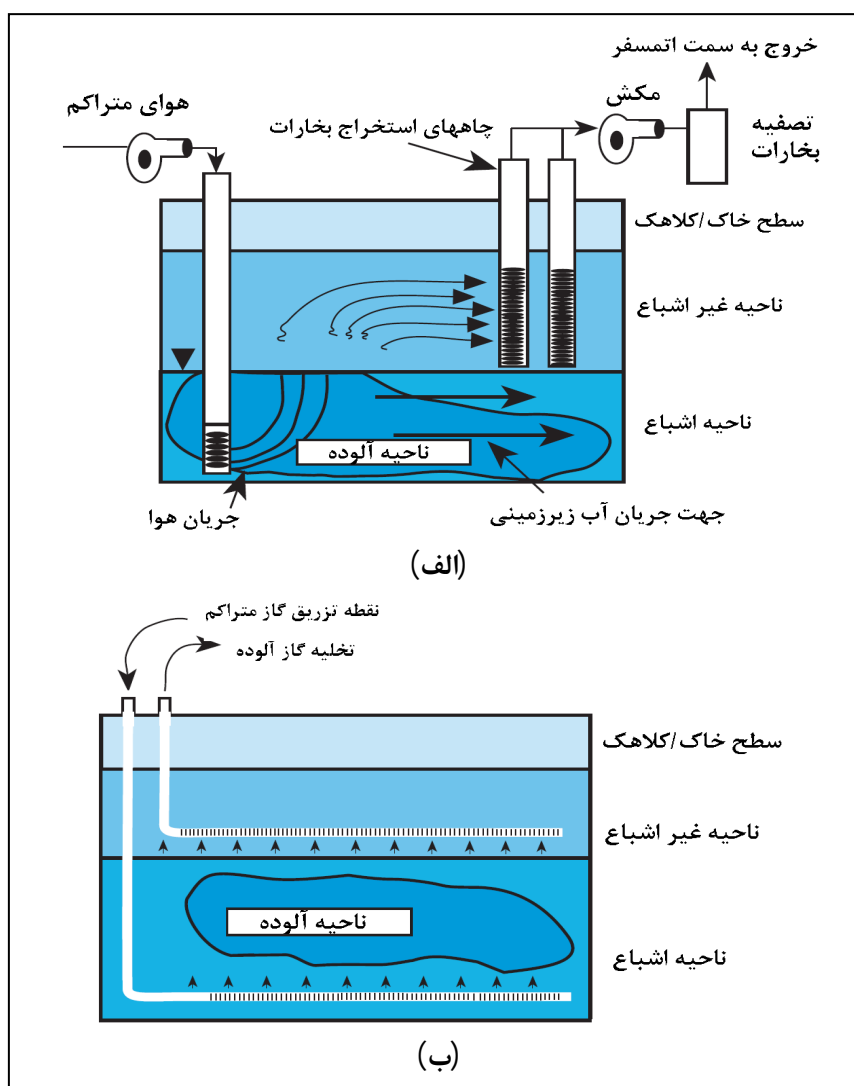
شکل ۴- مراحل طراحی یک یا چند چاه پمپاژ (MIT Open Course Ware., 2004b)

۲-۳- ارتقاء

چندین روش برای ارتقاء سیستم وجود دارد، که می‌توان آنها به: (۱) استفاده از ترانشه‌ها یا چاههای افقی، (۲) کنترل و تصفیه ناحیه غیر اشباع، (۳) روشهای فیزیکی و شیمیایی و (۴) روشهای بیولوژیکی تقسیم کرد. شکل ۵ نشان دهنده استفاده از چاههای افقی و قائم با استفاده از تزریق هوای فشرده برای خروج گاز آلوده است (United States Environmental Protection Agency., 1996). پخش هوا^۱ هم در ناحیه اشباع و هم در ناحیه غیر اشباع می‌تواند بکار رود (Soga, K. et al., 2004). استفاده از چاههای افقی زمانی کاربرد دارد که پلوم طویل و در امتداد افق می‌باشد، همچنین معمولاً در زیر ساختمانها و یا در هنگام برخورد با لایه‌های دارای شکستگی چاه افقی حفر می‌شود. استفاده از چاههای عمودی متداول‌ترین شیوه است و پس از آن حفر ترانشه

¹ Air sparging

قرار دارد. تا عمق حدود ۶ متر حفر ترانشه در مقایسه با چاه به ویژه در خاکهای با نفوذپذیری پایین و سفره های آب ناهمگن توصیه می شود. امکان زهکشی یا تزریق دوغاب در ترانشه ها فراهم است (United States Environmental Protection Agency., 1996). اگر آلودگی شامل موادی مانند بنزین است باید دقت کرد با حفر ترانشه خطر انفجار و آتش سوزی در محیط ایجاد نشود (Fetter W., 1999). کنترل و تصفیه ناحیه غیر اشباع شامل کلاهک گذاری به منظور کاهش نفوذ باران، حفاری جهت رفع آلودگی های خاک، استخراج بخارات خاک^۱ و استفاده از تکنولوژی های حرارتی به منظور افزایش حرکت پذیری مواد فرار می باشد (United States Environmental Protection Agency., 1996).



شکل ۵- جمع آوری بخارات با استفاده از چاههای الف) قائم و ب) افقی (United States Environmental Protection Agency., 1996)

روشهای فیزیکی و شیمیایی می توانند با افزایش حرکت پذیری و یا تصفیه مواد در پاکسازی منطقه موثر باشند. پخش هوا، شکستگی های القایی و روشهای حرارتی همگی جزو روشهای فیزیکی هستند. شستن خاک با فشار آب^۲ با استفاده از مواد فعال

¹ Soil Vapor Extraction (SVE)

² Soil flushing

سطحی^۱ و کمک حلالها^۲ به ویژه برای NAPLها و یا استفاده از اکسید کننده‌ها در محل از جمله روشهای شیمیایی هستند (United States Environmental Protection Agency., 1996). استفاده از روشهای مختلف مانند پخش مواد سبک کننده برای پایدار یا سبک کردن مواد DNAPL معمولا کاربرد دارد (Fetter W., 1999; Yan. Y.L. et al., 2011). تزریق مواد مغذی به منظور تصفیه بیولوژیکی از دو طریق چاه تزریق با پخش کننده و گالری تزریق می‌تواند انجام گردد. در روشهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب استخراج شده از چاه پمپاژ بایستی جهت آنالیز، تصفیه و استفاده به طرز مناسبی مدیریت گردد. سایر روشهای جایگزین سیستم‌های پمپاژ و تصفیه شامل زیست پالائی ذاتی^۳ و موانع درجای فعال^۴ می‌باشند. در مورد موانع درجای فعال نحوه اجرا می‌تواند به صورت یک دیوار یا دیوارهایی به شکل قیف و دروازه^۵ هر یک دارای نفوذپذیری و مواد لازم جهت تصفیه به منظور رفع آلودگی باشد (United States Environmental Protection Agency., 1996).

۳- نتیجه گیری

با توجه به اینکه بنا بر اطلاعات ما تاکنون مطالعه‌ای در ایران در زمینه توضیح اصول روش پمپاژ و تصفیه به ویژه در مقالات کنفرانسی انجام نشده است، بنابراین توجه به سیستم‌های پمپاژ و تصفیه - به عنوان پر کاربردترین روش پاکسازی - و اصول حاکم بر آن جهت مدیریت، طراحی و ارتقاء امری بدیهی به نظر می‌رسد. مقاله حاضر نمودارهایی را جهت طراحی و مدیریت بهتر این سیستم‌ها ارائه می‌نماید. سپس وارد جزئیات طراحی چاههای پمپاژ و تزریق شده و در نهایت راهکارهایی را جهت بهبود راندمان سیستم در محل تصفیه معرفی می‌کند. همچنین در این مقاله تاکید بر شناسایی محیط و ماده آلاینده و روشهای پاکسازی آلودگی می‌باشد، زیرا همانطور که بحث شد حالت بهینه کلی برای همه مسائل، هم در طراحی و هم در تصفیه وجود ندارد و شرایط حاکم بر مساله و ملاحظات اقتصادی راه‌حلهای ارائه شده را با محدودیت مواجه می‌سازند.

منابع

- American Petroleum Institute. (2003). "Groundwater Remediation Strategies Tool", http://www.api.org/ehs/groundwater/upload/4730_final.pdf /Access Date 4/2013.
- Fetter, W. (1999). "Contaminant hydrogeology". Ch. nine, pp. 429-486, Prentice-Hall, New Jersey.
- MIT Open Course Ware. (2004a). "Lecture 4: multi-phase flow in porous media", <http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-34-waste-containment-and-remediation-technology-spring-2004/lecture-notes/lecture04.pdf> /Access Date 4/2013.
- MIT Open Course Ware. (2004b). "Lecture 9: Pump-and-treat systems", 2004, <http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-34-waste-containment-and-remediation-technology-spring-2004/lecture-notes/lecture09.pdf> /Access Date 4/2013.
- Sara, M.N. (2003). "Site Assessment and remediation handbook", CRC Press, Illinois.
- Soga, K, Page. J.W.E, Illangasekare. T.H. (2004). "A review of NAPL source zone remediation efficiency and the mass flux approach", Journal of hazardous materials, Vol. 110, pp.13- 27.
- Suthersan, S.S. (1996). "Remediation Engineering: design Concepts". Ch. eleven, pp. 265-300, CRC Press, Pennsylvania.
- United States Environmental Protection Agency. (1994). "Methods for monitoring pump-and-treat performance", <http://www.epa.gov/superfund/policy/remedy/pdfs/600r-94123-s.pdf> /Access Date 4/2013.
- United States Environmental Protection Agency. (1996). "Pump-and-treat ground-water remediation: a guide for decision makers and practitioners", <http://www.qedenv.com/files/Introduction%20to%20Pump%20&%20Treat%20Remediation.pdf> /Access Date 4/2013.
- United States Environmental Protection Agency. (2005). "Cost-effective design of pump and treat systems", <http://www.epa.gov/superfund/cleanup/postconstruction/ptdesign.pdf> /Access Date 4/2013.
- Voudrias. E.A. (2001). "Pump-and-treat remediation of groundwater contaminated by hazardous waste: can it really be achieved?", Global nest journal, Vol. 3, pp.1- 10.
- Yan. Y.L, Deng. Q, He. F, Zhang. X.Q, Liu. Y.P. (2011). "Remediation of DNAPL-contaminated aquifers using density modification method with colloidal liquid aphrons, Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects", Vol. 385, pp. 219- 228.

¹ Surfactants

² Cosolvents

³ Intrinsic bioremediation

⁴ In situ reactive barriers

⁵ Funnel-and-gate