



معاونت محیط زیست انسانی
دفتر آب و خاک

ضوابط اجرایی دستورالعمل رفع آلودگی خاک

تهیه کنندگان:

دکتر مجید افیونی، گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان
مهندس اردشیر خسروی گروه محیط زیست دانشگاه صنعتی اصفهان

مقدمه

خاک به عنوان یکی از اجزاء مهم محیط زیست، دریافت‌کننده پسماندهای صنعتی و فرآورده‌های کشاورزی است. این مواد به محض ورود به خاک، جزئی از چرخه‌ای می‌گردند که این چرخه صور گوناگون حیات را تحت تاثیر خویش قرار می‌دهد. لذا اطلاع از ماهیت آلاینده‌ها، رفتار شیمیایی آنها در خاک و امکانات قابل استفاده برای مدیریت پاک سازی یا رفع آنها امری الزامی است

رفع آلودگی خاک به معنی کنترل و کاهش مواد آلاینده در خاک به میزانی که هرگونه تغییر در ترکیب شیمیایی و فیزیکی در خاک خاصیت اصلی آن را تغییر ندهد، اطلاق می‌گردد.

هدف

- حذف و یا کاهش اثرات زیست محیطی مواد آلاینده خاک.

- استفاده از سیستم خاک-گیاه برای جذب، کاهش تحرک، و تجزیه آلاینده در خاک است.

دامنه کاربرد

- این دستورالعمل برای خاک در مناطق کشاورزی، صنعتی و معدنی، محل دفن زباله های شهری و صنعتی، لندفیل ها، مراتع و جنگل ها قابل استفاده است.
- خاکی باید پاک سازی و رفع آلودگی شود که غلظت کل مواد آلاینده در آن بیش از غلظت پاک سازی (استاندارد پاک سازی سازمان حفاظت محیط زیست ایران) باشد. استاندارد های پاک سازی برای ۲۰ عنصر معدنی و ۷۰ ماده شیمیایی آلی از طرف سازمان حفاظت محیط زیست کشور برای خاک های اسیدی (pH کمتر از ۷) و خاک های غیر اسیدی (pH بیشتر از ۷) ارایه شده است. بنابراین قبل از انجام پاک سازی باید pH خاک و غلظت آلایندهای مورد نظر طبق روش های زیر تعیین شود:
- برای تعیین pH باید از روش گل اشباع استفاده شود (Klute, 1986).
- غلظت آلاینده ها بر اساس غلظت کل آلاینده بر حسب mg/kg در خاک خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد برای حداقل ۲۴ ساعت است.
- مبنای عمق خاک ۰-۱۵۰ سانتی متر است.
- غلظت کل هریک از مواد معدنی (فلزات آلاینده با روش (Klute, 1986)) تعیین شود.
- غلظت مواد آلی با روش (USEPA, 1996) تعیین شود.
- شناسایی و ارزیابی منطقه و ارزیابی خطر برای آلاینده - مسیر - گیرنده
- یکپارچه سازی اطلاعات ویژگی های آلاینده و ویژگی های خاک سایت
- خاک منطقه برای مطابق با قوانین زیست محیطی از مواد آلاینده پاک سازی شود.

اصطلاحات و تعاریف

آلودگی خاک: به معنی وجود مواد آلاینده در خاک به میزانی که باعث ایجاد اثرات نامطلوب بر انسان و سایر موجودات زنده شده و یا هرگونه تغییر در ترکیب شیمیایی و فیزیکی در خاک به طوری که خاصیت اصلی آن را تغییر دهد، اطلاق می‌گردد. آلودگی خاک موجب می‌شود حیات انسان و گیاه و حتی ماندگاری تاسیسات و ابنیه تحت الشعاع قرار گیرد.

آلاینده: وجود یک ماده در جایی غیر از محیط طبیعی خود و یا غلظتی بیش از غلظت طبیعی به نحوی که باعث ایجاد اثرات نامطلوب بر روی موجودات زنده و یا کاهش کیفیت محیط شو. در مسئله آلودگی خاک آلاینده‌هایی با خواص زیر مد نظر می‌باشند: دارای خواص سمی بوده (مثل برخی فلزات سنگین، PCBs، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای) دارای اثرات نامطلوب بر خواص خاک باشند (مثل نمک‌های سدیم، میزان بالای از هیدروکربن‌های دارای سمیت پایین و سولفور) دارای پتانسیل تحرک در خاک و آسیب به کیفیت آب‌های زیرزمینی باشند (مثل منوکروآمین‌ها، آمین‌ها و برخی نمک‌ها)

محیط پذیرنده: شامل خاک‌های کشاورزی، مراتع و جنگل‌ها و کاربری‌های پارک و تفریحی، مسکونی و تجاری که آلاینده‌ها چه به صورت مایع یا جامد وارد آنها می‌شود.

مواد زاید سمی و خطرناک: هر نوع ماده زاید آلوده‌کننده یا ترکیبی از مواد و یا ضایعاتی که دارای قدرت صدمه و آسیب زیاد به سلامت انسان یا سایر موجودات زنده یا گیاهان بوده یا بر اثر تماس و تکرار دارای عوارض سوء در آنها باشد و قابلیت آلوده ساختن خاک را دارد.

کاربری‌های در نظر گرفته شده خاک در تدوین آیین‌نامه اجرایی رفع آلودگی خاک عبارتند از مسکونی، صنعتی، کشاورزی، پارک/تفریحی، جنگل و مرتع و تجاری.

کاربری :

- مسکونی : شامل شرایط مسکونی است که اغلب مردم را در برگیرد.
- کشاورزی: شامل کلیه زمین‌های کشاورزی و باغات می‌شود.
- جنگل و مرتع : شامل کلیه اراضی مرتعی و جنگلی و کاربردهای مشابه می‌باشد.
- پارک/تفریحی: کاربرد خاک برای پوشش دادن فعالیت‌های ورزشی و تفریحی می‌باشد.
- تجاری: شامل انواع مختلف فعالیت‌های صنعتی، تولیدی، عمرانی، خدماتی و زیربنایی می‌باشد.

- **استاندارد آلودگی خاک:** غلظتی از آلاینده‌های خاک است که در صورتی که مقدار آن آلاینده بیش از حد استاندارد باشد ممکن است باعث ایجاد اثرات سوء بر سلامتی انسان و یا

- سایر موجودات گردد و در صورتی که غلظت واقعی این آلاینده‌ها کمتر و یا معادل مقدار استاندارد پیشنهادی باشد، این مقدار قابل قبول است.
- **استاندارد پاک سازی خاک:** در صورتی که غلظت آلاینده در خاک بیش از حد استاندارد پاک سازی باشد، که در کوتاه مدت باعث ایجاد خطرات غیر قابل قبول برای سلامت انسان، محیط زیست و سایر موجودات زنده گردد، انجام عملیات پاک سازی جهت کاهش آلودگی خاک به پایین تر از حد استاندارد آلودگی خاک الزامی می باشد.
- **ارزیابی خطر:** فرایندی است که احتمال وجود خطر در یک زمینه را مورد بررسی قرار می دهد. ارزیابی خطر زیست محیطی مشخص می کند که برای تعیین احتمال خطرات زیست محیطی که باعث ایجاد آسیب به فرد یا اکوسیستم شود، چه اطلاعاتی باید بررسی شوند. در این گزارش، خطر زیست محیطی شامل آلوده شدن خاک می باشد. فرایند ارزیابی خطر یک فرایند چند مرحله ای است که شامل [۴] :
- **مدل مفهومی**
- مجموعه مشخصات در معرض قرارگیری انسان، سرنوشت آلاینده‌ها و اطلاعات مربوط به انتقال آلاینده در خاک.
- مقایسه مقدار در معرض قرارگیری انسان (مقدار آلودگی موجود) با مقادیر مرجع استاندارد سلامتی.
- ارزیابی خطر برای سلامتی انسان در جایی که میزان دریافت آلودگی، معادل و یا بیش از مقادیر مرجع استاندارد سلامتی است.

روش

الف : تعیین ویژگی های خاک سایت آلوده

ویژگی های خاک منطقه آلوده باید برای به حداقل رسانیدن اثر بر سلامت انسان و محیط زیست به دقت مطالعه شود.

۱- ویژگی های منطقه آلوده:

- شیب و جهت شیب غالب، جهت اصلی جریان روان آب در محل، عمق سفره آب زیر زمینی، تغییرات فصلی آب زیر زمینی، فاصله محل از مناطق مسکونی، منابع آب سطحی، پارک های و محل های عمومی.

۲- نمونه برداری و آنالیز خاک:

- محل مورد نظر بسته به گستره آن باید به واحدهای کوچکتر تقسیم شود و نمونه های خاک از عمق های ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۵۰ و ۵۰-۱۰۰ سانتیمتری برداشت شود. از هر عمق حدود یک کیلو گرم خاک برای آنالیزهای بعدی مورد نیاز است.
- اندازه گیری غلظت کل عناصر جدول ۱ و غلظت کل مواد آلی جدول ۲ در نمونه های خاک. همچنین بافت خاک و pH باید در نمونه های اندازه گیری شود.
- به منظور اقدامات رفع آلودگی خاک، خوداظهاری، پس از نمونه برداری و آنالیز، وضعیت آلودگی خاک سایت طبق استانداردهای آلودگی خاک سازمان حفاظت محیط زیست ایران (کمتر از استاندارد آلایندهی خاک، بین استاندارد آلایندهی خاک و استاندارد پاک سازی و بیش از استاندارد پاک سازی) تعیین می گردد.
- در صورتی که میزان آلاینده ها کمتر از استاندارد آلایندهی خاک باشد منطقه بدون خطر بوده و حداکثر بار مجاز آلودگی منابع آلاینده قابل تخلیه به منابع خاک با استفاده از راهنمای استاندارد آلودگی خاک تعریف می شود.
- در صورتی که سطح آلودگی بیش از استاندارد آلایندهی خاک باشد از راهنمای استاندارد آلودگی خاک، با استفاده از راهنمای شاخص های کمی و کیفی خاک و بر اساس استاندارد پاک سازی آلودگی خاک، با توجه به فلو چارت شماره ۱، ۲، ۳ شکل های ۱، ۲، ۳ ارزیابی خطر شده و مدیریت منطقه آلوده از طریق اقدامات قانونی (قانون حفاظت و بهسازی محیط زیست، برنامه پنجم توسعه و) انجام خواهد شد.

ب: تعیین ویژگی های مواد آلاینده

- اندازه گیری غلظت مواد معدنی (جدول ۱) و مواد آلی (جدول ۲) که برای آنها حد مجاز به خاک تعیین شده است.
- برای آلاینده های مایع حداقل یک لیتر نمونه در یک ظرف پلاستیکی برداشت می شود. نمونه در ظرف باید حتما سر خالی باشد چون معمولا از آلاینده ها گاز ساطع می گردد. نمونه باید همان روز آنالیز شوند و در غیر این صورت در فریزر قرار داده شود تا پیشگیری از فعالیت های میکروارگانیسم ها به عمل آید.
- برای آلاینده های جامد باید یک نمونه به وزن دو کیلو گرم به صورت مخلوط برداشت شود. این نمونه نماینده کل است.
- نمونه های مایع و جامد باید جهت اندازه گیری غلظت کل عناصر و غلظت کل ترکیبات آلی غلظت کل نیتروژن، غلظت کل فسفر، درصد کل مواد آلی، هدایت الکتریکی، pH، ظرفیت تبادل کاتیونی پس از آماده سازی اندازه گیری شود.

ج : مدیریت خاک آلوده

آلودگی خاک برای انسان و محیط زیست مضر است و نیاز به کنترل دارد. برنامه توسعه به اطلاعاتی درباره وسعت و اهمیت آلودگی نیاز دارد به طوری که هزینه های برخورد با آن به دنبال استفاده ایمن را می توان با دقت ارزیابی کرد. ضوابط اجرایی بایستی به تواند منافع عمومی، از جمله آسیب رساندن به سلامت انسان، محیط زیست و فعالیت های اقتصادی گسترده تر را محافظت کند.

مرحله اول شناسایی سایت خاک آلوده

فاز اول شناسایی، سایت آلوده

هدف از این مرحله توسعه یک مدل مفهومی برای سایت آلوده است، که ارتباطات مهم منبع - مسیر - گیرنده را در سایت توصیف کند و باعث یک ارزیابی مقدماتی از اهمیت آنها شود. مرحله شناسایی فاز اول در شکل ۱ نشان داده شده است.

فاز دوم شناسایی، ارزیابی خطر

هدف این فاز، تست مدل مفهومی توسعه یافته در فاز اولیه ارزیابی است. برای این منظور، کمی کردن منابع ویژه و احتمال انتقال آلودگی ها به گیرندگان، و طبقه بندی ارتباطات آلاینده ها در مراحل خطر حال حاضر برای گیرندگان انجام می شود. شکل ۲ فلوچارت فاز دوم شناسایی (ارزیابی ریسک) را نشان می دهد

مرحله دوم ارزیابی خطر

نقطه شروع برای ارزیابی ریسک اطلاعات قابل قبول در مورد ارتباط منبع - مسیر - گیرنده برای سایت است که در حال ارزیابی است. در این مرحله، مدل مفهومی برای سایت باید تکمیل شود. هدف مرحله دوم "ارزیابی ریسک" این هست که در سایت یک خطر واقعی یا بالقوه از خاک های آلوده شناسایی شده است، و این شناسایی به برآورد و تاثیر آن به عنوان مبنایی برای مدیریت ریسک ارزیابی می باشد. شکل ۳ فلو چارت جریان برای ارزیابی خطر مرحله دوم را نشان می دهد.

برآورد خطر

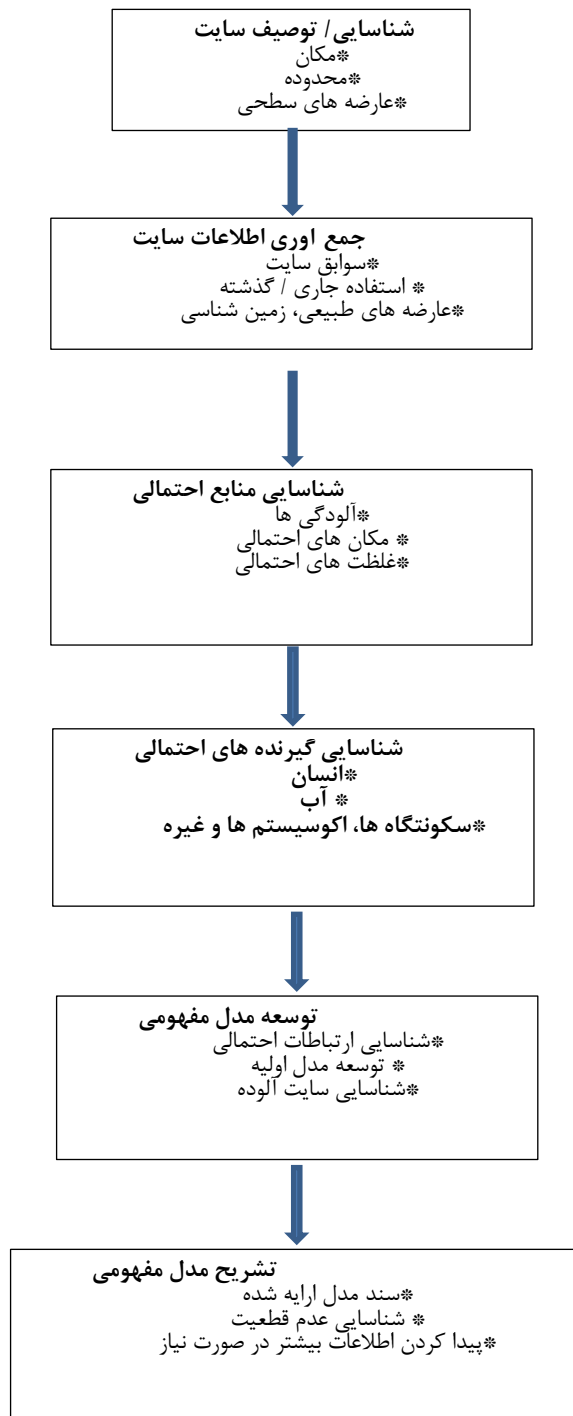
برآورد خطر دارای مزایای زیادی است مهمترین مزایای برآورد عبارت است از ۱- دامنه خطر ۲- جمع آوری اطلاعات جدید ۳- نتایج فرآیند برآورد.

درجه نخست از فرآیند برآورد خطر در معیارهای ارزیابی خطر "عمومی" متکی به سطوح راهنمای آلودگی است که می تواند مورد استفاده قرار گیرد. عواملی که در ارتباط با آلاینده هستند امکان آسیب قابل توجهی به انواع خاصی از گیرنده ها را دارند.

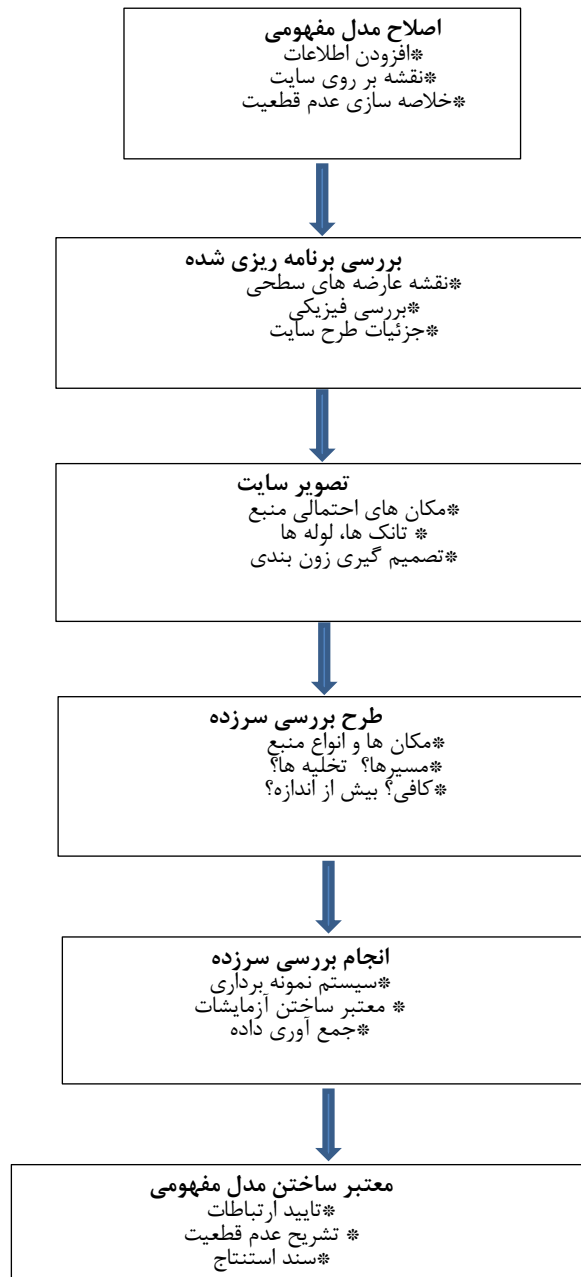
برآورد خطر درجه دوم ممکن است برای سایت خاص باشد که اطلاعات اضافی نیاز دارد، بر اساس تحقیق دقیق سایت است که توصیف آن به طور کامل در حد و ماهیت آلودگی و مسیر آن به گیرنده، اطلاعات اضافی به دست می آید. دامنه این درجه برای اطلاع رسانی برآورد خطر با شرح مفصل تر از گیرنده ها ممکن است محدود شود.

مرحله اول ارزیابی ریسک باید درک پایه ای از انواع آلاینده حاضر در سایت و حجم آن را فراهم آورد. برای حمایت از برآورد خطر درجه دوم، معمولاً اطلاعات بیشتری مورد نیاز است

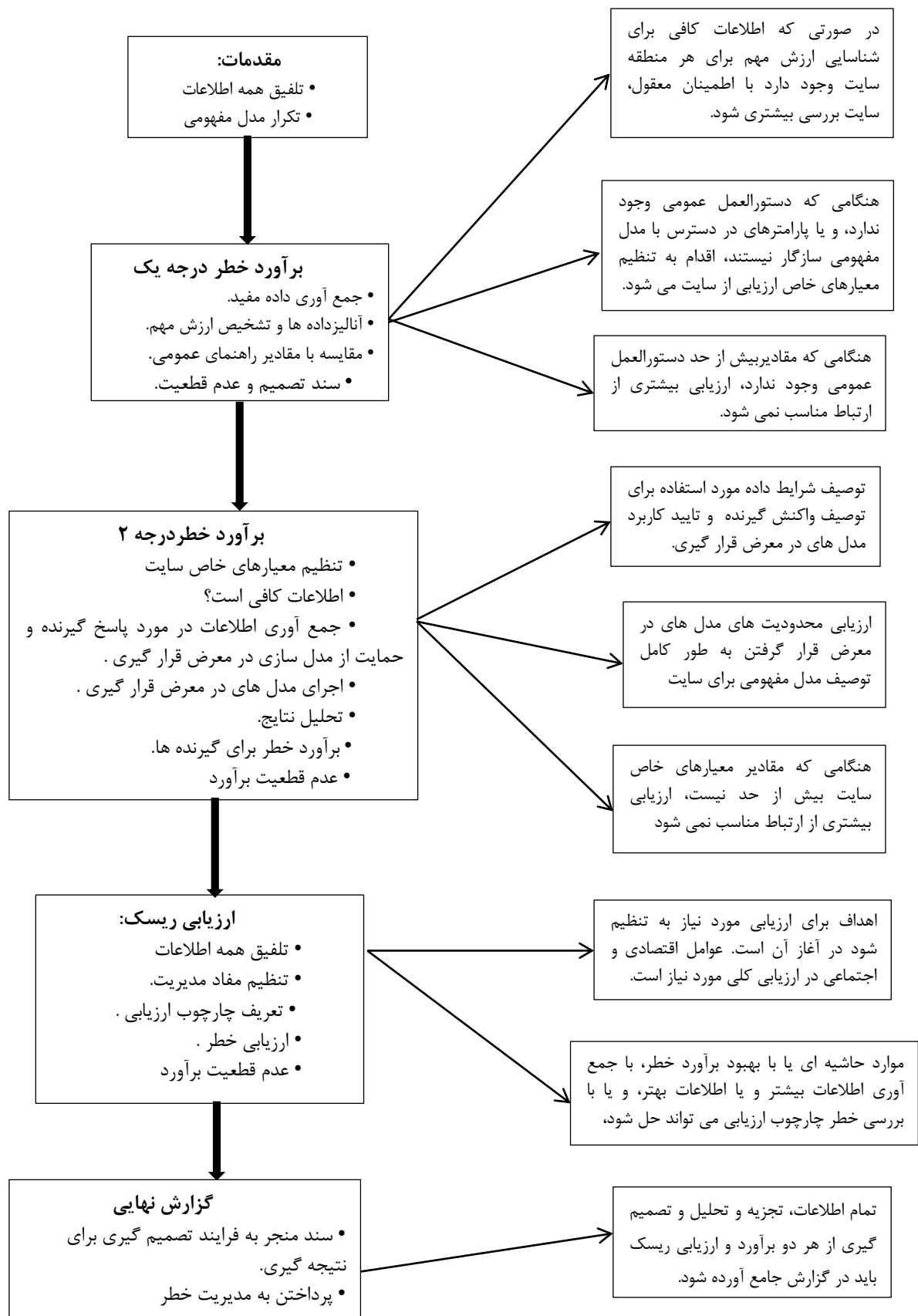
چالش مدیریت زمین های آلوده به دلیل آن است که با عدم اطمینان روبرو است. ماهیت و میزان آلودگی اغلب برای توصیف به اندازه کافی مشکل است. سم شناسی یا دیگر تاثیر سوء آلودگی در انسان و محیط زیست در بسیاری از موارد قابل پیش بینی است و به ندرت می توان به طور مستقیم اندازه گیری کرد. حرکت آلاینده ها از منبع به گیرنده را می توان از طریق یک ماتریس سایت ناهمگن و شناخت مدل پیچیده آن ارزیابی نمود. با این حال، اعتماد به نفس و استفاده موثر از اطلاعات و منابع موجود می تواند با رویکرد مرحله به مرحله و تضمین بهینه سازی شده، در هر فاز پی در پی، که اطلاعات و اقدامات با کیفیت شناخته شده است را بدست آورد و پس از مستند سازی به طور کامل به همه ذینفعان ابلاغ نمود.



شکل ۱: فلوجارت فاز اول شناسایی ارزیابی خطر



شکل ۲: فاز دوم شناسایی (ارزیابی ریسک) در مرحله شناسایی



شکل ۳: فلوچارت برای مرحله دوم ارزیابی خطر

جدول ۱ حد اکثر غلظت مجاز آلاینده های معدنی در سایت آلوده (mg/kg) برای کاربری های مختلف خاک

آلاینده	کشاورزی	جنگلی	مکان های عمومی تماس	مکان های احیای خاک
آرسنیک	۳۷	۵۰	۳۷	۵۰
کادمیم	۳۴	۴۹	۳۴	۴۹
کروم	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
مس	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
سرب	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
جیوه	۱۶	۲۰	۱۶	۲۰
مولیبدن	۱۹	۱۹	۳۷۵	۱۹
نیکل	۴۲۰	۴۲۰	۴۲۰	۱۰۰۰
سلنیوم	۷۸	۱۱۳	۷۸	۱۱۳
روی	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰

جدول ۲. حداکثر غلظت مجاز آلاینده های آلی در سایت (mg/kg) برای کاربری های مختلف خاک

آلاینده	کشاورزی	جنگل	مکان های عمومی تماس	مکان های احیای خاک
آلدرین/دی الدرین	۲	۲	۷	۲
بنزو (a) پیرین	۳/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۵
کلرودن	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۳/۵	۱۳/۵
DDT	۹/۷	۹/۷	۹/۷	۹/۷
هپتاکلو	۶	۷	۲۳	۷
هگزا کلروبنزن	۲۰	۲۰	۶۵	۲۰
هگزا کلروبیوتادین	۴۱۰	۴۱۰	۱۳۴۶	۴۱۰
لیندان	۷۹	۱۵۲	۷۹	۱۵۲
ان-نیتروسودی میتل امین	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶
PCBs	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷
توکسافن	۱۱	۱۱	۹۵	۱۱
تری کلرواتیلن	۹۵۴۹	۹۵۴۹	۹۵۴۹	۹۵۴۹
TPH	۶۲۰	۶۲۰	۶۲۰	۶۲۰

جدول ۳. محدودیت های مکانی سایت های کشاورزی

شرح	محدودیت
<p>زمین با شیب بیش از ۱۰ درصد (۶ درجه)</p> <p>خاک اشباع از آب</p> <p>خاک های با نفوذپذیری کم</p> <p>خاک های با نفوذپذیری زیاد</p> <p>زمین که عمق سنگ بستر کمتر از ۶۰ سانتی متر می باشد</p> <p>زمین با بیش از ۱۰ درصد بیرون زدگی سنگی</p> <p>جنگل بومی و پوشش بومی مشخص</p> <p>زمین درون مناطق حائل پیروی می کند.</p> <p>حداقل عرض مناطق حائل (m)</p> <p>مسطح (<۳٪ یا <۲°) پایین شیب (>۳٪ یا >۲°) بالای شیب</p>	<p>حداکثر شیب</p> <p>مناطق با ویژگی های زه کشی نامطلوب</p> <p>عمق سنگ بستر</p> <p>بیرون زدگی سنگ سطح</p> <p>پوشش گیاهی</p> <p>مناطق حائل</p> <p>مناطق حفاظت شده</p> <p>آب سطحی</p> <p>مزرعه</p> <p>منافذ آب شرب</p> <p>منافذ دیگر</p> <p>فاصله از مزرعه کشاورزی</p> <p>جنگل بومی و انواع گونه های مشخص دیگر</p> <p>محوطه های حیوانات</p> <p>مسکونی اشغال شده</p> <p>منطقه مسکونی</p>
۵	۵۰
۵	۲۰
۲۵۰	۲۵۰
۵۰	۵۰
۵	۵
۱۰	۱۰
۲۵	۲۵
۵۰	۵۰
۲۵۰	۲۵۰

جدول ۴. محدودیت مکانی زمین‌های غیرکشاورزی

شرح	محدویت
زمین با شیب بیش از ۱۸ درصد (۶ درجه)	حداکثر شیب
خاک اشباع از آب	مناطق با ویژگی‌های زه‌کشی نامطلوب
خاک‌های با نفوذپذیری کم	
خاک‌های با نفوذپذیری زیاد	
زمین که عمق سنگ بستر کمتر از ۶۰ سانتی‌متر	عمق سنگ بستر
زمین با بیش از ۱۰ درصد بیرون‌زدگی سنگی	بیرون‌زدگی سنگ سطح
جنگل بومی و پوشش بومی مشخص	پوشش گیاهی
زمین درون مناطق حائل پیروی می‌کند.	مناطق حائل
حداقل عرض مناطق حائل (m)	مناطق حفاظت شده
بالای شیب	مسطح (<۳٪ یا <۲°)
	پایین شیب (>۳٪ یا >۲°)
۵	۱۰۰
۵۰	۵۰
۲۵۰	۲۵۰
۵۰	۵۰
۵	۵
۵	۱۰۰
۲۵	۵۰
۵۰	۱۰۰
۲۵۰	۵۰۰
	۲۵۰

(عملیات میدانی و اندازه گیری پارامترهای آزمایشگاهی)



فرم مشخصات عمومی سایت آلوده

آدرس

.....
.....

موقعیت ماده آلودگی خاک در سایت : زیر سطحی ، رو سطحی .

..... حجم خاک (مترمکعب)

..... مساحت (هکتار)یا(متر مربع)

حالت ماده آلاینده خاک:

..... مایع: جامد: خمیری شکل سایر

.....

سایت دارای سابقه آلودگی دارد؟ آری خیر

آیا منطقه مورد نظر از لحاظ ملاحظات زیست محیطی برای انسان و محیط زیست رعایت شده است؟

آری لطفا با توجه به جداول ۱ تا ۴ ذکر شود.

.....

.....

خیر لطفا با توجه به جداول ۱ تا ۴ ذکر شود.

.....

.....



نقشه موقعیت سایت آلوده

نام منطقه:

مختصات جغرافیایی (به متر).....

.....

آدرس منطقه از روی نقشه های موجود

موقعیت در صورت در دسترس نبودن نقشه به صورت شماتیک و تخمینی رسم شود:

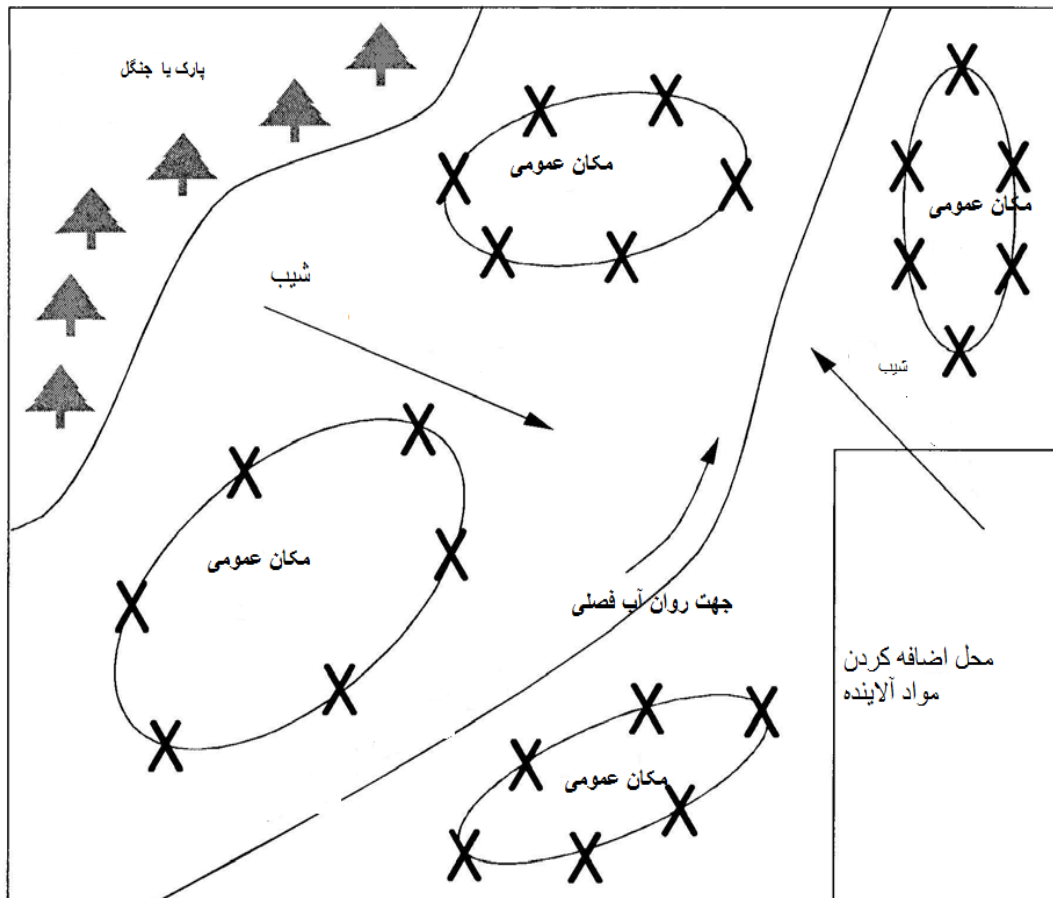


موقعیت فاصله ای سایت آلوده از کاربری های حساس

جهت	فاصله (متر)	کاربری
		مدرسه (آموزشی)
		مسکونی
		پارک (تفریحی)
		مزرعه کشاورزی
		منابع آب سطحی
		چاه آب



نقشه نمونه برداری در موقعیت سایت آلوده



X موقعیت فاصله ای برخی از کاربری های حساس از سایت آلوده

کاربری	فاصله (متر)	جهت
مدرسه	۱۰۰۰۰	شمالی
مسکونی	۱۰۰۰	شمالی
پارک	۱۵۵۰	شرقی
مزرعه کشاورزی	۲۹۰	جنوبی
منابع آب سطحی	-	-
چاه آب	۴۵۰	شمال غربی

جدول ۵. غلظت مواد معدنی و مواد آلی در سایت آلوده

غلظت (mg/kg)	آلاینده (معدنی) (ی)
	آرسنیک
	کادمیم
	کروم
	مس
	سرب
	جیوه
	مولیبدن
	نیکل
	سلنیوم
	روی

غلظت (mg/kg)	آلاینده (آلی)
	آلدرین / دی الدرین
	بنزو (a) پیرین
	کلرودن
	DDT
	هپتاکلو
	هگزا کلرو بنزن
	هگزا کلرو بیوتادین
	لیندان
	ان - نیتروسودی میتل امین
	PCBs
	توکسافن
	تری کلرواتیلن
	TPH

جدول ۶. ویژگی های خاک سایت. آلوده

مقدار	واحد	پارامتر
	-	pH
	با استفاده از مثلث خاک	بافت
	درصد	غلظت نیتروژن کل
	درصد	غلظت فسفر کل
	درصد	ماده آلی (OM)
	دسی زیمنس	هدایت الکتریکی (EC)
	میلی اکی والان در ۱۰۰ گرم خاک	ظرفیت تبادل کاتیون (CEC)

روش های پاک سازی و رفع آلودگی خاک

خاک یک سیستم زنده و پایداری است که در آن بخش‌های زنده و غیرزنده با یکدیگر در کنش متقابل هستند. خاک، خاکزیان و گیاهان از دیدگاه بوم شناختی به همدیگر وابسته هستند. زندگی بسیاری از جانداران وابسته به انرژی نهفته در کربن آلی است در این راستا گیاهان و دیگر جانداران غذاساز با دگرگون ساختن انرژی نورانی به انرژی شیمیایی، کربن آلی را می‌سازند. آنها با اکسیداسیون کربن آلی بخشی از این انرژی را برای واکنش‌های بیوشیمیایی خود بکار می‌برند. بنابراین در مسأله بررسی برهم‌کنش‌های جانداران و زیستگاه شان، گیاهان جایگاه ویژه‌ای دارند. انتخاب و استفاده از فناوری های جدید برای پاک سازی آلودگی خاک به سرعت افزایش یافته است، و فناوری های جدید پیوسته پدیدار می شوند. هدف از تحقیقات رفع آلودگی یا مطالعات امکان پذیری ((remedial investigation/feasibility studies (RI/FS)) و پروژه های پاک سازی آلودگی خاک، شامل بدست آوردن اطلاعات کافی بر روی یک سایت، با دقت و انتخاب بهترین روش های اجرایی رفع آلودگی است. گردآوری این اطلاعات می تواند مستلزم زمان، تلاش و بودجه های قابل ملاحظه ای می باشد. در تعدادی موارد، جمع آوری اطلاعات با تمرکز بر درمان های ویژه ای که تحت شرایط مشابه اثبات شده اند، امکان دارد. در ادامه روش های مرسوم پاک سازی و رفع آلودگی خاک پیشنهاد می شود:

تصفیه زیستی در محل (In Situ Biological Treatment)

الف - منفذ زیستی (Bioventing)

ب - تصفیه زیستی در محل (In Situ Biological Treatment)

ج - گیاه پالایی (Phytoremediation)

تصفیه فیزیکی شیمیایی در محل

الف - اکسیداسیون شیمیایی (Chemical Oxidation)

ب - شکستن (fracturing)

ج - شستشوی خاک (soil flushing)

د - استخراج بخار خاک (soil vapor extraction)

ز - استحکام/ تثبیت (Solidification/Stabilization)

تصفیه حرارتی در محل

الف - تصفیه حرارتی (Thermal Treatment)

تصفیه بیولوژیکی خارج از محل (Ex Situ Biological Treatments)

الف - توده زیستی (Biopiles)

ب - کمپوست کردن (Composting)

ج - لندفarming (Landfarming)

د - تصفیه بیولوژیکی فاز آبی (Slurry Phase Biological Treatments)

تصفیه فیزیکی و شیمیایی خارج از محل

الف - استخراج شیمیایی (Chemical Extraction)

ج - هالوژن زدایی (Dehalogenation)

د - جداسازی (Separation)

هـ - شستشوی خاک (Soil Washing)

و - استحکام/ تثبیت (Solidification/Stabilization)

تصفیه حرارتی خارج از محل (Ex Situ Thermal Treatment)

الف - آلودگی زدایی با گاز داغ (Hot Gas Decontamination)

ب - خاکستر کردن (Incineration)

ج - سوزاندن باز / انفجار باز (Open Burn/Open Detonation)

هـ - دفع حرارتی (Thermal Desorption)

جدول ۱۰ و ۱۱ هزینه های مورد نیاز پاک سازی یک متر مکعب خاک با روش های مختلف را نشان می دهد.

- انتخاب روش پاک سازی و رفع آلودگی

ممکن است برای پاک سازی آلودگی منتشر شده در محیط زیست بتوان از روش های متعددی با کارایی متفاوت استفاده نمود. به دلیل تفاوت این روش ها از نظر زمان اجرای طرح و ملزومات مورد نیاز، هزینه های مربوط به پاک سازی با استفاده از هر یک از روش ها با یکدیگر متفاوت بوده و در نتیجه انتخاب روش پاک سازی بر میزان جرائم تأثیرگذار است. اغلب روش های پاک سازی نیازی به تکنولوژی خاصی ندارند و در ایران قابل اجرا می باشند. ولی روش های پاک سازی که احتمالاً شرط بهتری برای قابلیت اجرا در ایران را دارند شامل موارد زیر می شوند:

- خاک برداری و دفن

-لندفیلینگ

-زیست پالایی (گیاه پالایی)

-شستشوی خاک

-تبادل یونی

-تصفیه حرارتی (در محل یا خارج از محل)

بی شک در انتخاب روش پاک سازی بنگاه ها روشی را انتخاب خواهند نمود که هزینه های کمتری داشته باشد و در مقابل دولت در انتخاب این روش ها روشی را برمی گزیند که سریع تر و مطمئن تر به هدف از بین بردن آلودگی و یا تقلیل آن به مقدار استاندارد برسد. از آنجا که روش های استاندارد و قطعی برای پاک سازی به صورت مدون ارائه نشده و قابل استناد نمی باشد، این عامل از جمله عواملی است که باید بر اساس توافق داوطلبانه بین دولت و صنایع آلاینده محیط زیست انتخاب شود و یا دستورالعمل و یا آیین نامه مدونی در این زمینه طرح گردد.

بهترین روش از بین روش های پاک سازی (رفع آلودگی) خاک به روش های گیاه پالایی می توان اشاره نمود. پتانسیل استفاده گیاه پالایی برای خاک های آلوده کشور وجود دارد. گیاه پالایی مفید می تواند طیف گسترده ای از شرایط سایت آلوده را در برگیرد. برخی از سایت ها که در آنها گیاه پالایی استفاده شده است عبارت است از: خطوط لوله؛ محل های دفن زباله شهری و صنعتی؛ زمین های کشاورزی؛ درمان سایت های درختزاری. پایگاه های نظامی؛ مزارع مخزن ذخیره سازی سوخت؛ ایستگاه های گاز؛ محل استقرار مهمات ارتش؛ محل استقرار تصفیه خانه فاضلاب؛ و سایت های معدن. نتایج نشان میدهد که گیاهان پتانسیل زیادی برای رفع انواعی از آلاینده ها به شرح زیر را دارند:

هیدروکربن های نفتی

بنزن، تولوئن، اتیل بنزن، و زایلن (BTEX)

هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه (PAH)

پلی کلرید بی فنیل (PCB)

تری کلرو اتان (TCE) و دیگر حلال های کلری

ضایعات مهمات و مواد منفجره

فلزات سنگین

زباله آفت کش

پرتوزا ضایعات غذایی (نظیر فسفات ها و نیترات ها)

دستورالعمل رفع آلودگی خاک

جدول ۷: مکانیزم‌های گیاه‌پالایی به همراه موادی که قابل تصفیه به وسیله این مکانیزم‌ها

نوع مکانیزم	تصفیه مواد شیمیایی
تجمع گیاهی - استخراج گیاهی	فلزات سنگین، مواد رادیواکتیو، BTEX (بنزن، اتیل بنزن، تولوئن و زایلن)، پنتاکلوروفنل، ترکیبات شاخه‌دار زنجیر کوتاه و دیگر ترکیبات آلی.
تجزیه گیاهی - تبدیل گیاهی	مواد شیمیایی جنگ‌افزاری (DNT, HMX، نیتروبنزن، نیترواتن، نیترومتان، نیتروتولوئن، اسیدپیکریک، RDX و TNT)، آتریزین، حلال‌های کلرینه (کلروفرم، تتراکلرایدکربن، هگزاکلرواتان، دی‌کلرواتن، تری‌کلرواتن، تتراکلرواتن، ونیل کلراید، دی‌کلرواتانل، تری‌کلرواتانل، مونوکلرواستیک‌اسید، دی‌کلرواستیک‌اسید، تری‌کلرواستیک‌اسید، تری‌کلرومتان و تتراکلرومتان)، DDT، دی‌کلرواتان، متیل‌بروماید، تترابرومواتن، دیگر کلرین‌ها، آفت‌کش‌های فسفره، بی‌فنل‌های پلی‌کلرینه، دیگر فنل‌ها و نیتریل‌ها.
تثبیت گیاهی	به استثنای حلال‌های کلرینه و فنل‌ها (تری‌کلرومتان و تتراکلرومتان)، بر روی استخرهای دفن معدن در مورد فلزات سنگین آزمایش شده است.
تحریک گیاهی	هیدروکربن‌های پلی‌سیکلیک آروماتیک (چند حلقه‌ای بودار)، BTEX، دیگر هیدروکربن‌های نفتی، آتریزین، PCB (بی‌فنیل‌های پلی‌کلرینه)، تری‌کلرواتان و تتراکلرواتان و دیگر ترکیبات آلی.
فراریت حاصل از واکنش‌های گیاهی (گیاه فراری)	حلال‌های کلرینه شده، جیوه و سلنیم
فیلتراسیون محیط ریشه	فلزات سنگین، مواد شیمیایی آلی و رادیواکتیوها

جدول ۸: گونه‌های گیاهی مورد استفاده در گیاه‌پالایی ترکیبات آلی

آلودگی	گونه‌های گیاهی
هگزا کلرو بنزن، PCB ^s ، پنتا کلرو بنزن، تری کلرو بنزن	جو
اسیدهای بنزوئیک کلرینه	گراس‌های برگ گوشتی
تترا کلرو اتان (PCE)، تری کلرواتان (TCE)، TNT	هزار برگ آبی پر طاووسی
آتریزین، نیتروبنزن، TNT، TCE	صنوبر پیوندی
اسیددو کلروبنزوئیک	گراس‌های دشتی



جدول ۹: انواع گیاهان، واسط‌ها (خاک، آب زیرزمینی و رسوب) و آلاینده‌ها

نوع آلاینده	واسط (پذیرنده)	نوع گیاه													
		Alfalfa	Alyssum	Bald cypress	Black locust	Cottonwood	Grasses	Hybrid poplars	Indian mustard	Pennycress	Red Mulberry	Stonewort	Sunflower	Water hyacinth	Willow
آلی	خاک			▲ PD RD			▲ RD	▲ PD RD			▲ RD	▲ PD			▲ PD RD
	رسوب			▲ PD RD			▲ RD	▲ PD RD			▲ RD	▲ PD			▲ PD RD
	آب زیر زمینی			▲ PD		▲ HC		▲ HC PD				▲ PD			▲ HC PD
غیر آلی	خاک	▲ PV	▲ PE		▲ PV		▲ PS	▲ PE PS PV	▲ PE PS PV	▲ PE			▲ PE		
	رسوب	▲ PV	▲ PE		▲ PV		▲ PS	▲ PE PS PV	▲ PE PS PV	▲ PE			▲ PE		
	آب زیرزمینی					▲ HC		▲ HC	▲ RF				▲ RF	▲ RF	▲ HC

▲ گیاه موثر برای نوع آلاینده

HC Hydraulic control
PD Phytodegradation
PE Phytoextraction

PS Phytostabilization
PV Phytovolatilization
RD Rhizodegradation
RF Rhizofiltration

Phytodegradation، تخریب گیاهی

Phytoextraction، استخراج گیاهی

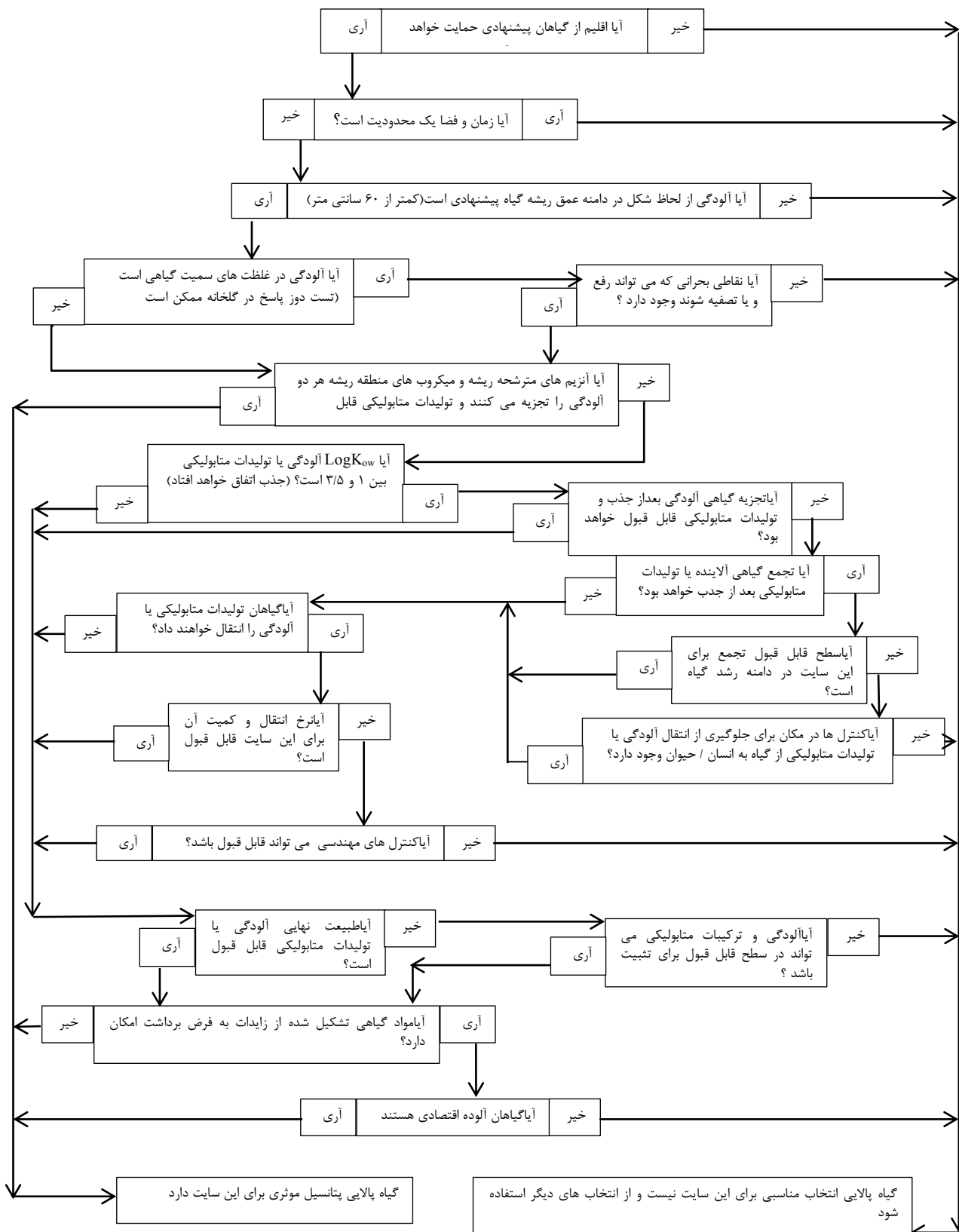
Phytostabilization، تثبیت گیاهی

Phytovolatilization، تصعید گیاهی

Rhizodegradation، تجزیه در منطقه ریشه گیاه

Rhizofiltration، فیلتراسیون در منطقه ریشه گیاه

درخت تصمیم گیری برای گیاه پالایی



در صورت انجام پاک سازی و رفع آلودگی خاک زیر سطحی خصوصیات آن مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در زیر خصوصیات مهم سایت ویژه برای تشریح و ارزیابی رفتار زیست محیطی و سرنوشت آلاینده ها در خاک فهرست شده است.

کلاس شیمیایی

اسیدی
بازی
قطبی خنثی
غیرقطبی خنثی

ویژگی شیمیایی

وزن مولکولی
ساختار
نقطه ذوب
جرم مخصوص
حلالیت آبی

واکنش شیمیایی

اکسیداسیون
احیاء
هیدرولیز
رسوب

پارامترهای جذب خاک

ثابت جذب فرندیش (K_d)
جذب براساس مقدار کربن آلی (K_{oc})
ضریب سهم اکتانول - آب (K_{ow})

پارامترهای تجزیه خاک

نیمه عمر ($t_{1/2}$)
نرخ ثابت
نسبت قابلیت تجزیه زیستی

پارامترهای فراریت خاک

ضریب سهم آب - هوا
فشار بخار
ثابت قانون هنری

جذب براساس مقدار کربن آلی

حلايت آبی
پارامترهای آلودگی خاک
غلظت در خاک
عمق خاک
تاریخ آلودگی

جدول ۱۰: برآورد هزینه و روش پاک سازی خاک های آلوده در محل

نوع روش	نام روش	آلاینده هدف	محدودیت ها	هزینه دلار
تصفیه زیستی	منفذ زیستی	هیدروکربن های نفتی، حلال های غیر کلرینه، آفت کش ها، مواد نگهدارنده چوب و مواد شیمیایی آلی	خصوصیات خاک می تواند کارایی این روش را تحت تأثیر قرار دهد	۱۰۹
	تصفیه زیستی	هیدروکربن ها نفتی، حلال ها، آفت کش ها، مواد نگاه دارنده چوب و مواد شیمیایی آلی	غلظت زیاد آلاینده ها ممکن است برای میکروارگانیسم ها سمی باشد.	۱۰۰
	گیاه پالایی	فلزات، آفت کش ها، حلال ها، مواد منفجره، نفت خام، PAH ها	عمق آلودگی، غلظت زیاد آلاینده ممکن است برای گیاه سمی باشد.	۴۸۳
تصفیه فیزیکی شیمیایی	اکسیداسیون شیمیایی	COC	نیاز به مصرف زیاد مواد شیمیایی اکسید کننده	۲۵۰۰
	جداسازی الکتروسینتیک	عناصر سنگین، آنیون ها و ترکیبات آلی در خاک، لجن و فاضلاب	کارایی روش به شدت بستگی به رطوبت خاک دارد.	۵۰
	شکستن	تمامی گروه های آلاینده ها	در مناطق با فعالیت لرزه ای قابل استفاده نیست.	۱۲
	شستشوی خاک	آلاینده های غیر آلی شامل آلاینده های رادیواکتیو، VOCs، SVOCs، سوخت ها و آفت کش ها	نفوذ پذیری خاک و تخلخل	۲۷
	استخراج بخار خاک	سوخت ها	خاک های با درجه اشباع بالا	۹۷۵
	استحکام / تثبیت	آلاینده های غیر آلی	عمق آلودگی	۳۳۰
	تصفیه حرارتی	SVOCs، VOCs	خاک های با رطوبت بالا و نفوذپذیری متغیر	۳۸

جدول ۱۱: برآورد هزینه و روش پاک سازی خاک های آلوده خارج از محل

نوع روش	نام روش	آلاینده هدف	محدودیت ها	هزینه (دلار)
تصفیه بیولوژیکی	توده زیستی	VOCS غیر هالوژنه، هیدروکربن های نفتی، VOCs و SVOCs هالوژنه و آفت کش ها	حفاری خاک آلوده	۲۶۰
	کمپوست کردن	ترکیبات آلی قابل تجزیه، TNT، RDX، HMX و سایر سموم و PAH	حفاری خاک آلوده و نیاز به فضای زیاد	۵۷۸
	لند فارمینگ	هیدروکربن های نفتی، سوخت های دیزلی، سوخت های نفتی شماره ۲ و ۶، لجن های نفتی و ضایعات چوبی و برخی آفت کش ها	نیاز به فضای زیاد، تأثیر عوامل مختلف بر تجزیه	۱۰۰
	تصفیه بیولوژیکی فاز آبی	VOCS و SVOCs غیر هالوژنه	نیاز به حفاری خاک آلوده	۲۱۰
تصفیه فیزیکی و شیمیایی	استخراج شیمیایی	PCBs، VOCs، حلال های هالوژنه، ضایعات نفتی و فلزات سنگین	نوع خاک و مقدار رطوبت خاک بر کارایی روش موثر است.	۳۶۱
	اکسیداسیون و احیاء شیمیایی	آلاینده های غیر آلی، VOCs و SVOCs غیر هالوژنه	نوع آلاینده و مواد اکسیدکننده	۶۶۰
	هالوژن زدایی	SVOCs هالوژنه و آفت کش ها	افزایش مقدار رس و رطوبت خاک هزینه را افزایش می دهد.	۵۵۰
	جداسازی	SVOCs، سوخت ها، ترکیبات غیر آلی، VOCs، آفت کش ها، فلزات سنگین، رادیونوکلئیدها و ذرات رادیو اکتیو مغناطیسی	افزایش مقدار رس و رطوبت خاک هزینه را افزایش می دهد.	۱۰۰۰
	شستشوی خاک	SVOCs، سوخت ها، فلزات سنگین، VOCs و آفت کش ها	ترکیب پیچیده ضایعات و مقدار زیاد ترکیبات هوموسی	۷۰
	استحکام/تثبیت	آلاینده های غیر آلی شامل رادیونوکلئیدها	شرایط محیطی ممکن است بر تحرک آلاینده ها موثر باشد.	۱۹۰
تصفیه حرارتی	آلودگی زدایی با گاز داغ	ترکیبات قابل احتراق	هزینه زیاد	۳۰۰۰
	خاکستر کردن	ضایعات قابل احتراق و خطرناک به خصوص هیدروکربن های کلردار، PCBs و دی اکسین ها	بر جای ماندن فلزات	۱۳۹۹
	تجزیه با استفاده از حرارت	SVOCs و آفت کش ها	رطوبت خاک باید به کمتر از ۱ درصد کاهش یابد.	۳۳۰
	دفع حرارتی	VOCS، LTTD، غیر هالوژنه و سوخت ها، SVOCs	رطوبت خاک باید کاهش یابد.	۱۱۰