فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۲۵، تابستان ۹۲

منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی و روش‌های احیا

افسانه شهبازی[1*]

a_shahbazi@sbu.ac.ir

فرزادمهرجو[2]

چکیده

آب‌های زیرزمینی به آب‌هایی گفته می‌شود که در لایه‌های آبدار و اشباع زیرزمین تجمع پیدا کرده است. یکی از منابع مهم تأمین آب در همه کشورهای دنیا محسوب می‌گردند و استفاده از آن‌ها در آبیاری کشاورزی و مصارف شهری و صنعتی رو به افزایش است. استفاده بیش از حد از آب های زیرزمینی و ورود آلاینده‌ها به این منابع از طریق زباله‌های جامد شهری و صنعتی، هیدروکربن‌های نفتی، آلودگی ناشی از فلزات سنگین مانند آرسنیک، زباله‌های رادیواکتیو و نیترات مشکلات فراوانی را برای این منابع به وجود آورده است. لذا روش‌های متعددی برای احیاء آلودگی آب‌های زیرزمینی وجود دارد که می‌توان به روش‌هایی از جمله مقابله با نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی، استفاده از نانو ذرات آهن برای تصفیه آب‌های زیرزمینی، پاکسازی بیولوژیک آب‌های زیرزمینی آلوده به هیدروکربن‌های نفتی، روش‌های شبیه‌سازی از جمله شبیه‌سازی روش‌های پمپاژ- تصفیه و هوادهی در احیای محلی آب‌های زیرزمینی آلوده اشاره کرد. در بررسی نتیجه گیری از این روش‌ها فناوری نانو علاوه بر میزان کارایی خوبی که می‌تواند داشته باشد، هزینه تامین آب آشامیدنی از منابع آب زیرزمینی را نیز به حداقل می‌رساند. و بهترین مکان برای دفن مواد زاید برای جلوگیری از نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی مکان‌هایی هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند.

کلمات کلیدی: آب‌های زیرزمینی، آلاینده‌ها، روش‌های احیاء، فناوری نانو.

۱- استادیار پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران*(مسئول مکاتبات).

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به آب‌هایی گفته می‌شود که در لایه‌های آبدار و اشباع زیر زمین تجمع پیدا کرده است. این آب‌ها فقط حدود چهار درصد از مجموعه آب‌هایی را که فعالانه در چرخه آب‌شناختی دخالت دارند و حدود چهار میلیون متر مکعب از ذخایر آب جهان را تشکیل می‌دهند. آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب در همه کشورهای دنیا محسوب می‌گردند و استفاده از آن‌ها چه در آبیاری کشاورزی و چه در مصارف شهری و صنعتی رو به افزایش است (۱). آب‌های زیرزمینی بخشی از آب زیرسطحی است که به طور کامل بخشی از زمین را اشغال و به یک حفره تحت فشار بیشتری از فشار اتمسفری جریان می‌یابد (۲). استفاده بیش از حد از منابع طبیعی و تولید فراوان محصولات زاید در جامعه مدرن، غالباً آب‌های زیرزمینی را مورد تهدید قرار داده و سبب آلودگی‌های زیادی می‌گردد. اگر محیط زیست این منابع آلوده شود، به علت اینکه حرکت آب‌های زیرزمینی بسیار کند می‌باشد. بعد از شروع آلودگی، باید سال‌ها بگذرد تا آب تحت تأثیر قرار گرفته و آلودگی در چاهی ظاهر شود. از بین بردن آلودگی یک آبخانه، زمان بر و مشکل بوده و هرگز نمی‌توان آن را بطور کامل انجام داد. بر این اساس سال‌های زیادی طول می‌کشد تا یک لایه آبدار آلوده شده، پس از حذف منبع آلودگی به حالت نخستین برگردد، و اگر اقدام جدی در این خصوص به عمل نیاید کیفیت آب‌های زیرزمینی روز به روز بدتر خواهد شد (۳). شناسایی، مطالعه و مدیریت آب‌های زیرزمینی اهمیت دارد و کیفیت آب‌های زیرزمینی سلامت جامعه و وضعیت اقتصادی-اجتماعی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. فرآیند توسعه کشورها از جمله ایران، مسایل گسترده‌ای از آلودگی آب را ایجاد کرده است و این مسئله موقعی اهمیت خود را نشان می‌دهد که بدانیم بیش از ۵۲٪ از مصرف آب کشور به آب‌های زیرزمینی متکی است (۱). در زمینه بررسی آلودگی آب‌های زیرزمینی فاضلی و همکاران در سال ۱۳۹۰به بررسی توزیع زمانی و مکانی آلودگی منابع آب زیرزمینی دشت زیدون به نیترات توسط فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای ازته پرداختند (۴). ناصری و همکاران در سال ۱۳۹۰ آلودگی آب-های زیرزمینی ناشی از آلاینده‌های نفتی در منطقه صنعتی ری (جنوب تهران) را مورد بررسی قرار دادند (۵). Lapwort و همکاران نیز در تحقیقی در سال ۲۰۱۲ منابع، سرنوشت و وقوع آلاینده‌های آلی نو ظهور در آب‌های زیرزمینی را نشان دادند (6). zhao و Pei در سال ۲۰۱۲ در چین ارزیابی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط آفت‌کش‌ها را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ارزیابی ریسک آلودگی آب‌های زیرزمینی یک ابزار ضروری برای حفاظت از این منابع، مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده از سرزمین است (۷). لذا هدف از این مقاله شناخت منابع آب‌های زیرزمینی و عواملی که باعث آلودگی این منابع می‌شوند و همچنین معرفی روش‌هایی که برای کاهش آلودگی این منابع وجود دارند.

مخاطرات و منابع آلوده ساز آب‌های زیرزمینی

زباله‌های جامد شهری و صنعتی

زباله‌های جامد شهری و صنعتی دفن شده در زمین خود حاوی درصد بالایی آب هستند، چنانچه آب‌های سطحی نیز به درون آن نفوذ یابد در اثر فعل و انفعالات شیمیایی و بیولوژیکی که در درون لندفیل رخ می‌دهد، شیرابه آلوده‌ای تولید می‌گردد که حاوی انواع عناصر سمی می‌باشد. طبیعت و قدرت آلایندگی این شیرابه به ترکیب مواد زاید جامد، مدت زمان تماس زایدات با آب و حجم آن بستگی دارد. نفوذ این شیرابه آلوده، می‌تواند تهدیدی جدی برای آلودگی آب‌های زیرزمینی و خاک مناطق اطراف لندفیل بشمار آید. شیرابه زباله حاوی ترکیبات و آلاینده‌های گوناگون از جمله فلزات سنگین می‌باشد. بعضی از ترکیبات سمی همانند آرسنیک، سیانید و کروم موجود در این زباله‌ها ممکن است در آب‌های زیرزمینی در غلظت‌هایی یافت شوند که این آب‌ها را جهت مصارف آشامیدن و آبیاری نامطلوب کنند (۱).

آرسنیک

آرسنیک (As) با عدد اتمی ۳۳ سومین عنصر گروه پنجم جدول تناوبی می‌باشد و از نظر فراوانی بیستمین عنصر در پوسته زمین، چهاردهمین عنصر در داخل آب و همچنین در بدن انسان چهاردهمین عنصر فراوان است. کشف آلـــودگی آب‌های زیرزمینی به آرسنیک در کشورهای مختلف از جمله آرژانتین، شیلی، بنگلادش، چین، امریکا، هندوستان و اکنون در پاکستان و ایران نشان می‌دهد که این مسئله یک مشکل جهانی است و تمامی آب‌هایی که برای آشامیدن به کار می‌روند باید از نظر آلودگی به آرسنیک مورد آزمایش قرار گیرند. آرسنیک به صورت آلی بیشتر در بدن جانوران دریایی به نام آرسنوبنتائین ذخیره می‌شود و کانی‌های سولفیدی از لحاظ طبیعی در رده اول قرار دارند. آرسنیک به طور طبیعی در آب های زیرزمینی وجود دارد که آلودگی آب‌های زیرزمینی به وسیله آرسنیک با منشا طبیعی در بیش از ۷۰ کشور دنیا گزارش شده است که در حدود ۱۵۰ میلیون نفر فقط در جنوب غرب آسیا در معرض آلودگی شدید آب به وسیله این عنصر هستند. آرسنیک محلول در آب‌های زیرزمینی در فصل‌های مختلف متفاوت می‌باشد و به عواملی از قبیل دما، pH، سطح ایستابی و جنس سازندهای در برگیرنده بستگی دارد. آلودگی ناشی از آرسنیک در آب‌های زیرزمینی می‌تواند خطر بزرگی باشد، زیرا آرسنیک در آب‌های زیرزمینی از بین نمی‌رود بلکه از یک فرم به فرم دیگری تبدیل می‌شود. سفره‌های آب زیرزمینی اغلب مقدار زیادی مواد را در خود حل می‌کنند. در نتیجه آب‌های زیرزمینی به طور طبیعی آسیب‌پذیر می‌باشند. آرسنیک به راحتی در داخل آب حل می‌شود و نسبت به سایر عناصر دیگر متحرک‌تر می‌باشد. آب‌های سطحی و زیرزمینی مناسب‌ترین شرایط را برای جا به جایی و حرکت آرسنیک دارند. اگر سازند در برگیرنده سفره، دارای آرسنیک باشد به راحتی باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌گردد (8).

هیدروکربن‌های نفتی

این ماده ممکن است حتی آب‌های زیرزمینی را برای همیشه غیر قابل استفاده نماید و در امر پمپاژ بعلت حل پوشش‌های قیری مشکلات جدی ایجاد نماید. میزان نفوذ مواد نفتی به خاک و در نتیجه آب زیرزمینی، به ویژگی‌های خاک و نیز ماهیت و کمیت مواد آلاینده بستگی دارد. نفوذ در خاک تا ورود کامل آلاینده نفتی و یا برخورد به موانع غیر قابل نفوذ، ادامه خواهد داشت. در اثر برخورد با موانع مذکور، آلاینده‌های نفتی دارای حرکت افقی بین سطوح خواهند بود. این حرکت منجر به گسترش آلاینده‌ها در ابعاد وسیع‌تری می‌شود. در صورت رسیدن آلاینده نفتی به آب‌های زیرزمینی ممکن است توده‌ای عدسی گونه از مواد نفتی تشکیل شود. در نهایت، توده مذکور در خاک‌های بالای سطح آب زیرزمینی پراکنده شده و جریان آب زیرزمینی نیز روند گسترش آن را تشدید می‌نماید (شکل ۱). پس از نشت مواد نفتی اغلب هیدروکربن‌های با زنجیره بلند توسط باکتری‌های خاک تجزیه شده و در تقابل با آب، مواد نفتی با قابلیت حلالیت زیاد در آب حل شده و ستونی از آلودگی را تشکیل می‌دهند. ترکیباتی که قابل حل نیستند به صورت آزاد بر روی سطح ایستابی قرار می‌گیرند. از جمله این هیدروکربن‌ها می‌توان به بنزن، نفتالن، تولوئن، کرایسن و ... اشاره کرد (5).

شکل ۱- نمایی از نحوه توزیع و رفتار مواد نفتی زیر سطح زمین

نیترات

یکی از شاخص‌های مهم آلودگی منابع آب زیرزمینی حضور نیترات می‌باشد که بر اثر کاربرد انواع کودهای شیمیایی، آلی (دامی و انسانی)، تجزیه گیاهان و دیگر باقی مانده‌های آلی در خاک و تخلیه نامناسب فاضلاب به وجود می‌آید. گاهی اوقات باران این عنصر کودی را به طرف آب‌های سطحی و زیرزمینی حرکت می‌دهد. بسیاری از فرآیندها، موجب تشدید آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات می‌شوند. از آنجا که کودهای آلی حاوی مقادیری از ترکیبات محلول مانند نیترات می‌باشند، این ترکیبات از طریق بارندگی یا آبیاری وارد محلول خاک گردیده و سرانجام وارد آب های زیرزمینی می‌شوند (۹). از سال ۱۹۷۰ آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات به یک مشکل عمده محیط زیستی تبدیل شده است که در بسیاری از نقاط جهان گزارش آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات وجود دارد (۱۰). نیترات یک ترکیبی از نیتروژن است که به طور طبیعی در غلظت متوسط در بسیاری از محیط‌ها وجود دارد. فعالیت‌های شیمیایی به دلیل استفاده از کودهای ازت‌دار، دفع مواد زاید جامد، نشت از شبکه دفع فاضلاب، شیرابه محل‌های دفن زباله یا فاضلاب و محل‌های دفن زغال‌سنگ از جمله منابعی هستند که می‌توانند موجب افزایش غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی شوند (۱۱).

زباله‌های رادیواکتیو

در فرآیند تولید انرژی هسته‌ای مقدار زیادی زباله رادیواکتیوی بوجود می‌آید. غالباً ایزوتوپ‌های رادیواکتیو از گازهای نجیب، کریپتون هستند. تریتیوم که ایزوتوپی از هیدروژن است نیز به صورت گاز، عمدتا به صورت بخار آب تخلیه می‌شود. تریتیوم به صورت بخش هیدروژنی مولکول آب در زنجیرهای زیست‌شناختی مواد غذایی وارد می‌شود. ایزوتوپ‌های رادیواکتیو در زباله‌های مایع، معمولا از طریق بارندگی به صورت جامد در می‌آید و انبار می‌شود. اگر این زباله‌ها در زمین در گودال‌های بدون آستر، بدون آنکه در محفظه‌های خاص باشند دفن شوند در طی چند قرن بعد آب‌های زیرزمینی این مواد رادیواکتیو را پراکنده خواهند کرد (۱۲). علاوه بر زباله‌های تولید شده در بخش هسته‌ای می‌توان به مواد زاید جامد تولید شده در صنایع، تحقیق و توسعه در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های ملی و بیمارستان‌ها (جایی که مواد رادیواکتیو برا تشخیص و درمان‌های متعدد استفاده می شود) اشاره کرد (۱۳). معدن اورانیوم، صنعت برق هسته‌ای و برخی از تجهیزات پزشکی و نظامی فعالیت‌های گسترده‌ای از طیف تولید رادیونوکلوییدی هستند. عملیات عادی از تاسیسات هسته‌ای و همچنین حوادث هسته‌ای یک تهدید جدی برای آب زیرزمینی می‌باشند. استخراج اورانیوم، تصفیه، غنی سازی، بازفرآوری و همچنین دفع زباله‌های رادیواکتیو آن دسته از فعالیت‌هایی

هستند که خطر بالقوه‌ای برای کیفیت آب‌های زیرزمینی می-باشند (۱۴).

راه‌های مقابله با آلودگی آب‌های زیرزمینی

مقابله با شیرابه آب‌های زیرزمینی

قبل از انتخاب قطعی یک مکان برای دفن زباله‌ها، وضعیت آب-های زیرزمینی و نوع استفاده از آب‌های زیرزمینی منطقه نیز مشخص گردد. مکانی که برای دفن زباله‌ها انتخاب می‌شود، باید از لحاظ توپوگرافی و مطالعات زمین‌شناسی، هیدرولوژی، زه کشی طبیعی منطقه، خاک پوششی، وضعیت دسترسی به محل، مکان‌سنجی و... مشخص گردد. در صورتی که لازم است از سفره های زیرزمینی برای مصارف شرب و شستشو استفاده شود، باید دقت کافی به خرج داد تا از تولید شیرابه جلوگیری به عمل آید. در رابطه با آلودگی آب‌های زیرزمینی و امکان نفوذ شیرابه به داخل آن‌ها همواره باید قدرت تصفیه‌پذیری و رفع آلودگی در هنگام حرکت شیرابه از لایه‌های مختلف زمین را مدنظر قرار داد. به دلیل جریان آهسته آب‌های زیرزمینی، قدرت خود پالایی آن‌ها به مراتب کمتر از آب‌های سطحی است. بهترین مکان آن‌هایی هستند که عوامل طبیعی در آن محل‌ها شرایط خوبی را برای دفن مواد زاید به وجود آورده باشند. که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند. در چنین مکان‌هایی عمدتا به دلیل وجود زمین کافی و پایین بودن عمق آب‌های زیرزمینی شرایط دفن نسبتا ایمن می‌باشند. با توجه به اینکه در مناطق مرطوب زباله‌ها در نزدیکی سطح آب‌های زیرزمینی دفن می‌شود، حتی علی‌رغم وجود خاک نسبتا غیرقابل نفوذ رس و سیلت، هرگونه شیرابه تولیدی در محل دفن تجمع یافته و در اثر فیلتراسیون طبیعی و تبادل یونی بین خاک رس و شیرابه، به آب‌های زیرزمینی وارد می‌گردد (15).

استفاده از نانو ذرات آهن برای تصفیه آب‌های زیرزمینی

محققان ایرانی یک شرکت دانش‌بنیان موفق به بومی‌کردن فناوری تصفیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از نانو ذرات آهن در کشور شدند. نانو ذرات آهن خالص یا «زیرو ولنت» از یکسو به دلیل برخورداری از سطح فعال و خاصیت کاهندگی شیمیایی بسیار بالا و از سوی دیگر به دلیل اندازه بسیار کوچکشان که امکان نفوذ و مهاجرت مسافت‌های طولانی در اعماق خاک را فراهم می‌آورد، برای حذف آلودگی آب‌های زیرزمینی بسیار مؤثرند. اگر این ذرات در یک مایع توزیع و پایدار شوند، با تزریق این محصول در یک نقطه از زمین (از طریق چاهک‌های ایجاد شده به همین منظور) یک منطقه مؤثر برای تصفیه آب ایجاد می‌شود. چاهک‌های مزبور را می‌توان در فواصل مشخصی از چاه یا قنات برداشت آب به نحوی تعبیه کرد که محل برداشت آب را احاطه کرده و مانند یک سپر مانع از ورود آلودگی به داخل چاه شود. این نانو ذرات قابلیت حذف آلودگی‌هایی از قبیل مواد آلی کلرینه، یون‌های فلزی سنگین، رنگ‌های آلی و یون‌های غیرآلی را دار است. مزیت اصلی استفاده از این روش آن است که نانو ذرات آهن، عمل تصفیه و حذف آلودگی‌های موجود در آب را در عمق زمین انجام می‌دهند و دیگر نیازی به عملیات استخراج و سپس تصفیه آن در تصفیه خانه‌ها نخواهد بود. به همین دلیل هزینه تامین آب بهداشتی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند (16).

پاکسازی بیولوژیک آب‌های زیرزمینی‌آلوده به هیدروکربن‌های نفتی

روش‌های تصفیه بیولوژیک ابزار مناسبی برای پاکسازی محیط از وجود هیدروکربن‌های نفتی بوده و دارای اثر بخشی خوبی هستند. استفاده از فرآیندهای بیولوژیک در محل سایت آلوده، فرآیند پاکسازی سایت کامل‌تر، سریع‌تر، با راندمان بیشتر و اقتصادی‌تر انجام می‌شود. برای داشتن یک تصفیه بیولوژیکی موفق، مناسب و کارآمد در محل، وجود شرایط محیطی مناسب و اپتیمم در سایت آلوده، میکروب‌های مناسب، اکسیژن و مواد مغذی مورد نیاز در منطقه آلوده ضروری است. امروزه در تحقیقات بیشتر به استفاده از باکتری‌های اویلفیل و یا میکروب‌هایی که نفت مصرف می‌کنند و محیط را از وجود ترکیبات نفتی پاکسازی می‌کنند اشاره می‌شود. مانند باکتری‌های تجزیه‌کننده هوازی شامل سودوموناس‌ها، اسینتو باکترها، باسیلوس، آرتروباکتر و نوکاردیا متمرکز شده‌اند که در

مطالعات مختلف شناسائی شده‌اند (17). از جمله روش‌های پاکسازی بیولوژیک می‌توان به کاهش یا تجزیه طبیعی، پاکسازی بیولوژیک در محل سایت آلوده اشاره کرد که در زیر به شرح آن‌ها خواهیم پرداخت.

الف: کاهش یا تجزیه طبیعی: بعد از ورود هیدروکربن‌های نفتی به محیط، بلافاصله بوسیله عوامل فیزیکی، شیمیائی و بیولوژیکی تحت تاثیر قرار می‌گیرند و منجر به بروز تغییراتی در آن آلاینده می‌شوند. فرآیندهای کاهش طبیعی که منجر به تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌ها در خاک می‌شوند، شامل فرآیندهای فیزیکی (مثل فراریت، رقیق شدن، جذب) و فرآیندهای تجزیه بیولوژیکی آلاینده‌ها می باشند. یک تکنولوژی مناسب برای تجزیه آلاینده‌ها و پالایش آب‌های زیرزمینی، استفاده از میکروارگانیسم‌های فعال موجود در بستر لایه آبدار و میکروفلور فعال ایندوژنوس می‌باشد، که بلافاصله به مقابله با ترکیبات ناخواسته پرداخته و با یک خود پالایی طبیعی، اقدام به تخریب و تجزیه آلاینده‌های وارد شده به لایه آبدار می‌نمایند (18). بیشترین فرآیند پاکسازی بیولوژیک طبیعی مربوط به پاکسازی لایه‌های آبدار از وجود هیدروکربن‌های نفتی ناشی از نشت مخازن زیرزمینی بنزین بوده است که منجر به حضور BTEX در محیط شده‌اند (17).

ب: پاکسازی بیولوژیک در محل سایت آلوده: پاکسازی بیولوژیک در محل به معنای بالا بردن قابلیت پاکسازی بیولوژیک در همان مکان حضور آلاینده است. یک تکنولوژی مناسب جهت تصفیه آب‌های زیرزمینی آلوده به هیدروکربن های نفتی است. آلاینده‌های آلی که در لایه‌های آبدار یافت می شوند می‌توانند در آب حل شوند، یا به بستر لایه آبدار بچسبند و یا ممکن است به صورت یک فاز آزاد و یا به صورت یک فاز مایع جدا (مثل ترکیباتی که دانسیته بالاتری دارند) باقی بمانند و در آب حل نشوند. کاربرد موفق اینگونه فرآیندهای بیولوژیک وابسته به ایجاد یک شرایط اپتیمم محیطی موثر جهت حذف آلاینده‌ها، از قبیل وجود همزمان میکروب‌ها و اکسیژن و مواد مغذی لازم در لایه آبدار آلوده می‌باشد. تحت شرایط فوق، این تکنولوژی می‌تواند آلاینده‌های آلی لایه‌های زیرزمینی را، بدون هزینه‌های حفاری و جابجایی زیاد خاک در محل، نابود کند. همچنین این روش، نشت آلاینده‌های آلی فرار به هوا را به حداقل می‌رساند (18). این فرآیند در تصفیه لایه‌های زیرزمینی آلوده به ترکیبات آلی نظیر فنول‌های هالوژنه، آروماتیک‌های غیر هالوژنه، هیدروکربن‌های پلی آروماتیک و ترکیبات آلی بسیار موثر است (19).

شبیه سازی روش‌های پمپاژ- تصفیه و هوادهی در احیای محلی آب‌های زیرزمینی آلوده

درطی سال‌های اخیر امکان استفاده مشترک و همزمان روش-های پمپاژ- تصفیه و هوادهی برای احیای آبخوان‌های آلوده به مواد آلی فرار مطرح شده است. استفاده مشترک از این دو روش امکان ارایه طرح مناسب‌تری را در احیاء آبخوان‌های آلـــوده می‌دهد. 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 چنان گسترش نیافته است. آبخوان‌های آلوده به طیف وسیعی از آلاینده‌ها، از موادآلی فرار 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 فرار است. هوای تزریق شده باعث جدا شدن مواد آلی فرار از آب شده و پس از رسیدن به ناحیه تهویه خاک توسط سیستم‌های مکش، جمع آوری و تصفیه می گردد. فرضیاتی که در طی عمل شبیه‌سازی باید لحاظ شود عبارتند از: شرایط هم دما در کل دامنه شبیه‌سازی، غیر محصور بودن آبخوان، اختلاط کامل بین آب، هوا و مواد آلی فرار، مقدم بودن مکانیزم جدا سازی گاز از مایع نسبت به تجزیه بیولوژیکی در روش هوادهی، وجود سیستم مکش گازهای خروجی در ناحیه تهویه خاک، محلول بودن آلاینده در آب و عدم وجود فازهای مایع آب گریز (20).

نتیجه گیری

بر مبنای مطالعات صورت گرفته نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱. آب‌های زیرزمینی یکی از منابع مهم تأمین آب در همه کشورهای دنیا محسوب می‌گردند و استفاده از آن‌ها چه در آبیاری کشاورزی و چه در مصارف شهری و صنعتی رو به افزایش است که می‌تواند تهدیدی برای این منابع باشد.

۲. به علت کند بودن حرکت آب‌های زیرزمینی اگر این منابع آلوده شوند، باید سال‌ها بگذرد تا آب تحت تأثیر قرار گرفته و آلودگی در چاهی ظاهر شود. بر این اساس سال‌های زیادی طول می‌کشد تا یک لایه آبدار آلوده شده، پس از حذف منبع آلودگی به حالت نخستین برگردد، و اگر اقدام جدی در این خصوص به عمل نیاید کیفیت آب‌های زیرزمینی روز به روز بدتر خواهد شد.

۳. فلزات سنگین از قبیل آرسنیک مهم‌ترین آلاینده‌های منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شوند. از خصوصیات این فلزات می‌توان به پایداری آن‌ها اشاره کرد که نمی‌توانند مانند اغلب مواد آلی از طریق فرآیندهای شیمیایی و زیستی در طبیعت تجزیه شوند.

۴. به هنگام پمپاژ هیدروکربن‌های نفتی از قبیل بنزن، نفتالن، تولوئن و کرایسن به آب‌های زیرزمینی به علت حل شدن پوشش‌های قیری می توانند این منابع را برای همیشه غیر قابل استفاده کرد.

۵. آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات یک مشکل گسترده برای اقتصاد، اکوسیستم و سلامتی انسان است که امروزه به عنوان یک مشکل عمده محیط زیستی تبدیل شده است و در بسیاری از نقاط جهان گزارش آلودگی آب‌های زیرزمینی به نیترات وجود دارد.

۶. از جمله روش‌های نوینی برای کاهش آلودگی آب-های زیرزمینی می‌توان فناوری نانو را اشاره کرد. که علاوه بر میزان کارایی خوبی که دارد، هزینه تامین آب آشامیدنی از منابع آب زیرزمینی را نیز به حداقل می‌رساند.

۷. پاکسازی بیولوژیک در محل در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی روشی ارزان و کم هزینه‌تر است و تجهیزات ساده ای لازم دارد. موفقیت اجرای این روش مستلزم این است که لایه‌های آبدار قابل نفوذ و یکنواخت باشند، نشت آلاینده اصلی از یک منبع مشخص باشد و شیب آب زیرزمینی کم باشد.

۸. بهترین مکان برای دفن مواد زاید برای جلوگیری از نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی مکان‌هایی هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند. در چنین مکان‌هایی عمدتا به دلیل وجود زمین کافی و پایین بودن عمق آب‌های زیرزمینی شرایط دفن نسبتاً ایمن است.

۹. در روش شبیه سازی پمپاژ- تصفیه و هوادهی، روش پمپاژ- تصفیه مبتنی بر حفر چاه‌هایی در آبخوان‌های آلوده و پمپاژ آب آلوده به سطح زمین و تصفیه آن می‌باشد.

منابع

۱. رضایی، رضا و همکاران، ۱۳۸۹، ارزیابی آلودگی شیمیایی منابع آب زیرزمینی مناطق پایین دست محل دفن زباله شهر سنندج، مجله علمی دانشگاه علوم پزشکی کردستان، دوره پانزدهم.ص۸۹-۹۸.

2. Al Sabahi, E., Abdul Rahim، S., Wan Zuhairi, W.Y., 2009. The Characteristics of leachate and groundwater Pollution at Municipal Solid Waste Landfill of Ibb City, Yemen. American Journal of Environmental Sciences، Vol 5 ،p. 257.

3. Babaei Bazkiyaei, Z., Shariati, F., oshaksaraei, L., Amiri, E., 2013. Evaluation of groundwater quality and its Suitability for Drinking and Agriculture use. International Journal

of Agriculture and Crop Sciences، Vol 5, p. 51.

۴. فاضلی، مریم و همکاران، ۱۳۹۰، بررسی توزیع زمانی و مکانی آلودگی منابع آب زیرزمینی دشت زیدون به نیترات. مجله مهندسی منابع آب، سال چهارم، ص ۵۱-۴۵.

۵. ناصری، حمیدرضا و همکاران، ۱۳۹۰، آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از آلاینده‌های نفتی مطالعه موردی: منطقه صنعتی ری، مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، سال ۲۱، شماره ۸۱، ص۱۱-۲۲.

6. Lapworth, D. J., Baran، N., Stuart, M.E., Ward, R.S., 2012. Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. Environmental Pollution. 163. pp 287-303.

7. Zhao, Y., Pei, Y., 2012. Risk evaluation of groundwater pollution by pesticides in China: a short review. Procedia Environmental Sciences, Vol. 13, pp.1739 – 1747.

۸. ابراهیم پور، صلاح الدین و همکاران، ۱۳۸۹، آلودگی آرسنیک در آب‌های زیرزمینی و اثرات آن بر سلامت انسانی، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، ص۱-۱۴.

۹. نیک عمل لاریجانی، نفیسه و همکاران، ۱۳۹۰، تعیین میزان انتقال نیترات در دو بافت خاک در نتیجه کاربرد کودهای آلی (مرغی، گاوی و لجن فاضلاب). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد 25، شماره۴، ص ۷۰۸-۷۱۷.

10. Jonathan, W., Chrystina, D., 2008. Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes ،water research، Vol.42, pp . 4215–4232.

11. Fernando, T., David، N., 2005. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study, Water Research, Vol 39، pp. 3-16.

12. Environmental Protection Agency, United States of America. http://www.epa.gov.com.

13. Chapman , N., Hooper، A., 2012. The disposal of radioactive wastes underground. Proceedings of the Geologists' Association 123.PP 46–63.

14. Vrab, J., Adams, B., 2008. groundwater early warning monitoring strategy, Published the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization 7, place de Fontenoy, Paris.

۱۵. غیاث الدین، منصور، داویدیان، هارطون، ۱۳۶۵، اثر دفن زباله بر آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه کهریزک و جاجرود، مجله محیط شناسی، سال سیزدهم، شماره ۱۴، ص۸۳-۹۸.

۱۶. زوارئیان، مریم،۱۳۸۹، استفاده از نانو ذرات آهن برای تصفیه آب‌های زیرزمینی. شرکت پیام آوران نانو فناوری آینده نگر.

17. okoh, A. I., Trejo-Hernandez، M.R., 2006 .Review Remediation of petrol hydrocarbon polluted systems: Exploiting the bioremediation strategies. African Journal of Biotechnology, Vol.5, pp. 2520-2525.

18. Kun, Z., Huf، C., Guanghe, L. ،Zhaochang, L., 1998. In Situ Remediation of Petroleum Compounds in Groundwater Aquifer with chlorine Dioxide. Vol.32.pp1471-1480

19. Zittwitz, M., Gerhardt, M., Ringpfeil, M., Practical Experience From Commercical In-Situ Bioremediation In Cases Of Cable Insulating Oil And

Tri- / Perchloroethylene Bioprct GmbH, Rudower Chaussee 29, D-12489 Berlin, Germany.

۲۰. صفوی، حمیدرضا و همکاران، ۱۳۸۴، شبیه سازی روش‌های پمپاژ-تصفیه و هوادهی در احیای محلی آب‌های زیرزمینی آلوده، مجله آب و فاضلاب، شماره ۵۶، ص ۳۰-۳۹.