



INSO
23303
1st Edition

2023

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران

Iran National Standards Organization

استاندارد ملی ایران

۲۳۳۰۳

چاپ اول

۱۴۰۱

صنعت نفت – الزامات کنترل آلودگی خاک

Petroleum industry–
Requirements for soil pollution
control

ICS:13.080.01

سازمان ملی استاندارد ایران

تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیابان ولیعصر، پلاک ۲۵۹۲

صندوق پستی: ۶۱۳۹-۱۴۱۵۵ تهران - ایران

تلفن: ۵-۸۸۸۷۹۴۶۱

دورنگار: ۸۸۸۸۷۱۰۳ و ۸۸۸۸۷۰۸۰

کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد

صندوق پستی: ۱۶۳-۳۱۵۸۵ کرج - ایران

تلفن: ۸-۳۲۸۰۶۰۳۱ (۰۲۶)

دورنگار: ۸۱۱۴-۳۲۸۰ (۰۲۶)

رایانامه: standard@inso.gov.ir

وبگاه: <http://www.inso.gov.ir>

Iran National Standards Organization (INSO)

No.2592 Valiasr Ave., South western corner of Vanak Sq., Tehran, Iran

P. O. Box: 14155-6139, Tehran, Iran

Tel: + 98 (21) 88879461-5

Fax: + 98 (21) 88887080, 88887103

Standard Square, Karaj, Iran

P.O. Box: 31585-163, Karaj, Iran

Tel: + 98 (26) 32806031-8

Fax: + 98 (26) 32808114

Email: standard@inso.gov.ir

Website: <http://www.inso.gov.ir>

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، وظیفه تعیین، تدوین، به روز رسانی و نشر استانداردهای ملی را بر عهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیردولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادات در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شود که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می شود به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)^۱، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)^۲ و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)^۳ است و به عنوان تنها رابط^۴ کمیسیون کدکس غذایی (CAC)^۵ در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری کند. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهی نامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، واسنجی وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2- International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)

4- Contact point

5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«صنعت نفت - الزامات کنترل آلودگی خاک»

سمت و/یا محل اشتغال:

شرکت ملی نفت ایران

رئیس:

گلستانی‌فر، حافظ

(کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط)

دبیر:

نیک‌پی، محمدامین

(کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط‌زیست)

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

احسنی، مریم

(کارشناسی ارشد مدیریت HSE)

اسدی، فریدون

(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

تسبندی، مصطفی

(کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط‌زیست)

جعفرزاده حقیقی فرد، نعمت اله

(دکتری مهندسی بهداشت محیط)

حمزه‌لو، مهتاب

(کارشناسی ارشد انرژی و محیط‌زیست)

رحمانی ایوریق، بهنام

(کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی)

سعیدی، الهام

(دکتری مهندسی شیمی - طراحی فرایند)

شبانپور، مهدی

(کارشناسی مهندسی شیمی)

صمیمی، کیوان

(دکتری محیط‌زیست - آلودگی‌های محیط‌زیست)

اداره کل بهداشت، ایمنی، محیط زیست وزارت نفت

شرکت پالایش نفت تهران

اداره کل بهداشت، ایمنی، محیط زیست وزارت نفت

هیات علمی دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز

شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران

دفتر حفاظت و مدیریت زیست‌محیطی آب‌و‌خاک سازمان حفاظت

محیط‌زیست

شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی ایران

شرکت فجر انرژی خلیج فارس

شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

عندلیب مقدم، سیدحسین

(کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست)

مهربان، لیلا

(کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست - آب و فاضلاب)

ناصری، کیومرث

(کارشناسی ارشد HSE)

نیرآبادی، رضا

(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)

هاشمی، سیده مهتاب

(کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - HSE)

ویراستار:

ردائی، احسان

(کارشناسی ارشد شیمی تجزیه)

سمت و/یا محل اشتغال:

شرکت ملی پالایش و پخش فراورده های نفتی ایران

اداره کل بهداشت، ایمنی، محیط زیست وزارت نفت

منطقه عملیاتی چشمه خوش / شرکت بهره برداری نفت و گاز غرب

شرکت ملی صنایع پتروشیمی

شرکت بهره برداری نفت و گاز غرب

اداره کل استاندارد استان همدان

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ز	پیش گفتار
ح	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ مراجع الزامی
۱	۳ اصطلاحات و تعاریف
۶	۴ منابع آلودگی خاک
۱۰	۵ الزامات پیشگیری و کنترل آلودگی خاک
۱۰	۵-۱ الزامات پایه برای پیشگیری از ریزش
۱۱	۵-۲ الزامات طراحی و اجرا برای کنترل آلودگی خاک‌های آلوده
۱۲	۵-۳ الزامات پیشگیری از انتشار آلودگی
۱۳	۵-۴ الزامات ویژه مخازن ذخیره
۱۴	۵-۵ الزامات ویژه خطوط لوله
۱۴	۶ روش‌های متداول کنترل آلودگی خاک
۱۵	۶-۱ عایق لرزشی
۱۶	۶-۲ دوغاب میکروبی
۱۷	۶-۳ پوشش‌ها
۱۷	۶-۴ روکش‌ها
۱۹	۶-۵ طرح‌های متداول پوشش
۲۰	۶-۶ طرح‌های پوشش جایگزین
۲۰	۶-۷ پوشش تبخیر و تعرق
۲۱	۶-۸ پوشش‌های مهندسی زیستی
۲۱	۷ روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده
۲۱	۷-۱ کلیات بازسازی خاک
۲۱	۷-۲ فرایند انتخاب فناوری
۲۳	۷-۳ فناوری‌های بازسازی خاک
۲۵	پیوست الف (آگاهی‌دهنده) روش‌ها و فناوری‌های بازسازی خاک آلوده
۴۰	کتاب‌نامه

پیش‌گفتار

استاندارد «صنعت نفت- الزامات کنترل آلودگی خاک» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط تهیه و تدوین شده است، در سیصد و بیست و سومین اجلاس کمیته ملی استانداردهای محیط زیست مورخ ۱۴۰۱/۱۱/۲۴ تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک ماده ۷ قانون تقویت و توسعه نظام استاندارد، ابلاغ شده در دی ماه ۱۳۹۶، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۵ (استانداردهای ملی ایران- ساختار و شیوه نگارش) تدوین می‌شوند. برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در صورت لزوم تجدیدنظر خواهند شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدیدنظر در کمیسیون‌های مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

منابع و مآخذی که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

- 1- EXXONMOBIL, Containment; XX-B2:2004
- 2- EXXONMOBIL, Guidelines and Selecting Soil Remediation Technology; XX-B4:1996

مقدمه

خاک یکی از منابع ارزشمند طبیعت است که درصد بالایی از مواد غذایی مورد نیاز انسان از آن تأمین می‌گردد. در نبود خاک سالم، حیات روی کره زمین امکان‌پذیر نخواهد بود. خطر آلودگی خاک، کمتر از خطر آلودگی هوا نیست. از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، خاک سومین بخش محیط‌زیست تلقی می‌شود.

ایران یکی از بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های نفت و گاز در جهان است. مواد نفتی حین حفاری و استخراج از منابع نفت و گاز، هنگام نقل و انتقال زمینی و دریایی، در سایت‌های فرایندی مانند پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها، با وجود تدابیری که جهت کنترل آلودگی آن‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ به محیط اطراف نشت می‌کنند. وارد شدن ماده هیدروکربنی به محیط، باعث ایجاد آلودگی زیست‌محیطی از جمله آلودگی خاک می‌گردد. روش‌های متنوعی جهت کنترل آلاینده‌ها و بازسازی خاک‌های آلوده وجود دارد که انتخاب و استفاده از آن‌ها به عوامل متعددی از جمله نوع آلاینده، غلظت آلودگی، نوع خاک، شرایط آب و هوایی، شرایط آب زیرزمینی، گستره آلودگی و هزینه بستگی دارد. استاندارد حاضر شامل منابع آلودگی خاک، روش‌های متداول کنترل و بازسازی خاک، نمونه‌برداری و الزامات پیشگیری و کنترل آلودگی خاک در مراحل طراحی، اجرا، راه‌اندازی، بهره‌برداری و برچیدن طرح‌ها و پروژه‌های صنعت نفت می‌باشد. لازم به ذکر است که این استاندارد در کنار قوانین، مقررات، استانداردها، ضوابط و آیین‌نامه‌های اجرایی معتبر جاری در کشور و صنعت نفت از جمله قانون حفاظت از خاک و آیین‌نامه‌های اجرایی آن بوده و در جایگاه مکمل آن‌ها می‌باشد.

به‌منظور پایش خاک، باید از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و اندازه‌گیری استفاده‌شده و نتایج با حدود مجاز پارامترهای آلاینده خاک مطابق با قوانین و الزامات جاری ذی‌ربط مقایسه شود. در این راستا لازم است کلیه استانداردهای ملی و راهنماهای نمونه‌برداری رعایت گردد.

صنعت نفت - الزامات کنترل آلودگی خاک

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد، ارائه منابع آلودگی خاک، روش‌های پیشگیری، کنترل آلودگی و بازسازی خاک و ارائه الزامات مربوطه در مراحل طراحی، ساخت، راه‌اندازی، بهره‌برداری و برچیدن تأسیسات و تجهیزات صنعت نفت است.

۲ مراجع الزامی

در مراجع زیر ضوابطی وجود دارد که در متن این استاندارد به‌صورت الزامی به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب، آن ضوابط جزئی از این استاندارد محسوب می‌شوند.

در صورتی که به مرجعی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه‌ها و تجدیدنظرهای بعدی آن برای این استاندارد الزام‌آور نیست. در مورد مراجعی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن‌ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدیدنظر و اصلاحیه‌های بعدی برای این استاندارد الزام‌آور است.

استفاده از مرجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

2-1 EXXONMOBIL, Solid Waste Management and Site Remediation; SEC XX-TOC

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد، اصطلاحات و تعاریف زیر به کار می‌رود:

۱-۳

آلودگی خاک

soil pollution

آمیختن یک یا چند ماده خارجی به خاک یا پخش آن‌ها بر سطح خاک به میزانی که کیفیت فیزیکی، شیمیایی یا زیستی آن را به نحوی تغییر دهد که برای انسان و/یا سایر موجودات زنده، گیاهان، آثار و ابنیه زیان‌آور باشد.

۲-۳

ماده آلاینده

pollutant

هر نوع ماده یا عامل فیزیکی، شیمیایی و زیستی که باعث آلودگی خاک گردیده و/یا به آلودگی آن بیفزاید.

۳-۳

بازسازی خاک

soil remediation

مجموعه فعالیت‌هایی است که موجب بهبود و بازگشت شرایط فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک‌های آلوده و تخریب‌شده به وضعیت قبل از آن می‌شود.

۴-۳

پوشش

cover

سیستم پوشش محل دفن که اغلب از چند لایه مواد مختلف تشکیل شده است. پوشش برای جلوگیری از نفوذ و به حداقل رساندن تماس مستقیم با آلودگی، در بالای خاک آلوده قرار می‌گیرد.

۵-۳

خارج از محل

ex situ

روش‌های مدیریت و بازسازی خاک‌های آلوده که با خاک‌برداری و جابجایی در خارج از محل انجام می‌شود.

۶-۳

در محل

in situ

روش‌های مدیریت و بازسازی خاک‌های آلوده که در محل انجام می‌شود.

۷-۳

ژئوممبران (زمین ساخت ورقی)

geomembrane

ورق‌هایی از مواد پلیمری مانند پلی‌اتیلن با چگالی بالا، ضخامت معمولاً ۲۰ mm تا ۱۰۰ mm که برای بسیاری از کاربردها شامل جداسازی و محصورسازی استفاده می‌شود. ورق‌ها می‌توانند به صورت حرارتی یا شیمیایی جوش داده شوند تا امکان پوشاندن مناطق وسیع فراهم شود.

۸-۳

مواد ژئوسنتتیک

geosynthetic

مواد مصنوعی مورد استفاده در کاربردهای مهندسی خاک می‌باشد.

۹-۳

ژئوتکستایل (زمین ساخت منسوج)

geotextile

پارچه‌ای بافته‌شده یا غیر بافته ساخته دست بشر که در کاربردهای مهندسی زمین به منظور تخلیه، لایه‌های فیلتر، پشتیبانی ایزولاسیون، محوطه‌سازی و کنترل فرسایش استفاده می‌شود.

۱۰-۳

سورفکتانت (عامل سطح فعال)

surfactant

مواد شیمیایی فعالی که برای افزایش دسترسی به آلاینده، با اعمال تغییراتی (به‌عنوان مثال در حلالیت) استفاده می‌شود.

۱۱-۳

پوشش خاک

soil cover

لایه پوششی از خاک تشکیل شده است که می‌تواند پوشش گیاهی را پشتیبانی کند.

۱۲-۳

بایوپایل

biopile

یک روش تصفیه زیستی روی زمین که خاک آلوده به‌صورت کپه و توده درمی‌آید.

۱۳-۳

تهویه زیستی

bioventing

تأمین هوا در ناحیه اشباع‌نشده خاک برای تجزیه زیستی هوازی است.

۱۴-۳

زیست پالایی

bioremediation

تجزیه زیستی با کنترل محیط میکروبی جهت تحریک رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها می‌باشد.

۱۵-۳

تجزیه زیستی

biodegradation

تغییر و تجزیه آلاینده با استفاده از میکروارگانیزم‌ها و آنزیم‌ها است.

۱۶-۳

خاک‌شویی یا شستشوی خاک

soil washing

خاک‌شویی یک فرایند خارج از محل مبتنی بر آب است که آلاینده‌ها را در یک جریان لجن متمرکز و خاک را تصفیه می‌کند.

۱۷-۳

شستشوی زیستی

bioflushing

تصفیه در محل خاک اشباع‌نشده و آب‌های زیرزمینی با تحریک فعالیت میکروارگانیزم‌های طبیعی که از طریق گردش مجدد آب‌های زیرزمینی حاوی اکسیژن و مواد مغذی ایجاد می‌شود.

۱۸-۳

زیست‌پالایی طبیعی و کاهش اثر طبیعی

NA&IB

natural attenuation and intrinsic bioremediation

زیست‌پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی معمولاً در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که جرم آلاینده به‌اندازه کافی کوچک است تا در یک بازه زمانی مناسب کاهش‌یافته و از بین برود.

۱۹-۳

استخراج بخار خاک

SVE

soil vapor extraction

این روش از انتقال به فاز بخار برای حذف فیزیکی ترکیبات آلی فرار از منطقه غیراشباع استفاده می‌کند. معمولاً در محل اعمال می‌شود، اما می‌تواند به عنوان پایلوت خارج از محل نیز ساخته شود.

۲۰-۳

جامدسازی

solidification

فرایند تولید ماده‌ای خاک شکل است که دارای ساختار یکپارچه‌ای از مایع، لجن و ذرات جامد می‌باشد.

۲۱-۳

تثبیت

stabilization

فرایندی شیمیایی با هدف پایدار سازی خاک آلوده که باعث جلوگیری از نشت می‌شود.

۲۲-۳

شیشه‌گون‌سازی

vitrification

این فرآیند تصفیه حرارتی، خاک آلوده را به یک ماده خنثی شیمیایی و کریستالی پایدار تبدیل می‌کند.

۲۳-۳

محصورسازی

containment

جایگزینی برای تصفیه آب و خاک است. هدف از محصورسازی، تصفیه محیط آلوده نیست بلکه جداسازی به منظور جلوگیری از انتشار آلودگی است.

۲۴-۳

هات تپ (انشعاب گرم)

hot tap

عملیاتی است که در آن از خطوط لوله در حال سرویس، بدون قطع جریان انشعاب‌گیری می‌شود. این فرایند به دلیل عدم قطع جریان، در خطوط نفتی و گازی کاربرد فراوانی دارد.

۲۵-۳

شیر اضطراری قطع خطوط انتقال

LBV

line break valve

برای حفاظت خطوط انتقال در برابر شکستگی‌های خطوط انتقال و حوادث طبیعی، از سیستم شیرهای قطع اضطراری در شبکه خطوط انتقال گاز و نفت استفاده می‌شود. این عملگرها در شرایط اضطراری با احساس افت فشار ناگهانی، به‌صورت خودکار بسته‌شده و از هدر رفت منابع و همچنین آلاینده‌های زیست‌محیطی جلوگیری می‌نمایند.

۲۶-۳

لایнер خاک رس ژئوسنتتیک

GCL

geo synthetic clay liner

لایнер رسی ژئوسینتتیکی نوعی محصول ژئوکامپوزیت است که با قرار دادن لایه نازکی از بنتونیت سدیم بین دو لایه ژئوتکستایل جهت آب‌بندی استفاده می‌شود.

۲۷-۳

وضعیت اضطرار

emergency situation

وضعیتی فوق‌العاده که بر اثر حوادث طبیعی و/یا انسان‌ساخت به‌وجود آمده و موجب ایجاد آلودگی جدی در منابع خاک و آب (سطحی و/یا زیرزمینی) شود، به‌گونه‌ای که مخاطره جدی در سلامت انسان و محیط را در پی داشته باشد.

۴ منابع آلودگی خاک

آلودگی‌های خاک را می‌توان در مراحل آماده‌سازی و ساخت، پیش‌راه‌اندازی و راه‌اندازی، بهره‌برداری و برچیدن تقسیم‌بندی کرد که هر مرحله آلودگی‌های خاص خود را دارا می‌باشد.

- **مرحله آماده‌سازی و ساخت**، عمده فعالیت‌های این مرحله عبارت است از آماده‌سازی اراضی، اسکان موقت و تجهیز کارگاه، حفاری، عملیات خاکی، فونداسیون‌ها و شمع‌کوبی، ساخت‌وساز ساختمان‌ها، راه‌ها و محوطه‌ها و سازه‌های فلزی و بتنی، ترانشه‌کشی، نصب تجهیزات و تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و عملیات کارگاهی.

- **مرحله پیش‌راه‌اندازی و راه‌اندازی**، حصول اطمینان از کارکرد صحیح واحدها و تأسیسات و آمادگی برای ورود به مرحله راه‌اندازی و بهره‌برداری، مهم‌ترین هدف این مرحله است که به‌وسیله آزمون‌ها و آزمایش‌های راه‌اندازی ماشین‌آلات و تأسیسات انجام می‌گیرد. مهم‌ترین ویژگی این مرحله، موقتی و کوتاه‌مدت بودن آن است و به‌این‌ترتیب، مدت وقوع اثرات زیست‌محیطی مرتبط با آن نیز موقتی و کوتاه می‌باشد. با وجود این، برخی از جنبه‌های مرتبط با فعالیت‌های این مرحله از پتانسیل اثرگذاری نسبتاً بالایی بر محیط‌زیست برخوردارند. اطمینان از بدون نقص بودن مخازن، عملکرد صحیح فلرها و عملکرد درست تأسیساتی نظیر تجهیزات کنترل‌کننده و هشداردهنده و شیرهای قطع و وصل‌کننده جریان به‌وسیله راه‌اندازی موقت جریان و پایش دقیق آن و همچنین اطمینان از انسجام و یکپارچگی خطوط لوله و سایر تأسیسات مانند مخازن تحت‌فشار و آماده بودن آن‌ها به‌وسیله آزمون‌های فشار هیدرواستاتیک، بازرسی‌های غیرمخرب و توپکرانی از فعالیت‌های مهم این مرحله است. آلودگی‌های ناشی از شستشوی اولیه تأسیسات (عمدتاً اسید شویی و چربی‌زایی) و روغن‌کاری در مرحله راه‌اندازی می‌تواند آلودگی خاک را در پی داشته باشد. راه‌اندازی آزمایشی تأسیسات شامل قطع و وصل کردن جریان‌های موقتی در خطوط لوله و پر و خالی کردن مخازن، تولید زائداتی نظیر قطعات و براده فلزات، زائدات جوشکاری، روغن، اسید و مواد نفتی را به دنبال خواهد داشت. وقوع سوانح و حوادث نیز از جنبه‌های احتمالی مرحله پیش‌راه‌اندازی و راه‌اندازی است.

- **مرحله بهره‌برداری**، بهره‌برداری از پروژه در طول عمر طرح، جنبه‌ها و اثرات زیست‌محیطی مختلفی به دنبال خواهد داشت که عموماً ناشی از نشت و ریزش نفت و سیالات حاوی هیدروکربن و فراورده‌های نفتی مایع منتج از خرابی تجهیزات و خطای اپراتور (کارور) است. خرابی تجهیزات شامل خوردگی و نشتی خطوط لوله و مخازن زمینی و زیرزمینی، خرابی شیرآلات، خرابی واحدهای فرایندی و نشتی فاضلاب و زهکشی و تخلیه است. با روش‌های مناسب بازرسی و تعمیرات و نگهداری می‌توان از بسیاری از این خرابی‌ها جلوگیری نمود. خطای اپراتور معمولاً شامل پر شدن بیش‌ازحد مخازن و تراز نامناسب

شیرآلات و لوله‌کشی است. این خطاها و سایر خطاهای اپراتور را می‌توان از طریق ایجاد روش‌های اثبات‌شده عملیاتی، آموزش منظم کارکنان و پیگیری نظام‌مند برای اطمینان از رعایت روش‌ها اصلاح کرد. از جمله جنبه‌های زیست‌محیطی مرحله بهره‌برداری که می‌تواند منجر به آلودگی خاک شود، می‌توان به نشت و ریزش مواد هیدروکربنی و افزودنی‌های شیمیایی از واحدها، مخازن، خطوط لوله و شیرآلات و اتصالات، آتش‌سوزی و انفجار، تولید پساب‌های بهداشتی و صنعتی، تولید لجن‌های نفتی، تولید مواد شیمیایی مازاد و مستعمل، تولید ضایعات ناشی از تعویض و تعمیر قطعات اشاره کرد.

- **مرحله برچیدن**، بعد از عملیات بهره‌برداری و در صورت لزوم، پروژه به مرحله برچیدن وارد می‌شود. اثرات ناشی از این مرحله بسیار مشابه با اثرات ناشی از مرحله ساخت در قسمت حذف فیزیکی تأسیسات است؛ اما در مقایسه با مرحله ساختمانی، اثرات برجای‌مانده از قسمت‌های مختلف پروژه نسبت به مرحله ساختمانی، ماندگاری و آلودگی بیشتری دارد. برخی از آثار به‌جای مانده از پروژه که نیاز به اجرای مدیریت دقیق و اختصاصی دارند عبارت‌اند از: قطعات و تجهیزات آلوده به مواد نفتی و شیمیایی، نخاله‌های فلزی شامل خطوط لوله، تأسیسات و ضایعات فلزات بلااستفاده پس از جمع‌آوری قطعات قابل استفاده، نخاله‌های ساختمانی، خاک آلوده به مواد نفتی و اسیدی در اطراف گودال سوزا و فلرها، پی‌های بتنی و زمین تغییر شکل یافته. درنهایت، پس از برچیدن پروژه، ممکن است تأسیسات با اعمال برخی تغییرات و نوسازی‌ها و حذف و اضافه‌ها برای مقاصد دیگری مورد استفاده قرار گیرند، اما در صورتی که بنا بر برچیدن کامل سایت باشد، تمام کاربری‌های تغییر داده‌شده باید تا حد امکان به حالت اولیه بازگردند.

براساس توضیحات فوق، منابع آلودگی در جداول ۱ تا ۴ ارائه شده است:

جدول ۱- منابع آلودگی خاک در مرحله آماده‌سازی و ساخت

منبع آلودگی	جنبه
دپوی مصالح و انبارش تجهیزات	باقی ماندن مصالح و آثار آن نظیر خرده‌ها و زنگ فلزات
ساخت فونداسیون‌ها و سازه‌های بتنی	نشت و ریزش بتن، باقی‌مانده بتن در محل، دوغاب مصالح ریخت‌وپاش افزودنی‌ها
سازه‌های فلزی	زنگ‌زدایی و سند بلاست، رنگ
نصب تأسیسات و تجهیزات	نشت و ریزش مواد شیمیایی به واسطه روغن‌کاری، گریس کاری، چسب کاری و عایق کاری تولید پساب آغشته به مواد روغنی و اسیدی ناشی از شستشوی تجهیزات تولید پسماند جامد
مواردی مانند حرکت ماشین‌آلات سنگین برای عملیات خاکی و حمل مصالح، فعالیت کمپرسور، پمپ بتن، جرثقیل، تردد وسایل نقلیه، حمل و بارگیری سوخت ماشین‌آلات	نشت و ریزش مواد سوختی، انفجار و آتش‌سوزی ریزش و نشت مواد و مصالح نشت و ریزش سوخت و روغن ناشی از تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات
حفاری	تولید گل حفاری نشت و ریزش مواد نفتی
احداث خطوط لوله جریانی و انتقال نفت، گاز و فراورده‌های هیدروکربنی	تغییر در مورفولوژی (ریخت‌شناسی) زمین، تسطیح و فرسایش خاک، آلودگی‌های ناشی از جوش‌کاری، عایق‌کاری، زنگ‌زدایی و ریسه‌کردن ^۱
فعالیت و اسکان کارگران و کارکنان پروژه	تولید پساب بهداشتی تولید پسماند عادی
1. Pipe lay out	

جدول ۲- منابع آلودگی خاک در مرحله پیش راه‌اندازی و راه‌اندازی

منبع آلودگی	جنبه
آزمون‌های هیدرواستاتیک	نشت و ریزش مایعات آلوده به انواع آلاینده‌ها مانند شونده‌ها، برخی فلزات سنگین مانند کروم و کادمیوم و pH نامتعادل
آزمون چاه‌های حفرشده	نشت و ریزش نفت خام (خارج از کنترل) انتشار آب همراه
آزمون و راه‌اندازی آزمایشی تجهیزات	نشت و ریزش مواد شیمیایی و مواد هیدروکربنی تولید پساب آغشته به مواد شیمیایی و فلزات سنگین

جدول ۳- منابع آلودگی خاک در مرحله بهره‌برداری

منبع آلودگی	جنبه
انتقال نفت خام یا سایر مایعات هیدروکربنی و محصولات پتروشیمی در داخل و خارج از تأسیسات و فنس از طریق خطوط لوله	نشت و ریزش ماده هیدروکربنی به دلایلی از جمله خوردگی، سرقت، هات‌تپ غیرمجاز، برخورد فیزیکی ماشین‌آلات کشاورزی و راه‌سازی، ریزش کوه و حوادث طبیعی
	آتش‌سوزی و انفجار
فرآیندها و عملیات بهره‌برداری از جمله جداسازی نفت و گاز همراه و آب آزاد در تفکیک‌گرها، انتقال آب جداسازی شده، تبادل حرارتی نفت/نفت، خنک‌سازی، نمک‌زدایی و فرایندهای پتروشیمی	نشت و ریزش مواد نفتی و افزودنی‌های شیمیایی از تأسیسات
	نشت و ریزش مواد هیدروکربنی و آب آلوده از خطوط لوله
	آتش‌سوزی
تخلیه و سوزاندن مواد نفتی و پسماندهای نفتی در گودال‌ها و حوضچه‌ها از جمله گودال سوزا	ماند مواد نفتی در حوضچه و گودال، آلودگی خاک به علت نفوذ مواد نفتی و انتشار مواد نفتی ناشی از تخریب گودال به دلایلی مانند سیل
ذخیره‌سازی مواد هیدروکربنی در مخازن مانند نفت شیرین، نفت نامرغوب، سوخت‌مایع و محصولات پتروشیمی	نشت و ریزش مواد هیدروکربنی ناشی از فرسودگی یا خوردگی
	سرریز مخزن
	آتش‌سوزی
ذخیره‌سازی مواد اسیدی، بازی و افزودنی‌های شیمیایی (مانند پودرها و رنگ‌ها) در ظروف، بشکه‌ها و مخازن	نشت و ریزش مواد ناشی از فرسودگی یا خوردگی
	سرریز
	آتش‌سوزی
تصفیه رواناب‌های سطحی و پساب صنعتی	نشت از کانال‌های انتقال، حوضچه‌های پساب و تأسیسات تصفیه
	سرریز حوضچه‌های پساب در اثر سیلاب
	تولید لجن نفتی
تعمیرات اساسی و شستشوی مخازن و تأسیسات	تولید پساب و لجن نفتی
	نشت و ریزش مواد شیمیایی
	تولید زائدات ناشی از تعویض و تعمیر قطعات
بارگیری تانکرها	ریزش مواد هیدروکربنی به علت سرریز تانکر
سایت‌های نگهداری پسماندهای صنعتی	نشت مواد روغنی و نفتی
فعالیت و اسکان کارگران و کارکنان منطقه	تولید پساب بهداشتی
	تولید پسماند عادی

جدول ۴- منابع آلودگی خاک در مرحله برچیدن

منبع آلودگی	جنبه
تخریب سازه‌های بتنی و فلزی و خطوط لوله و مخازن و واحدها و تأسیسات فرایندی و غیرفرایندی	قطعات و تجهیزات آلوده به مواد نفتی و شیمیایی
	ضایعات فلزی شامل خطوط لوله، تأسیسات و ضایعات فلزات بلااستفاده پس از جمع‌آوری قطعات قابل استفاده
	نخاله‌های ساختمانی
	خاک آلوده به مواد هیدروکربنی و شیمیایی به‌جامانده در اطراف واحدها، مخازن، گودال‌ها، حوضچه‌ها و فلرها

۵ الزامات پیشگیری و کنترل آلودگی خاک

الزامات زیر جهت پیشگیری از بروز آلودگی خاک و کنترل آلودگی‌های احتمالی، در کلیه طرح‌ها، پروژه‌ها و تأسیسات آتی صنعت نفت لازم است مدنظر قرار گیرد. این الزامات به‌صورت الزامات پایه برای پیشگیری از ریزش، الزامات طراحی و اجرا برای کنترل آلودگی، الزامات پیشگیری از انتشار آلودگی، الزامات ویژه مخازن ذخیره و الزامات ویژه خطوط لوله طبقه‌بندی و ارائه شده است.

۵-۱ الزامات پایه برای پیشگیری از ریزش

جلوگیری از ریزش‌ها، اولین خط دفاعی در حفاظت از جان، دارایی و محیط‌زیست است. تجربه، نشان داده است که خطاهای عملیاتی یا انسانی و خرابی تجهیزات، علل اصلی ریزش‌ها هستند. با مشارکت و تعهد همه کارکنان برای جلوگیری از ریزش، می‌توان خطاهای مذکور را کاهش داد.

الف- باید در مرحله طراحی، استفاده کارآمد از روش‌های شناسایی و ارزیابی ریسک و ارائه راهکارهای کنترلی و پیشگیرانه مانند HAZOP^۱ و HAZID^۲ در دستور کار طراح قرار گیرد؛

ب- باید در مرحله پیش راه‌اندازی و راه‌اندازی، شناسایی و رفع کلیه عیوب اصلی که می‌تواند منجر به آلودگی خاک شود در دستور کار گروه راه‌اندازی قرار گیرد؛

پ- باید در مرحله بهره‌برداری، بازرسی و تعمیرات و نگهداری مناسب و به‌نگام از تأسیسات در دستور کار بهره‌بردار قرار گیرد؛

ت- باید قبل از راه‌اندازی تأسیسات و شروع بهره‌برداری، استفاده از اپراتورهای کارآمد، باتجربه و آموزش‌دیده و همچنین تعریف و تدوین رویه‌های کاری منطقی جهت کاهش حداکثری ریزش‌ها در دستور کار قرار گیرد؛

1- Hazard and Operability study
2- Hazard Identification

ث- با توجه به اینکه در پروژه‌های صنعت نفت، پتانسیل رها شدن نفت یا فراورده‌های نفتی وجود دارد، لازم است همه طرح‌ها و پروژه‌ها دارای برنامه برای شرایط اضطراری ریزش و تجهیزات اساسی لازم برای پاک‌سازی نشت و بازسازی خاک باشند؛

ج- با توجه به اینکه تفاوت بین یک رخداد جزئی و یک رخداد فاجعه‌بار تا حد زیادی به برنامه‌ریزی بستگی دارد، ضروری است چنین برنامه‌ریزی‌هایی شامل طراحی تأسیسات/پروژه با هشدارها و ویژگی‌های محصورسازی نشت، برنامه مؤثر و کارآمد جهت مواجهه و مقابله با شرایط اضطراری، در نظر گرفتن ساختار گروه‌های واکنش، آموزش کارکنان جهت کنترل ریزش و تجهیزات کافی جهت کنترل و مدیریت ریزش باشد؛

چ- تأسیسات برای پیشگیری از هرگونه ریزش طراحی شود؛

ح- به حداقل رساندن یا حذف انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست، به‌عنوان یک الزام اساسی در دستور کار مرحله طراحی پروژه‌های صنعت نفت قرار گیرد؛

خ- باید الزامات طراحی به‌طور کامل رعایت گردد تا اطمینان حاصل شود که محیط در برابر کلیه ریزش‌ها و نشت‌ها و آلودگی‌های احتمالی محافظت می‌شود.

۵-۲ الزامات طراحی و اجرا برای کنترل آلودگی خاک‌های آلوده

موارد زیر متناسب با پروژه و تأسیسات لازم است مورد استفاده قرار گیرد:

الف- جمع‌آوری و بازیابی ریزش‌های نفت و هیدروکربن‌ها جهت کاهش انتشار و آلودگی خاک؛

ب- طراحی فرآیندهای پایین‌دستی صنعت نفت (پالایشگاه‌های نفت و میعانات گازی و کارخانه‌های پتروشیمی) با قابلیت تصفیه و بازچرخانی پساب صنعتی و باهدف کاهش حجم تخلیه احتمالی پساب صنعتی به خاک؛

پ- خروجی کلیه مخازن سپتیک^۱ و کلیه سامانه‌ها و پکیج‌های تصفیه فاضلاب بهداشتی و صنعتی لازم است به طریقی مدیریت شوند که در صورت نشت یا انتشار، مانع از آلودگی خاک محل و پیرامون آن شوند.

در مناطقی که امکان نفوذ آلودگی به خاک وجود داشته باشد یا از شرایط خاصی از جمله قرارگیری در محدوده مناطق تحت حفاظت محیط‌زیست، جوامع محلی با حساسیت بالا برخوردار باشد، لازم است موارد زیر رعایت شود:

ت- خاک دیواره و کف گودال‌های احتراقی (مانند گودال‌های سوزا) به‌طور کامل متراکم شده و با استفاده از پوشش غیرقابل نفوذ پوشانده شود. پوشش مورد استفاده باید از مقاومت کافی در برابر حرارت برخوردار باشد؛

1- Septic tank

ث- خاک دیواره و کف حوضچه‌های نگهداری یا ذخیره‌سازی سیال‌های حاوی هیدروکربن از جمله حوضچه‌های تبخیر پساب‌های صنعتی و گودال‌های هرز آب حفاری، به‌طور کامل متراکم شده و با پوشش غیرقابل نفوذ (اعم از بتن مسلح، ژئوتکستایل و ژئوممبران و سایر روش‌های مورد تأیید) پوشانده شود. در صورت استفاده از ژئوتکستایل و ژئوممبران لازم است با توجه به محل اجرا و سایر شرایط محلی، ضخامت و چگالی سطحی و سایر مشخصات فنی به‌درستی انتخاب شود؛ به‌گونه‌ای که پس از اجرا و در طول بهره‌برداری، نشتی رخ ندهد. بدیهی است که ورق‌های مورد استفاده باید حداقل‌های ذکرشده در استانداردهای ملی مرتبط را دارا بوده و فروشنده و نصاب، تضمین‌های لازم را ارائه نمایند؛

ج- باید در اطراف کلیه مخازنی که به هر نحو از مواد هیدروکربنی استفاده می‌کنند، دیوار جداکننده طبق رویه‌های جاری صنعت نفت و استانداردهای ملی مرتبط اجراشده و کف آن‌ها، ایزوله شوند؛

چ- باید هم در زمان ساخت و هم در زمان راه‌اندازی و بهره‌برداری، هرگونه رواناب که بتواند به مواد شیمیایی یا مواد هیدروکربنی آغشته شده و خاک محیط یا پایین‌دست تأسیسات را آلوده نماید، به طریق مقتضی مدیریت شود (ازجمله در نظر گرفتن مخزن یا کانال با طراحی مناسب در پایین‌دست سایت)؛

ح- باید کلیه محل‌ها و مسیرهایی که امکان نشت و ریزش مواد هیدروکربنی و مواد شیمیایی وجود دارد، پوشیده شده به‌گونه‌ای که آلودگی به زمین وارد نشود؛

خ- در خصوص حوضچه‌های تبخیر، گودال‌های هرز آب و مشابه آن‌که سیال هیدروکربنی در آن موجود می‌باشد، باید مکان‌یابی به‌گونه‌ای انجام شود که حتی در صورت نشتی یا رخ دادن مشکل در دیواره‌های آن، تدابیر لازم جهت جلوگیری از انتشار مواد آلاینده به خاک محیط و زمین‌های پایین‌دست اندیشیده شود.

۵-۳ الزامات پیشگیری از انتشار آلودگی

پیشگیری از ریزش نفت و فراورده‌های نفتی، یکی از اهداف اصلی، هم در طراحی و هم در بهره‌برداری از تأسیسات بوده و شامل مبانی طراحی تأسیسات، روش‌های بهره‌برداری و پایش دوره‌ای آن‌ها، بازرسی و پایش تأسیسات، آموزش کارکنان، بازنگری رویه‌های عملیاتی (در صورت لزوم) و طراحی مجدد تأسیسات (در صورت لزوم) می‌باشد. ازجمله الزامات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف- در نظر گرفتن دیواره‌های نفوذناپذیر در اطراف مخازن حاوی مواد اولیه، نفت خام، گازوییل و سایر فراورده‌های هیدروکربنی؛

ب- پیشگیری از ورود رواناب به مناطق فرایندی با استفاده از موانع مختلف و/یا احداث تأسیسات فرایندی در بالادست؛

پ- تصفیه رواناب آلوده در تأسیسات تصفیه فاضلاب موجود یا انتقال به تأسیسات نفتی مجاور دارای قابلیت تصفیه؛

ت- در نظر گرفتن سیستم‌های تشخیص نشتی با قابلیت تشخیص حجم کم یا سرعت‌پایین نشت از سیستم خط لوله؛

ث- استفاده مناسب از شیرآلات برای به حداقل رساندن حجم بالقوه نشت از جمله LVBها؛

- ج- برای جلوگیری از خروج بی‌رویه نفت و سایر مواد هیدروکربنی باید سازه‌های انحرافی یا محصورسازی‌های مناسب در نظر گرفته شود؛
- چ- ایجاد پوشش غیرقابل نفوذ روی خاک با استفاده از پوشش بتن مسلح، یک‌لایه خاک رس یا قیر، ورق‌های پلاستیکی (ورق‌های PVC پوشیده شده از شن، اپوکسی تقویت‌شده با فایبرگلاس) و مواد شیمیایی مخلوط شده با خاک؛
- ح- سیستم زهکش سطحی در محدوده واحد عملیاتی برای جمع‌آوری مواد هیدروکربنی و آب آلوده به آن و انتقال به شبکه فاضلاب و سپس به واحد تصفیه؛
- خ- استفاده از جوی، خندق، دیوارهای آتش یا موانع خاکی در اطراف مخازن، واحدهای فرایندی و مناطق عملیاتی برای جمع‌آوری ریزش‌ها جهت بازسازی؛
- د- محوطه مخزن، فرایند و حمل‌ونقل محصولات باید به سمت مجرای فاضلاب و چاله فاضلاب شیب بندی شده تا امکان جمع‌آوری سریع ریزش‌ها وجود داشته باشد؛
- ذ- شیرهای اطمینان و مخازن ذخیره باید در انتهای خطوط لوله برای جلوگیری و کنترل نشت نصب شود.
- ر- سیستم‌های حفاظت کاتدیک باید برای خطوط لوله و مخازن زیرزمینی نصب‌شده یا برای جلوگیری از تماس مستقیم لوله و خاک از یک پوشش پیوسته در اطراف خط لوله استفاده شود؛
- ز- در صورت امکان، کلیه خطوط لوله باید روزمینی بوده تا بازرسی و شناسایی نشت تسهیل شود؛
- ژ- گودال‌های بتنی جهت جمع‌آوری پساب‌های شیمیایی و خروجی فاضلاب‌ها در زیر نقاط دارای پتانسیل نشت و ریزش (به‌ویژه در داخل سایت) ساخته شوند؛
- س- خروجی پساب تصفیه‌شده باید به‌گونه‌ای طراحی شود که آسیب محیطی به حداقل برسد.

۴-۵ الزامات ویژه مخازن ذخیره

- در خصوص طراحی و اجرا و نصب مخازن ذخیره لازم است موارد زیر رعایت شود:
- الف- طراحی و اجرای یک مخزن ذخیره نفت یا فراورده نفتی باید با حجم ذخیره‌شده و شرایط ذخیره‌سازی مانند فشار و دما سازگار باشد؛
- ب- محصورسازی ثانویه غیرقابل نفوذ باید برای ظرفیت بزرگ‌ترین مخزن منفرد به‌علاوه مقدار کافی مجاز برای بارش و ارتفاع آزاد در نظر گرفته شود؛
- پ- مخازن فلزی جدیدی که در زیرزمین دفن شده‌اند باید توسط پوشش‌ها، حفاظت کاتدی یا سایر روش‌های مؤثر سازگار با شرایط محلی خاک، در برابر خوردگی محافظت شوند؛
- ت- استفاده از مخازن غیرفلزی، در صورت امکان و کاربردی بودن، باید مدنظر قرار گیرد؛
- ث- مخازن روزمینی باید تحت آزمایش یکپارچگی مناسب قرار گیرند. رویه‌های مناسب شامل آزمون هیدرواستاتیک، بازرسی‌های چشمی یا بازرسی‌های غیرمخرب اندازه‌گیری ضخامت پوسته است.

۵-۵ الزامات ویژه خطوط لوله

در خصوص طراحی و اجرای خطوط لوله لازم است موارد زیر رعایت شود:

الف- طراحی و اجرای خط لوله نفت یا فراورده نفتی لازم است بر اساس مبانی دقیق طراحی به‌ویژه مشخصات دقیق سیال و شرایط محیطی و اقلیمی مربوطه انجام پذیرفته و ضخامت لوله با توجه به حساسیت‌های زیست‌محیطی مسیر، محتاطانه در نظر گرفته شود؛

ب- خطوط لوله مدفون، باید توسط پوشش‌ها، حفاظت کاتدی یا سایر روش‌های مؤثر حفاظتی در برابر خوردگی محافظت شوند؛

پ- استفاده از خطوط لوله غیرفلزی، در صورت امکان و کاربردی بودن، باید مدنظر قرار گیرد؛

ت- خطوط لوله روزمینی باید تحت آزمایش یکپارچگی مناسب قرار گیرند. رویه‌های مناسب شامل آزمون هیدرواستاتیک، بازرسی‌های چشمی یا بازرسی‌های غیرمخرب اندازه‌گیری ضخامت پوسته است؛

ث- در خصوص خطوط لوله‌ای که در مجاورت منابع آب سطحی یا زیرزمینی یا مناطق حساس و تحت حفاظت محیط‌زیست می‌باشند؛ لازم است به روش‌های مهندسی و با ابزار روز، نشت سیال از خط لوله مورد پایش دقیق و مستمر قرار گیرد.

۶ روش‌های متداول کنترل آلودگی خاک

محصورسازی یک گزینه جایگزین برای تصفیه آب و خاک است که می‌تواند از هزینه‌های سنگین بالقوه تصفیه جلوگیری کند. هدف از روش‌های محصورسازی، تصفیه محیط آلوده نیست، بلکه هدف سیستم‌های محصورسازی، جداسازی به‌منظور جلوگیری از انتشار آلودگی است.

این روش‌ها با از بین بردن مسیرهای انتقال آلودگی خاک و/یا آب‌های زیرزمینی آلوده، کاهش خطر برای سلامتی، ایمنی و محیط‌زیست را موجب می‌شود.

خطر سلامتی تابعی از سمیت، غلظت و مواجهه با یک ترکیب است. محصورسازی با از بین بردن مسیرهای انتقال آلودگی، میزان مواجهه را محدود می‌کند. مواجهه شامل استنشاق، بلع و جذب پوستی است. مسیرهای انتقال آلاینده‌ها شامل بخارات گاز، آب‌های زیرزمینی یا سطحی و تماس مستقیم است. مکانیسم‌های محصورسازی برای محدود کردن مهاجرت گاز شامل آسترهایی با هدایت هیدرولیکی پایین و حذف بخار است. این مکانیسم‌ها برای محدود کردن مهاجرت آب‌های زیرزمینی شامل کاهش هدایت هیدرولیکی خاک، محدود کردن نفوذ آب به واحد محصورسازی و حذف آب از واحد (کنترل هیدرولیکی) می‌باشد. مکانیسم‌های فوق برای محدود کردن تماس مستقیم شامل موانع فیزیکی مانند پوشش‌ها و کنترل‌های مهندسی است.

متناسب با کاربرد اقتصادی و امکان‌سنجی فنی، محصورسازی می‌تواند جایگزین مطلوبی برای تصفیه باشد. در برخی موارد، حذف آلودگی یا دستیابی به اهداف تصفیه مطلوب از نظر فنی امکان‌پذیر نیست. نمونه‌هایی از مواردی که برای تصفیه آلودگی از نظر فنی عملی نیست عبارت‌اند از:

الف- آلودگی عمیق دفن شده که حفاری برای آن خطرناک بوده و/یا تصفیه آن در محل دشوار است؛

ب- انواع پسماندهای مخلوط و ترکیبات خاصی که گزینه‌های تصفیه را محدود می‌کنند؛

پ- حجم زیاد خاک آلوده، آب‌های زیرزمینی یا لجن؛

ت- آلودگی‌هایی که تماس با آن‌ها خطرناک است.

باین حال، فناوری محصورسازی به‌طور مداوم در حال بهبود است. اخیراً از آنجایی که مقررات به سمت استفاده از ارزیابی ریسک و مدیریت ریسک درازمدت می‌روند، گرایش به این فناوری افزایش یافته است. این روش ممکن است مقرون به‌صرفه‌ترین گزینه مدیریت زیست‌محیطی در سایت‌های خاص باشد. فناوری محصورسازی را می‌توان به‌طور کلی به پوشش یا آستر و موانع عمودی تقسیم کرد. فناوری پوشش و آستر اغلب مشابه است. از آسترها به‌طور کلی در زیر آلودگی برای جلوگیری از مهاجرت رو به پایین استفاده می‌شود، درحالی‌که برای جلوگیری از تماس مستقیم نفوذ، پوشش‌ها در بالای آلودگی قرار دارند. فناوری پوشش شامل پوشش خاک، لایه‌های رس و ژئوممبران‌ها است. فناوری آستر شامل آسترهای ژئوممبران و لایه‌های نفوذناپذیر زمین است.

محصورسازی می‌تواند به‌صورت در محل باشد که شامل حفاری و قرار دادن خاک آلوده در یک محل دفن پسماند است. از این روش می‌توان به همراه بازسازی در محل استفاده کرد.

استفاده از یک فناوری محصورسازی، نظارت دوره‌ای بر یکپارچگی سیستم ضروری است. هزینه‌های این نظارت باید در مقایسه با سایر فناوری‌ها در نظر گرفته شود. علاوه بر این، برنامه‌های تضمین کیفیت/کنترل کیفیت از نکات مهم در مورد این فناوری هستند.

برای بررسی اثربخشی و دوام طولانی‌مدت سیستم محصورسازی، معمولاً به نظارت دوره‌ای و نمونه‌گیری از آب و خاک نیاز است. در بیشتر موارد، هزینه‌های طولانی‌مدت برنامه نظارت، مؤلفه قابل توجهی برای برآورد هزینه خواهد بود.

برای ورق‌های ژئوممبران به‌هم‌پیوسته، کنترل کیفیت در جوشکاری ورق‌ها با یکدیگر، آزمون درزهای تکمیل شده و همچنین محافظت مناسب در برابر آسیب‌های ترافیکی بسیار مهم است.

برخی از فناوری‌های در حال ظهور شامل عایق لرزشی و دوغاب‌های میکروبی است. در زیر هر یک از این فناوری‌ها شرح داده شده است.

۱-۶ عایق لرزشی

عایق لرزشی یک روش فیزیکی است که در حال حاضر در مرحله توسعه است. ویبراتور بتونی در صورت لزوم با کمک آب فشار بالا وارد خاک می‌شود. هنگامی که در محل قرار گرفت، ارتعاشات، خاک رس را فشرده می‌کند و ترک‌ها و شکاف‌ها را می‌بندد. ویبراتورها می‌توانند به‌صورت عمودی یا با زاویه اطراف محیط آلاینده‌ها نصب شوند و یک کپسول مخروطی معکوس تشکیل دهند. مزیت‌های این تجهیزات شامل سبک بودن، نیاز تنها به دو اپراتور، سرعت بالا و عدم نیاز به حفاری خاک می‌باشد.

عایق لرزشی یک راه حل دائمی نیست. با ورود دوباره هوا به خاک رس، ترک‌ها و شکاف‌های جدیدی ایجاد می‌شود. باید احتیاط کرد زیرا ارتعاشاتی که برای بازسازی خاک رس به کاررفته است، ممکن است بر ثبات ساختاری خاک یا سازه‌های اطراف تأثیر منفی بگذارد. این ارتعاشات ممکن است پتانسیل افزایش هدایت هیدرولیکی خاک را در پی داشته باشد. محدودیت دیگر این است که عایق لرزشی به دلیل انرژی موردنیاز برای قرار دادن و پیراتور در خاک رس، فقط در مکان‌های کم عمق قابل استفاده است.

۲-۶ دوغاب میکروبی^۱

ژل‌های پلیمری میکروبی و بیوفیلیم‌ها، در حال حاضر برای استفاده به عنوان ماده دوغاب در حال بررسی هستند. دوغاب، ژل‌های پلیمری میکروبی و بیوفیلیم‌ها، از طریق گمانه‌ها یا چاه‌ها به زمین تزریق می‌شوند. درحالی که این روش‌ها در محیط آزمایشگاهی نویدبخش هستند، برای تعیین ثبات طولانی مدت، مقاومت در برابر تخریب شیمیایی یا زیستی، اثرات تغییرات pH، غلظت آلاینده، دما و مقاومت یونی به تحقیقات بیشتری نیاز است.

۱-۲-۶ ژل پلیمر میکروبی

سیستم‌های حاوی ژل پلیمر میکروبی از باکتری‌ها برای تولید ژل‌های پلیمری با گراندروی بالا استفاده می‌کنند. مخلوطی از باکتری و یک پلیمر به زمین تزریق می‌شود. سپس، باکتری‌ها از پلیمر برای تولید ژل نامحلول استفاده می‌کنند. ثابت شده که ژل در محلول آبی پایدار است و در برابر بیشتر حلال‌های آلی مقاوم است. از مزایای آن این است که سیستمی غیرسمی است و می‌توان آن را، به عنوان یک مانع موقتی طراحی کرد که نیازی به حذف ندارد. با این حال، این سیستم دارای عمر محدود است و احتمالاً به عنوان یک راه حل طولانی مدت قابل استفاده نمی‌باشد.

۲-۲-۶ بیوفیلیم‌ها (زیست لایه‌ها)

بیوفیلیم‌ها موادی آلی و سلولی (پلی ساکاریدها) هستند که از میکروارگانیسم‌های جاسازی شده در یک پلیمر خود تولید شده تشکیل شده‌اند. در صورت مهندسی صحیح، می‌توان از بیوفیلیم‌ها برای پر کردن منافذ خاک استفاده کرد. باکتری‌های گرسنه همراه با مواد مغذی به خاک تزریق می‌شوند که باعث تحریک باکتری‌ها برای تولید فیلم می‌شوند و برای پر کردن فضای منافذ گسترش می‌یابند. مطالعات نشان می‌دهد که برای حفظ بیوفیلیم به تزریق مداوم مواد مغذی نیازی نیست و حتی پس از مرگ باکتری نیز یکپارچگی بیوفیلیم حفظ می‌شود. علاوه بر این، نفوذ اسیدها، بازها یا محلول نمکی تأثیر کمی بر بیوفیلیم دارد. از مزایای این فناوری می‌توان به هزینه کم، حداقل راهبری و نگهداری و تخریب زیستی هم‌زمان برخی از آلاینده‌ها اشاره کرد. با این حال، بیوفیلیم‌ها هنوز تجربی هستند و عملکرد آن‌ها به راحتی قابل پیش‌بینی نیست. مواردی مانند مواد مغذی، سموم، pH، دما و رقابت با موجودات دیگر ممکن است تأثیر قابل توجهی بر این سیستم

1- Microbial slurry

داشته باشند. مقاومت بیوفیلیم در برابر چرخه‌های خشک و مرطوب، شرایط انجماد و ذوب و سایر مواد شیمیایی و همچنین عملکرد در انواع مختلف خاک و دوام طولانی مدت باید ارزیابی شود.

۳-۶ پوشش‌ها

پوشش یک فناوری محصورسازی است که در بالای آلودگی قرار گرفته است و برای جلوگیری از نفوذ آب باران به محیط آلوده، فرسایش محیط آلوده، مواجهه مستقیم آلودگی با انسان و محیط و مهاجرت گازها به سمت بالا طراحی شده است. آسترها در زیر آلودگی قرار می‌گیرند و به‌منظور محدود کردن مهاجرت آلودگی به سمت پایین (آب‌های زیرزمینی) طراحی شده‌اند. روکش‌ها یا آسترها می‌توانند طبیعی باشند مانند لایه‌های غیرقابل نفوذ، یا می‌توانند مواد مصنوعی باشند. متداول‌ترین پوشش‌ها شامل لایه‌های رس، ژئوممبران مصنوعی مانند HDPE^۱، ژئوتکستایل‌های بافته‌شده و پوشش‌های گیاهی است. پوشش‌های گیاهی خاک می‌توانند از تماس سطحی جلوگیری کرده و کنترل فرسایش را فراهم کنند، اما به‌خودی‌خود، قدرت محصورسازی کافی ندارند. آسترهای معمول شامل لایه‌های رس و غشاهای مصنوعی است.

۴-۶ روکش‌ها

روکش‌ها یکی از اجزای مهم بسیاری از سیستم‌های محصورسازی هستند. عملکردهای اصلی یک روکش عبارت‌اند از:

الف- نفوذ آب در واحد محصورسازی زیرین را به حداقل می‌رساند؛

ب- از فرسایش محیط‌های آلوده جلوگیری می‌کند؛

پ- از مواجهه انسان، حیوانات و گیاهان با مواد خطرناک جلوگیری می‌کند؛

ت- انتشار گازهای تولیدشده در واحد محصورسازی را کنترل می‌کند.

کاهش نفوذ آب به داخل واحد محصورسازی که می‌تواند آلاینده‌ها را حل کرده و به آب‌های زیرزمینی و سطحی منتقل کند، یکی از مهم‌ترین عملکردهای این سامانه‌هاست. زهکشی جانبی از ذخیره آب و فرایندهای تبخیر و تعرق از نفوذ بارش جلوگیری می‌کند.

یک روکش با طراحی استاندارد باید نفوذ به داخل واحد محصورسازی را به حداقل برساند. به‌طورمعمول، خط اصلی دفاع در برابر نفوذ، استفاده از لایه‌ای با هدایت هیدرولیکی پایین می‌باشد. با این حال، بررسی روکش‌های موجود نشان می‌دهد که باگذشت زمان، مسیرهای جریان می‌توانند از طرق زیر منجر به افزایش میزان نفوذ بیش‌ازحد انتظار شوند.

ث- کانال‌های ریشه گیاه و حیواناتی مثل کرم‌های خاکی و مورچه‌ها می‌توانند مجرای ایجاد کنند که انتقال سریع آب از طریق پوشش را امکان‌پذیر کنند. به همین ترتیب، ریشه‌های گیاه می‌توانند در اعماق پوشش گسترش پیدا کنند. باگذشت زمان، گیاهان می‌میرند و ریشه‌ها تخریب می‌شوند و مجاری باز را

1- High Density Poly Ethylene

باقی می‌گذارند. این عیب را می‌توان با استفاده از یک لایه سنگفرش واقع در بالای لایه زهکشی به حداقل رساند.

ج- لایه‌های خاک در حد مطلوب فشرده شوند تا اطمینان حاصل شود که کمترین هدایت هیدرولیکی حاصل می‌شود. با این حال، بسیاری از محققان اکنون بر این باورند که لایه‌های فشرده و مرطوب، بیشتر در معرض ترک‌خوردگی ناشی از خشک شدن هستند.

چ- ترک‌خوردگی و افزایش هدایت هیدرولیکی به دلیل چرخه یخ‌زدگی، انجماد و ذوب شدن باعث ترک‌خوردگی لایه‌های خاک می‌شود. علاوه بر این، هنگامی که آب وارد منافذ شده و منجمد می‌شود، منبسط‌شده و در نتیجه، فضای خالی و هدایت هیدرولیکی افزایش می‌یابد.

لایه بالایی هر پوشش باید به نحوی طراحی شود که رواناب را به حداکثر برساند، در حالی که فرسایش را به حداقل می‌رساند. روکش‌ها به طور سنتی با شیب نهایی حداقل ۳٪ برای افزایش رواناب طراحی شده‌اند؛ اما برای به حداقل رساندن فرسایش خاک لازم است به ۵٪ محدود شود. در مناطقی که ممکن است شیب‌های تندتری برای استقرار لازم باشد، فرسایش خاک پوششی لایه نهایی باید به ۵/۵ تن در هکتار در سال محدود شود.

در مناطقی که به راحتی می‌توان گیاهان را ایجاد و حفظ کرد، پوشش گیاهی روش ارجح برای به حداقل رساندن فرسایش است. پوشش گیاهی باید یک گیاه چندساله متناسب با محل باشد که در برابر خشکسالی، تغییرات دما و کمبود مواد مغذی بسیار مقاوم بوده و همچنین بتواند با نگهداری کم یا بدون نگهداری زنده بماند.

در مناطقی که آب‌وهوا امکان پوشش گیاهی پایدار را فراهم نمی‌کند، می‌توان از یک ماده سخت مانند سنگ شکسته یا سنگفرش استفاده شود. این پوشش باید بتواند در هنگام بارش و باد شدید در جای خود باقی بماند.

زهکشی جانبی درون مواد پوششی را می‌توان با استفاده از لایه(های) زهکشی جانبی افزایش داد. لایه‌های زهکشی جانبی باید با موادی ساخته شوند که دارای هدایت هیدرولیکی حداقل ۲ cm/s تا ۱۰ cm/s و حداقل شیب ۳٪ در پایین لایه باشند. باید از مواد دانه‌ای با قطر بیشتر از ۰/۹۵cm یا مواد ژئوسنتتیک استفاده شود.

استفاده از پوشش گیاهی ریشه کم‌عمق می‌تواند به جلوگیری از کاهش زهکشی کمک کند. لایه‌های گرانول یا ژئوسنتتیک را می‌توان در بالای لایه زهکشی نصب کرد تا از گرفتگی منافذ ریز جلوگیری کند. در مکان‌های خشک، جایی که تبخیر و تعرق غالب است، الزامی بر استفاده از لایه‌های زهکشی جانبی نیست.

تبخیر و تعرق اصطلاحی جمعی است که به بازگشت آب مایع به جو در اثر تبخیر فیزیکی و/یا فرایندهای تعرق گیاه اشاره دارد. نشان داده شده است که تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌ها برای جلوگیری از ورود آب به واحد محصورسازی به‌ویژه در محیط‌های خشک است. در آب و هوای خشک، تبخیر و تعرق می‌تواند ۸۰٪ یا بیشتر از نفوذ آب ناشی از بارندگی در واحد محصورشده را حذف کند.

مطالعات نشان داده است که افزایش شیب سطح یک روکش (به سمت نور مستقیم خورشید) می‌تواند به‌طور محسوسی تبخیر مستقیم را افزایش دهد. با حفظ پوشش گیاهی متراکم می‌توان تبخیر غیرمستقیم را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد. علاوه بر انتقال آب به اتمسفر در طول فتوسنتز، یک پوشش گیاهی متراکم با قطع و ذخیره بارش بر روی برگ‌ها تا زمان تبخیر، باعث کاهش نفوذ آب در خاک می‌شود.

۵-۶ طرح‌های متداول پوشش

الف- پوشش‌های چندلایه، یک سیستم چندلایه از بالا به پایین متشکل است از:

- یک لایه بالایی شامل دو جزء: (۱) یک جزء سطحی رویشی یا مسلح برای کنترل میزان فرسایش خاک تا ۵/۵ تن در هکتار در سال و (۲) یک جزء خاک با حداقل ضخامت ۶۰ cm. اگر این پوشش از پوشش گیاهی حمایت می‌کند، باید حداقل از ۱۵ cm از خاک بالایی استفاده شود.
- یک لایه زهکشی گرانول یا ژئوسنتتیک با حداقل ضخامت ۳۰ cm و حداقل هدایت هیدرولیکی 0.1 cm/s . یک لایه دوجزئی با هدایت هیدرولیکی کم شامل یک آستر غشای انعطاف‌پذیر با ضخامت ۳۰ mm تا ۶۰ mm و یک لایه خاک متراکم با ضخامت ۶۰ cm با هدایت هیدرولیکی اشباع در محل کمتر از 10^{-7} cm/s .

زمان: ۳۵ ساعت برای هر هکتار.

مزیت: توسعه‌یافتگی و راندمان اولیه بالا.

عیب: هزینه ساخت بالا، احتمال نیاز به تأمین رس مدنظر از فواصل دور، احتمال ترک‌خوردگی رس در هوای خشک و زیر سؤال بودن راندمان درازمدت.

مطالعه اخیر در مورد پوشش‌های متداول چندلایه نشان داد که ۷۲٪ تا ۸۶٪ از کار افتاده‌اند. مشخص شده است که لایه‌های رس به‌ویژه در محیط‌های خشک، به ترک‌خوردگی حساس هستند.

ب- پوشش خاک، بهتر است پوشش نهایی از بالا به پایین شامل لایه‌های زیر باشد:

- ۱۵ cm خاک برای رشد گیاه و به حداقل رساندن فرسایش؛

- ۴۵ cm خاک فشرده.

پوشش نهایی باید دارای هدایت هیدرولیکی کمتر یا مساوی با هدایت هیدرولیکی لایه زیرین یا کمتر از 10^{-5} cm/s باشد. اگر سرعت نفوذ از زهکشی بیشتر باشد، واحد محصورسازی با آب پر می‌شود.

زمان: ۵۰ ساعت برای هر هکتار.

مزیت: توسعه‌یافتگی و هزینه ساخت کم.

عیب: استعداد ترک‌خوردگی رس در هوای خشک، کنترل ناکافی بر نفوذ.

۶-۶ طرح‌های پوشش جایگزین

تجربه نشان داده است که طرح‌های چندلایه، از نظر اجرایی پرهزینه و سخت بوده و در برابر ترک‌خوردگی ناشی از خشک شدن، به‌ویژه در محیط‌های خشک آسیب‌پذیر هستند. طرح‌های پوششی جایگزین دارای ویژگی‌های زیر هستند:

الف- هزینه کمتر نسبت به روش‌های سنتی؛

ب- مؤثرتر از روش‌های سنتی؛

پ- ساخت آسان‌تر و قابل‌اعتمادتر.

روکش‌های آستری ژئوسنتتیک، طرح و اصل کلی پوشش آستر مصنوعی بسیار شبیه به پوشش متداول چندلایه است؛ مانند پوشش چندلایه، روکش‌های مصنوعی آستر برای جلوگیری از نفوذ به ویژگی‌های مقاومت یک‌لایه مانع متکی هستند. در مورد پوشش‌های آستر مصنوعی، لایه رس با یک صفحه ژئوتکستایل پیش‌ساخته جایگزین می‌شود. متداول‌ترین آستر مصنوعی، آستر رسی ژئوسنتتیک است. GCL ها معمولاً از یک ورق خاک رس بنتونیت تشکیل می‌شوند، ضخامت تقریبی ۶ mm که بین دو پارچه بافته‌نشده قرار گرفته است.

زمان: ۲۵ ساعت برای هر هکتار.

مزیت: طراحی فشرده، ارزان‌تر بودن نسبت به پوشش‌های متداول چندلایه، عدم نیاز به اشباع بودن مواد. عیب: استعداد آسیب‌دیدگی ورق‌های مصنوعی نازک بر اثر فعالیت‌های ساخت و ریشه‌های گیاهان، استعداد ترک‌خوردگی رس در هوای خشک، آسیب‌دیدگی ورق GCL در صورت عدم قرار داشتن پوشش مصنوعی در بالای آن.

۶-۷ پوشش تبخیر و تعرق

پوشش تبخیر و تعرق که به آن سیستم‌های پوشش گیاهی خاک و پوشش‌های رویشی نیز گفته می‌شود، از یک‌لایه خاک یکپارچه و گیاهی تشکیل شده است. باین‌حال، به‌جای استاندارد ۶۰ cm خاک بومی، از ترکیب مطلوب بافت خاک، ضخامت خاک و پوشش گیاهی برای به حداکثر رساندن تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. در مناطقی که تبخیر و تعرق بیش از میزان بارندگی است، می‌توان با تهیه یک پوشش کاملاً عمیق از خاک برای ذخیره بارندگی، از آلودگی دفن‌شده جلوگیری کرد تا این‌که با تبخیر و تعرق از بین برود. لایه خاک برای ذخیره آب کافی از بارندگی سنگین طراحی شده است تا قبل از نفوذ، تبخیر شود. ضخامت خاک به ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثر آب و آب و هوای محلی بستگی دارد.

زمان: ۵۰ ساعت تا ۸۰ ساعت برای هر هکتار.

مزیت: ارزان‌تر بودن نسبت به پوشش‌های متداول چندلایه، عدم نیاز به اشباع بودن مواد، تبدیل شدن محدوده به محیطی مناسب برای حیات وحش به علت پوشش گیاهی.

عیب: استعداد زیاد شکست با توجه به عدم وجود موانع و زهکش‌های جانبی، عدم امکان رشد عمیق ریشه‌ها و توسعه ریشه‌های گیاهان در صورت موانع رشد ریشه، کاهش عملکرد در آب‌وهوای بسیار خشک یا سرد به علت وابستگی به تراکم پوشش گیاهی، رشد گسترده گیاهان بومی ناخواسته، حساسیت زیاد پوشش گیاهی به گاز تولیدشده ناشی از تجزیه آلودگی‌های آلی، هزینه بالا در آب‌وهوای نیمه‌خشک به علت نیاز به یک‌لایه ضخیم خاک.

۸-۶ پوشش‌های مهندسی زیستی

پوشش‌های موقتی هستند و در سایت‌هایی که انتظار می‌رود فرونشست در آن‌ها، متوسط یا گسترده باشد، نصب می‌شوند. پوشش‌های مهندسی زیستی از نوارهای پوششی متناوب نفوذناپذیر (به عنوان مثال ورق‌های ژئوممبران) و پوشش گیاهی تحت تنش خشکی استفاده می‌کنند تا نفوذ را به حداقل برسانند. پوشش غیرقابل نفوذ، میزان زیاد و کنترل‌شده‌ای از رواناب را فراهم می‌کند، درحالی‌که پوشش ریشه گیاهی زیر پوشش نفوذناپذیر گسترش می‌یابد تا خاک‌های سطح را آگیری کند. پوشش‌های مهندسی زیستی شبیه پارکینگ‌هایی است که درختان و درختچه‌ها در جزایر احاطه‌شده توسط آسفالت یا بتن کاشته می‌شوند. زمان: ۲۵ ساعت برای هر هکتار.

مزیت: ارزان‌تر بودن نسبت به پوشش‌های متداول چندلایه، عدم نیاز به اشباع بودن مواد، رفع شدن نشست‌ها به سادگی و با هزینه کم به علت روزمینی بودن.

عیب: امکان تخریب لایه‌های نفوذناپذیر به علت قرار داشتن در معرض باد و تابش مستقیم نور خورشید، نیاز به تأسیسات مدیریت سیلاب، رشد گسترده گیاهان بومی ناخواسته، حساسیت زیاد پوشش گیاهی به گاز تولیدشده ناشی از تجزیه آلودگی‌های آلی.

۷ روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده

۱-۷ کلیات بازسازی خاک

با وجود استفاده از سیستم‌های محصورسازی و پیشگیری از وقوع آلودگی، آلودگی خاک به دلایل مختلف رخ می‌دهد. این بخش در خصوص انتخاب فناوری بازسازی خاک‌های آلوده پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های پتروشیمی، واحدهای بهره‌برداری، چاه‌های نفت و گاز و سایر تأسیسات صنعت نفت، اعم از روش‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا روش‌های ترکیبی می‌باشد. البته با توجه به هدف اصلی این استاندارد، صرفاً رئوس مطالب ذکر می‌شود. برای آگاهی بیشتر به پیوست الف مراجعه شود.

۲-۷ فرایند انتخاب فناوری

برای یک سناریوی آلودگی خاک، اغلب هیچ فناوری بازسازی منحصر به فرد مشخصی وجود ندارد. به طور کلی، چندین فناوری ممکن است قابل اجرا باشد. در شکل ۱، فناوری‌هایی با توجه به کاربرد آن‌ها برای نوع هیدروکربن موجود، تجربیات موفق و هزینه مقایسه می‌شود.

آزمون‌های میدانی هر زمان که مفید واقع شوند، مخصوصاً برای فناوری‌های در محل باید انجام شود؛ زیرا ویژگی‌های سایت اغلب در بخش‌های مختلف منطقه تصفیه متفاوت است. خاک آلوده به‌طور معمول از نظر خواص، یک‌دست نیست و فناوری انتخاب‌شده باید بتواند خاک را در سراسر منطقه آلوده تصفیه کند.

در صورت وجود آلاینده‌های متعدد (مثلاً فلزات و هیدروکربن)، ممکن است بیش از یک فناوری تصفیه موردنیاز باشد. به‌عنوان مثال، درحالی‌که تصفیه زیستی یا دفع حرارتی، آلودگی هیدروکربن را حذف می‌کند، بر فلزات تأثیر نمی‌گذارد یا فناوری خاک‌شویی در حذف هیدروکربن به‌خوبی عمل نکرده، اما فلزات را حذف می‌کند.

در برخی موارد، مانند بازسازی بسیاری از نشت‌های مخازن ذخیره زیرزمینی، سایت دارای یک یا دو آلاینده شاخص با تأثیرات محدود به یک منطقه مشخص است. در این شرایط، انتخاب فناوری می‌تواند ساده باشد. برای موارد دیگر مانند سایت‌های دارای هیدروژئولوژی پیچیده، ممکن است به یک برنامه ارزیابی فناوری جامع نیاز باشد.

هیدروکربن		بنزین	JP/4	کروسن هواپیما	گازوئیل	پرش نفتی سبک 1 و 2	پرش نفتی سنگین 3 و 4	پرش نفتی سنگین 6	گازوئیل سنگین	روغن روان کننده	نفت خام سنگین	نفت خام سبک	تأمینده مخازن نفتی	نفت/ روغن مصرف شده
فناوری	در محل	شستشوی زیستی	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	■	■
		زیست‌بالایی طبیعی و کاهش اثر طبیعی	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	(۱)	—
		تهویه زیستی	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
در محل یا خارج از محل		شیشه‌گون‌سازی	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
		استخراج بخار خاک	○	○	○	○	□	—	—	—	—	—	—	—
		تصفیه زمین	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—
از محل		تثبیت/ جامدسازی	■	■	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		تصفیه/ دفع	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
		خاک‌شویی	—	—	—	●	●	●	●	●	●	●	—	—
		استفاده مجدد	—	—	—	●	●	●	●	●	●	●	—	—
		بایوبایل	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	—	—
		دفع حرارتی	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—	—	—
از محل		سوزاندن	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

میزان استفاده

هزینه به ازای هر یارد مکعب

- کم (کمتر از ۵۰ دلار در تن)
 متوسط (بین ۵۰ تا ۱۵۰ دلار در تن)
 زیاد (بیشتر از ۱۵۰ دلار در تن)

وضعیت	زیاد	متوسط	کم
اثبات شده	○	○	○
در حال توسعه	□	□	□
در دست پژوهش	◇	◇	◇

(۱) نشان می‌دهد که فناوری برای این

هیدروکربن خاص کاربردی نیست.

شکل ۱- کاربرد فناوری بازسازی در برابر انواع هیدروکربن

۳-۷ فناوری‌های بازسازی خاک

همان‌طور که در شکل ۱ آمده است، روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده به دو دسته فناوری‌های در محل و خارج از محل تقسیم می‌شوند.

الف- فناوری‌های در محل

برخی از فناوری‌های در محل به‌قرار زیر هستند:

- (۱) شستشوی زیستی؛
- (۲) روش‌های زیست پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی؛
- (۳) تهویه زیستی؛
- (۴) شیشه‌گون‌سازی.

ب- فناوری‌های خارج از محل / در محل

برخی از فناوری‌هایی که می‌توانند به‌صورت در محل یا خارج از محل استفاده شوند به‌قرار زیر هستند:

- (۱) استخراج بخار خاک؛
- (۲) تصفیه زمین؛
- (۳) تثبیت / جامدسازی.

پ- فناوری‌های خارج از محل

برخی از فناوری‌های خارج از محل به‌قرار زیر می‌باشند:

- (۱) تصفیه / دفع خارج از محل؛
- (۲) بایوپایل؛
- (۳) خاک‌شویی؛
- (۴) استفاده مجدد؛
- (۵) دفع حرارتی؛
- (۶) سوزاندن.

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

روش‌ها و فناوری‌های بازسازی خاک آلوده

در این پیوست، روش‌ها و فناوری‌های بازسازی خاک‌های آلوده ناشی از فعالیت‌های صنعت نفت، معایب و مزایا، خاک‌ها و هیدروکربن‌های هدف و زمان به‌اختصار آورده شده است.

الف- ۱ فناوری‌های بازسازی خاک

باتوجه به شکل ۱، روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده به دو دسته فناوری‌های در محل و خارج از محل تقسیم می‌شوند.

موقعیتی که بازسازی در آن انجام می‌شود باید دارای حداقل ویژگی‌های زیر باشد:

- قرار داشتن در خارج از بستر آبراهه و سایر جریان‌های سطحی؛
 - قرار داشتن در خارج از اراضی کشاورزی؛
 - قرار داشتن در خارج از اراضی جنگلی؛
 - قرار داشتن در خارج از حوزه آبریز بلافاصله سدهای تأمین آب شرب؛
 - فاصله بیش از ۲ m از سطح سفره‌های آب زیرزمینی منطقه.
- به بند [۱] کتاب‌نامه مراجعه شود.

الف- ۲ فناوری‌های در محل

به برخی از فناوری‌های در محل به‌اختصار اشاره شده است.

الف- ۲- ۱ شستشوی زیستی

شستشوی زیستی عبارت است از تصفیه در محل خاک اشباع‌نشده و آب‌های زیرزمینی با تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های طبیعی که از طریق گردش مجدد آب‌های زیرزمینی حاوی اکسیژن و مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) ایجاد می‌شود. آب‌های آلوده زیرزمینی از طریق سیستم بازیابی به سطح آورده می‌شوند. مواد مغذی و هوا اضافه می‌شود. در صورت لزوم pH تنظیم می‌شود. سپس آب مجدداً تزریق می‌شود یا اجازه می‌دهد تا از طریق ناحیه خاک برای تصفیه نفوذ کند. این فرایند معمولاً به‌صورت هوازی انجام می‌شود.

رساندن مؤثر مواد مغذی و اکسیژن به سطح زیرزمین، یک نکته کلیدی در طراحی است. از آنجا که سطح اکسیژن محلول به ۸ mg/l تا ۱۲ mg/l محدود می‌شود، این روش محدود به مکان‌هایی با سطوح پایین آلودگی یا جایی است که زمان بازسازی اولویت بالایی ندارد. می‌توان از اکسیژن خالص (حداکثر ۵۸ mg/l)

یا پراکسید هیدروژن (۹۰ mg/l تا ۲۰۰ mg/l) برای انتقال سطوح بالاتر اکسیژن استفاده کرد. تقریباً ۳ kg اکسیژن برای تجزیه زیستی ۱ kg هیدروکربن مورد نیاز است. در جدول الف-۱ معایب و مزایای فناوری شستشوی زیستی ارائه شده است.

جدول الف-۱- معایب و مزایای شستشوی زیستی

مزایا	معایب
فناوری تصفیه نسبتاً ارزان قیمت	به زمان زیادی (تا چندین سال) نیاز دارد تا تکمیل شود
امکان تصفیه همزمان خاک و آب زیرزمینی	راندمان بازسازی به نوع هیدروکربن بستگی دارد
نیاز حداقلی به نیروی کار و تجهیزات	احتمال انتقال آلاینده‌ها به سفره آب زیرزمینی
عدم وجود باقی مانده جهت تصفیه یا دفع آبی	مشکل رساندن اکسیژن و مواد مغذی در خاک‌های با نفوذپذیری کم یا ناهمگون
حفاری محدود	سمی بودن فلزات برای فعالیت‌های میکروارگانیسم‌ها
منطقه تصفیه: منطقه خاک غیراشباع و سفره‌های آب کم عمق	

آلاینده‌های هدف در این فناوری شامل: مواد آلی فرار و نیمه فرار، هیدروکربن‌های نفتی سبک تا متوسط-بنزین، نفت سفید، دیزل، جت، روغن حرارتی هستند. روغن‌های خام یا سنگین هوازده نیاز به زمان بیشتری برای تصفیه دارند.

بهترین شرایط خاک برای کاربرد این فناوری خاک‌های یک‌دست، خاک‌های دارای ماسه زیاد، رسانایی هیدرولیکی ۱۰-۴ cm/s یا بیشتر هستند.

با کاربرد این فناوری، میزان بازسازی TPH از ۵۰۰ ppm تا ۲۰۰۰ ppm در خاک می‌تواند به دست آید.

زمان تصفیه در این فناوری معمولاً طولانی است، ۶ ماه تا ۶ سال.

هزینه تصفیه در این فناوری متوسط است و بستگی به غلظت و انواع آلاینده‌ها، روش انتقال اکسیژن و شرایط خاک دارد.

الف-۲- روش‌های زیست‌پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی

روش‌های زیست‌پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی معمولاً در شرایطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که جرم آلاینده به اندازه کافی کوچک است تا در یک بازه زمانی مناسب کاهش یافته و از بین برود. اقدامات فعال مانند تهویه زیستی یا حفاری و تصفیه خارج از محل ممکن است برای بازسازی خاک‌هایی با غلظت بالای هیدروکربن‌ها انجام شود، این روش‌ها اغلب به علت در دسترس بودن اکسیژن یا مواد مغذی محدود می‌شود. در جدول الف-۲ معایب و مزایای فناوری زیست‌پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی ارائه شده است.

جدول الف-۲- معایب و مزایای زیست پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی

مزایا	معایب
هزینه کم	فرایند بازسازی، طولانی است. نیاز به پایش درازمدت دارد
حداقل نیاز به نیروی انسانی و ابزار پایش	ممکن است بازدهی بازسازی، زیاد نباشد
عدم مواجهه کارگران	احتمال محدود شدن کاربری زمین در آینده
منطقه تصفیه: خاک اشباع نشده و خاک اشباع شده	

آلاینده‌های هدف در این فناوری شامل: هیدروکربن‌های سبک‌تر، مانند BTEX یا سایر ترکیبات C3 تا C10، محلول‌تر هستند و از این‌رو با فرار شدن و شستشو از بین می‌روند. هیدروکربن‌های سبک‌تر نیز مستعد تجزیه زیستی هستند. تجزیه زیستی هیدروکربن‌های سنگین‌تر (C10+) در بازه‌های زمانی طولانی‌تری رخ می‌دهد.

بهترین شرایط خاک برای کاربرد این فناوری نفوذپذیری کم خاک‌ها است که انتقال آلاینده‌ها را به حداقل می‌رساند، اما فعالیت زیستی را نیز محدود می‌کند. هرچه عمق آب‌های زیرزمینی بیشتر باشد، احتمال آلودگی آب کمتر می‌شود.

در این فناوری اجزایی که فشار بخار یا حلالیت پایینی دارند و آن‌هایی که به‌شدت به ذرات خاک جذب می‌شوند، کندتر بازسازی می‌شوند. هیدروکربن‌های با وزن مولکولی کمتر سریع‌تر تضعیف می‌شوند و همچنین مستعد تجزیه زیستی هستند.

کاربرد این فناوری در آب‌های زیرزمینی برای برخی از آلاینده‌ها مانند بنزین، گازوئیل و اجزای آن‌ها ثابت شده است. آزمون سایر آلاینده‌ها در حال انجام است. هنوز به‌طور گسترده برای خاک پذیرفته نشده است.

زمان تصفیه در این فناوری در حد چندین سال بوده، که نظارت ممکن است برای چند دهه ادامه یابد.

هزینه این فناوری کم است. هزینه‌های عمده برای نظارت است.

الف-۲-۳ تهویه زیستی

تهویه زیستی، فرآیند تأمین حجم کم هوا در ناحیه اشباع نشده برای تجزیه زیستی هوازی است. هوا را می‌توان با تزریق از طریق گمانه‌ها یا با استفاده از فن‌های خلأ برای استخراج مستقیم هوا از سطح یا از طریق چاه‌های نفوذ یا ترانشه‌ها تأمین کرد. این فناوری از طریق استخراج بخار خاک توسعه یافته است. مشخص شده که فراریت به‌تنهایی قادر به کاهش آلاینده‌های مشاهده شده در سیستم‌های استخراج بخار خاک نمی‌باشد. از آنجایی که تهویه زیستی با تحریک فعالیت میکروبی در خاک‌های زیرسطحی عمل می‌کند، موفقیت این فناوری به نوسانات آلاینده‌ها بستگی ندارد. هر دو ترکیب فرار و نیمه فرار می‌توانند بازسازی شوند.

تهویه زیستی با موفقیت در چندین موقعیت نفوذپذیری کم خاک اعمال شده است. در خاک‌های با نفوذپذیری پایین، ممکن است با شکستن پنوماتیک یا هیدرولیکی، جریان هوا افزایش یابد. در جدول الف-۳ معایب و مزایای فناوری تهویه زیستی ارائه شده است.

جدول الف-۳- معایب و مزایای تهویه زیستی

مزایا	معایب
هزینه کم	کاربرد محدود برای رس‌های فشرده و لای‌ها
نیاز محدود به خاک‌برداری	اتصال کوتاه احتمالی هوا در تأسیسات زیرسطحی مانند لوله‌ها
نیاز کم به تجهیزات	تجزیه زیستی کند است.
عدم نیاز به افزودن مواد مغذی	عدم دستیابی به حد بالای تصفیه در مورد هیدروکربن‌های سنگین
نیاز حداقلی به اپراتور	
عدم نیاز به تصفیه گاز نامرغوب	
منطقه تصفیه: خاک غیراشباع	

آلاینده‌های هدف در این فناوری شامل: ترکیبات آلی زیست‌تخریب‌پذیر مانند BTEX، PAH، الفین‌ها یا پارافین‌ها. افزودن مواد مغذی می‌تواند نرخ تخریب ترکیبات سبک و سنگین را بهبود بخشد.

بهترین شرایط خاک برای کاربرد این فناوری خاک با نفوذپذیری بالا است.

میزان تأثیر بازسازی این فناوری برای ترکیبات سبک‌تر و آسان‌تر تجزیه شونده مناسب است، مانند BTEX یا سایر هیدروکربن‌های سبک (C3 تا C10). با افزایش وزن مولکولی ترکیبات یا کاهش مقدار هیدروکربن‌های سبک در مخلوط، اثربخشی کاهش می‌یابد.

کاربرد فناوری برای هیدروکربن‌های سبک‌تر ثابت شده است.

زمان تصفیه در این فناوری بسته به نرخ تجزیه زیستی آلاینده‌ها از ماه‌ها تا سال‌ها متغیر است.

هزینه تصفیه در این فناوری کم تا متوسط است.

الف-۲- شیشه گون‌سازی

این فرآیند تصفیه حرارتی، خاک‌آلوده را به یک ماده خنثای شیمیایی و کریستالی پایدار تبدیل می‌کند و از مقاومت الکتریکی برای گرم کردن خاک تا دمای بسیار بالا (1600°C تا 2000°C) استفاده می‌کند. آلودگی‌های آلی با پیرولیز (تخریب حرارتی در دماهای بالا در غیاب اکسیژن) از بین می‌روند. آلاینده‌های غیرآلی در داخل ماتریس شیشه‌ای ایجادشده به دام افتاده‌اند. بخارآب و محصولات پیرولیز در هود گرفته می‌شوند و برای تصفیه خارج می‌شوند.

دمای بالا با استفاده از یک آرایه مربع از چهار الکتروود گرافیتی که تا عمق دلخواه در خاک وارد می‌شوند، حاصل می‌شود. یک مسیر رسانا (گرافیت و شیشه پوسته‌پوسته‌شده) بین الکتروودها روی زمین قرار می‌گیرد تا پس از خروج رطوبت خاک، مسیر رسانایی را حفظ کند. با اعمال جریان الکتریکی به الکتروودها، حرارت مقاومتی رسانا، خاک را به دمای ذوب می‌رساند. خاک با ذوب شدن رسانا می‌شود و ناحیه مذاب به پایین به رشد خود ادامه می‌دهد. ترکیبات آلی پیرولیز شده به سطح زمین مهاجرت می‌کنند و در آنجا در حضور اکسیژن اکسید می‌شوند.

شیشه‌گون‌سازی در محل منجر به کاهش ۲۵٪ تا ۳۰٪ حجم خاک تحت تصفیه می‌شود.

این فرایند برای مکان‌های حاوی آلودگی‌های مدفون مانند ظروف خاک‌آلوده، مخازن حاوی لجن خطرناک یا لجن‌های فرایندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فلزات مدفون که تا ۹۰٪ مسیر رسانایی یا ۵٪ از منطقه تصفیه را اشغال کرده‌اند، در روند گرمایش الکتریکی تداخل قابل‌ملاحظه‌ای نخواهد داشت. این تصفیه با عمق آب‌های زیرزمینی یا خاک‌های نزدیک نقطه اشباع محدود می‌شود. در جدول الف-۴ معایب و مزایای فناوری شیشه‌گون‌سازی ارائه شده است.

جدول الف-۴- معایب و مزایای شیشه‌گون‌سازی

مزایا	معایب
با توجه به در محل بودن، نیازی به خاک‌برداری ندارد.	غلظت بالای آب و مواد آلی می‌تواند دستگاه‌های کنترل انتشار را به شدت تحت تأثیر قرار دهد.
تصفیه هم‌زمان ترکیبات آلی و معدنی	مهاجرت ترکیبات فرار و فلزات، می‌تواند باعث انتشار آلاینده‌ها در پایین ناحیه تصفیه شود.
ایمنی زیستی طولانی مدت تجهیزات شیشه‌ای شده	مقادیر زیاد فلزات، می‌تواند موجب اتصال کوتاه بین الکترودها شود.
	محدودیت عمق به ۱۵ m
	جرم شیشه‌ای شده، ممکن است بر کاربری آینده محل مؤثر باشد.
منطقه تصفیه: خاک‌های غیراشباع تا حداکثر عمق ۱۵ m. مساحت تا حدود ۵۰٪ فراتر از فاصله الکترودها گسترش می‌یابد.	

آلاینده‌های هدف در این فناوری شامل: همه آلاینده‌های آلی و معدنی. تجربه کمی در زمینه تصفیه غلظت بالای آلاینده‌های فرار وجود دارد.

بهترین شرایط خاک برای کاربرد این فناوری، خاک‌های غیراشباع با نفوذپذیری کم تا متوسط. وجود آب‌های زیرزمینی یا خاک‌های بسیار نفوذپذیر، عملکرد اقتصادی این فرایند را محدود می‌کند، زیرا مقدار زیادی انرژی برای خروج از آب مورد نیاز است.

در اثربخشی بازسازی می‌توان اشاره نمود که فناوری مواد آلی را از بین می‌برد یا حذف می‌کند و ترکیبات آلی باقی‌مانده و اکثر ترکیبات معدنی را تثبیت می‌کند.

این فناوری در مقیاس آزمایشی و صنعتی اثبات شده است.

زمان تصفیه با کاربرد این فناوری برای فرایند مذاب‌سازی تقریباً ۴ تا ۶ تن در ساعت است.

هزینه تصفیه در این فناوری بالا است.

الف-۳ فناوری‌های خارج از محل / در محل

در زیر به برخی از فناوری‌هایی که ممکن است به صورت در محل یا خارج از محل استفاده شوند به اختصار اشاره شده است.

الف-۳-۱ استخراج بخار خاک

این روش از انتقال فاز بخار برای حذف فیزیکی ترکیبات آلی فرار از منطقه غیراشباع استفاده می‌کند. این فرایند معمولاً در محل اعمال می‌شود، اما می‌تواند به عنوان پایلوت خارج از محل نیز ساخته شود. این فناوری وقتی در محل استفاده می‌شود، معمولاً از چاه‌های عمودی استخراج به تنهایی یا در ترکیب با چاه‌های تزریق هوا برای انتقال هوا از طریق منطقه آلوده استفاده می‌کند. از نظر مفهومی، طراحی این سیستم در محل شبیه به مواردی است که برای تهویه زیستی استفاده می‌شود.

هنگامی که به صورت خارج از محل اعمال می‌شود، از یک لوله‌کشی مشابه بایوپایل استفاده می‌شود.

این بازسازی برای فناوری در محل نسبتاً سریع است و معمولاً به ۳ ماه تا ۳ سال کار نیاز دارد (مدت زمان بیشتری برای مواد نیمه فرار، خاک‌های کم نفوذپذیر یا معیارهای بازسازی سخت‌تر).

تزریق بخار یا هوای گرم برای افزایش دامنه آلودگی‌هایی که می‌توانند به عنوان بخار استخراج شوند، استفاده شده است. حرکت هوا در منطقه تصفیه، غلظت اکسیژن زیرسطحی را افزایش می‌دهد که بسته به آلاینده‌ها و جمعیت‌های میکروبی موجود، می‌تواند نرخ تجزیه زیستی در محل را افزایش دهد. در جدول الف-۵ معایب و مزایای فناوری استخراج بخار خاک ارائه شده است.

جدول الف-۵- معایب و مزایای استخراج بخار خاک

مزایا	معایب
قابل استفاده برای تصفیه آب زیرزمینی	تنها بر ترکیبات آلی فرار مؤثر است
هزینه کم	عدم تأثیر بر زیر سفره آب
امکان اجرا در نزدیکی ساختمان‌ها و تأسیسات	عملکرد تحت تأثیر شرایط خاک از جمله نفوذپذیری کم و دانه‌بندی غیریکنواخت است.
نیاز کم به نیروی انسانی و تجهیزات	طولانی مدت برای خارج از محل
	منطقه تصفیه: خاک غیراشباع

آلاینده‌های هدف در این فناوری شامل: ترکیبات آلی فرار است.

این فناوری در خاک‌های با نفوذپذیری بالا بهترین عملکرد را دارد.

میزان بازسازی در این فناوری برای ترکیبات فرار بسیار زیاد است. ترکیبات غیر فرار به صورت فیزیکی حذف نمی‌شوند، اما ممکن است تخریب زیستی شوند.

این فناوری به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. فناوری متداول برای خاک های آلوده شده ناشی از نشت مخازن زیرزمینی ذخیره سازی بنزین و گازوییل. مدت زمان تصفیه در این فناوری ۳ ماه تا ۳ سال است. هزینه تصفیه در این فناوری کم است.

الف-۳-۲ تصفیه زمین

تصفیه زمین یک فناوری تجزیه زیستی خاک با فاز جامد است که می تواند در محل یا خارج از محل مورد استفاده قرار گیرد. هدف تصفیه زمین این است که خاک با افزایش جمعیت بومی میکروب های تجزیه کننده تصفیه شود، به طوری که تجزیه زیستی خیلی سریع تر از شرایط عادی رخ دهد. خاک تا حداکثر عمق ۰/۶ m تصفیه می شود. تصفیه معمولاً شامل خاک برداری دوره ای (هوادهی)، افزودن دوره ای مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و کنترل رطوبت و pH است. کنترل رواناب و جمع آوری شیرابه نیز ممکن است در نظر گرفته شود.

استفاده در محل از این فناوری با کمترین هزینه تصفیه امکان پذیر است. هنگامی که به صورت در محل به کار گرفته می شود، عملیات بسیار شبیه به روش لندفارمینگ^۱ پسماندهای پالایشگاهی است. تجزیه زیستی خاک می تواند تا ۷۰٪ هیدروکربن های سنگین را کاهش دهد. همچنین کاهش شدید PAH نیز به دست می آید. اگر فضا یا زمان محدود باشد، بایوپایل های مهندسی شده کاربرد بیشتری دارند. در جدول الف-۶ معایب و مزایای فناوری تصفیه زمین ارائه شده است.

جدول الف-۶- معایب و مزایای تصفیه زمین

مزایا	معایب
هزینه کم به ویژه در حالت در محل	طولانی مدت
حداقل نیاز به نیروی انسانی و تجهیزات	نیاز به زمین بزرگ
قابل کاربرد برای هیدروکربن های سنگین	عدم امکان دستیابی به حد بالای بازسازی
منطقه تصفیه: خاک غیراشباع. هنگامی که در محل اعمال می شود، محدود به عمق ۶۰ cm است.	

آلاینده های هدف در کاربرد این فناوری آلاینده های آلی زیست تجزیه پذیر از جمله تمام هیدروکربن ها هستند.

بهترین شرایط خاک در استفاده از این فناوری خاک با نفوذپذیری بالا و رطوبت ۵۰٪ تا ۸۰٪ ظرفیت نگهداری (معمولاً ۱۵٪ وزنی تا ۳۰٪ وزنی)، pH خنثی، دمای محیط ۲۰°C یا بیشتر است. اثربخشی بازسازی این فناوری در تصفیه زیستی هیدروکربن های سنگین تر تا ۷۰٪ در شرایط مطلوب و هیدروکربن های سبک تر به طور کامل است. TPH ۱۰۰ ppm تا ۲۰۰۰ ppm قابل دستیابی است.

این فناوری به خوبی توسعه یافته است.

مدت زمان تصفیه با کاربرد این فناوری از ۶ ماه تا چند سال است.

هزینه تصفیه در این فناوری کم است.

الف-۳-۳ تثبیت/ جامدسازی

افزودن اتصال دهنده های مختلف می تواند آلودگی ها را تثبیت کند تا ضایعات را به مواد جامد غیر خطرناک تبدیل کند. محصول نهایی تثبیت، یک ماده جامد یا شبیه خاک است. جامدسازی، خاک و آلاینده ها را با استفاده از عوامل اتصال دهنده کپسوله کرده و در نتیجه خطر پسماند را کمتر می کند. محصول نهایی جامدسازی یک ساختار یکنواخت ثابت سخت است که دارای یکپارچگی ساختاری است. این روش ها را می توان در محل یا خارج از محل به کاربرد.

اکثر ضایعات پالایشگاه نفت را می توان با استفاده از سیمان یا اتصال دهنده های پوزولانی (خاکستر، گردوغبار کوره، آهک) جامد کرد. از مواد افزودنی (سیلیکات محلول، کربن فعال، رس) می توان برای کمک به تثبیت استفاده کرد. این فناوری از مواد اولیه ارزان قیمت و تجهیزات در دسترس استفاده می کند. اگرچه این روش طیف گسترده ای از پسماندها مانند پسماندهای فلزی/آلی مخلوط را مدیریت می کند، اما تخریب نهایی یا حذف آلاینده ها را پوشش نمی دهد. اطلاعات محدودی در مورد یکپارچگی طولانی مدت مواد مدیریت شده وجود دارد. چرخه های انجماد/ذوب، شستشوی اسیدی و هوازگی طبیعی بر پایداری طولانی مدت آلاینده های به دام افتاده تأثیر می گذارد. پسماندهای تثبیت شده اغلب نیاز به ایزولاسیون اضافی با استفاده از سرپوش یا موانع دیگر دارند. این فناوری، یکی از معدود فناوری هایی است که برای خاک با آلاینده های فلزی کاربرد دارد.

غلظت بالای پسماندهای آلی (% ۱۰ وزنی تا % ۲۰ وزنی) مانع از جامدسازی می شود. غلظت بالای نمک نیز مانع از پیشرفت جامدسازی می شود. در جدول الف-۷ معایب و مزایای فناوری تثبیت و جامدسازی ارائه شده است.

یادآوری ۱- دقت شود که صرف اختلاط خاک آلوده با موادی از جمله سیلیس، خاک دیاتومه و امثال آنچه به صورت خشک و چه با افزودن آب، تثبیت و کپسوله سازی رخ نمی دهد و در نتیجه، قابل قبول نخواهد بود.

یادآوری ۲- از جمله ترکیباتی که با توجه به پژوهش های متعدد انجام شده در مراکز مختلف علمی، می تواند جهت تثبیت و جامدسازی مورد استفاده قرار گیرد، ترکیب سیمان، سدیم سیلیکات و دیاتومه است که تنها در درصد های خاصی می تواند عملکرد قابل قبول ارائه نماید.

جدول الف-۷- معایب و مزایای تثبیت / جامدسازی

معایب	مزایا
محدودیت‌های احتمالی کاربری زمین در آینده	مواد خام ارزان
آلاینده‌ها از بین نمی‌روند.	تجهیزات در دسترس
دغدغه مربوط به یکپارچگی طولانی مدت	هزینه متوسط
درصد بالای مواد آلی (۱۰ تا ۲۰ درصد) گیرایی سیمان را به تأخیر می‌اندازد.	مدیریت فلزات به‌خوبی مدیریت آلاینده‌های آلی
ترکیبات فرار بر اثر حرارت هیدراسیون تبخیر می‌شوند.	
منطقه تصفیه: کاربری در محل در ناحیه غیراشباع ترجیح داده می‌شود. برای تصفیه منطقه اشباع مقداری آبگیری لازم است.	

آلاینده‌های هدف در استفاده از این فناوری مواد معدنی (فلزات) و مواد آلی هستند. در این فناوری از مواد افزودنی شیمیایی می‌توان برای تنظیم مشخصات شیمیایی خاک استفاده کرد. اثربخشی بازسازی این فناوری بدون حذف آلاینده‌ها بوده و از مهاجرت آلاینده‌ها جلوگیری می‌کند. این فناوری در دسترس و قابل کاربرد است. زمان تصفیه در این فناوری کوتاه است. هزینه تصفیه در این فناوری متوسط است.

الف-۴ فناوری‌های خارج از محل

برخی از فناوری‌های خارج از محل به اختصار و به شرح زیر معرفی شده‌اند:

الف-۴-۱ تصفیه / دفع

به دلیل این که در بسیاری از سایت‌ها، حجم خاک‌های آلوده به اندازه‌ای کافی کم است، مقرون به صرفه‌ترین گزینه این است که خاک را برای تصفیه یا دفع به تأسیسات مدیریت پسماند خارج از محل انتقال دهید. این امر همچنین در زمانی که منفعتی در تصفیه سریع‌تر باشد یا زمانی که فضای بسیار کمی برای تصفیه در محل وجود دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. خاک‌برداری اولین گام در همه فناوری‌های بازسازی خارج از محل است. در جدول الف-۸ معایب و مزایای فناوری تصفیه / دفع ارایه شده است.

جدول الف-۸- معایب و مزایای تصفیه / دفع

مزایا	معایب
هزینه بسیار کم برای مقادیر کم خاک	تأثیر نوع و غلظت آلاینده‌ها، بر استفاده از تأسیسات بیرون سایت
زمان بسیار کم برای تکمیل	وجود انتشارات تصادفی هوا
حفاری و خاکبرداری یک فناوری کاملاً توسعه یافته است.	محدودیت دسترسی به خاک به عللی مانند عمق و ساختار خاک
در دسترس بودن تعداد زیادی فناوری در بیرون سایت	
منطقه تصفیه: محدود به امکان سنجی خاک برداری.	

آلودگی‌های هدف در استفاده از این فناوری شامل طیف کاملی از گروه‌های آلاینده است.

این فناوری محدود به شرایط خاک نیست.

در این فناوری بازسازی محل به این دلیل اتفاق می‌افتد که خاک‌های آلوده برداشته شده و با خاک‌ریزی باکیفیت قابل قبول جایگزین می‌شوند.

در این فناوری حفاری یک فرایند کاملاً اثبات شده است.

زمان تصفیه در این فناوری کوتاه است. نرخ حذف خاک به عمق خاک، وجود ساختارها و ویژگی‌های زیرسطحی و انواع تجهیزات حفاری مورد استفاده بستگی دارد.

هزینه تصفیه در این فناوری برای اکثر خاک‌های آلوده به نفت، متوسط است. حفاری دشوار یا شرایط سخت حمل خاک، هزینه‌ها را افزایش می‌دهد.

الف-۴-۲ بایوپایل

بایوپایل یک واحد تصفیه زمینی مهندسی شده برای تخریب زیستی مواد آلی در خاک‌ها یا لجن‌های آلوده است. این فرایند تصفیه (تخریب زیستی) مشابه واحدهای تصفیه زمین است. بایوپایل برای بهینه‌سازی نرخ تخریب آلاینده‌ها و دستیابی به حدود بالای تصفیه طراحی شده است.

بایوپایل‌ها، کپه‌هایی از خاک آلوده هستند که در آن‌ها هوادهی از طریق لوله‌های سوراخ شده انجام می‌شود. مواد مغذی به صورت دوره‌ای اضافه شده و شیرابه بازیافت می‌شود تا شرایط مطلوب زیستی حفظ شود. همچنین می‌توان از تقویت‌کننده‌های زیستی مانند کودها و سورفکتانت‌ها استفاده کرد. کپه‌ها معمولاً برای حفظ گرما و کنترل رطوبت/ رواناب پوشیده می‌شوند. کپه‌های سرپوشیده همچنین می‌توانند دارای منافذ خروجی هوا باشند. از آنجاکه بایوپایل‌ها می‌توانند تا ارتفاع حدود ۳ m ساخته شوند، برای تصفیه به مساحت کمتری نسبت به تصفیه زمین نیاز دارند. در جدول الف-۹ معایب و مزایای فناوری بایوپایل ارائه شده است.

جدول الف-۹- معایب و مزایای بایوپایل

مزایا	معایب
هزینه‌های کم تا متوسط	هیدروکربن‌های سنگین به کندی تخریب می‌شوند.
نیروی انسانی کم	عدم امکان دسترسی به حدود بسیار پایین
زمان تصفیه کمتر نسبت به تصفیه زمینی	فلزات حذف نمی‌شوند.
زمین کمتر نسبت به تصفیه زمینی	
تحت کنترل بودن انتشارات هوا	
منطقه تصفیه: محدود به قابلیت حفاری و فضای موجود.	

آلودگی هدف در این فناوری آلاینده‌های آلی زیست تجزیه‌پذیر شامل همه هیدروکربن‌ها است.

در این فناوری برای اطمینان از هوادهی مناسب، خاک‌های رسی بالا ممکن است نیاز به حجیم شدن داشته باشند.

اثربخشی بازسازی در این فناوری شامل مقادیر TPH^۱ در حد ۱۰۰ ppm تا ۲۰۰۰ ppm است. از این روش نمی‌توان حدود پایانی کمی برای هیدروکربن‌های سن بالا به دست آورد و سرعت تخریب در مقایسه با ترکیبات قابل تجزیه، کندتر می‌باشد. برای هیدروکربن‌های سبک‌تر درصد بالای حذف به دست می‌آید.

این فناوری در برخی از سایت‌ها انجام شده است.

مدت‌زمان تصفیه در این فناوری ۶ ماه تا ۲ سال است.

هزینه تصفیه در این فناوری متوسط است.

الف-۴-۳ خاک‌شویی

خاک‌شویی یک فرایند خارج از محل مبتنی بر آب است که آلاینده‌ها را در یک جریان لجن متمرکز می‌کند و بیشتر خاک را تصفیه می‌کند. آلاینده‌های موجود در خاک از نظر شیمیایی یا فیزیکی به سطوح ذرات خاک متصل می‌شوند. از آنجایی که ذرات ریز مانند رس و لای نسبت به حجم کوچک خود دارای سطح وسیعی هستند، نسبت به ذرات بزرگ‌تر دارای آلودگی بیشتری در واحد حجم هستند. شستشوی خاک با حذف ذرات ریز و تمیز کردن خاک درشت (ماسه) با استفاده از روش‌های فیزیکی و شیمیایی انجام می‌شود. ذرات ریز، یک لجن را تشکیل می‌دهند که جداگانه تصفیه شده یا دفع می‌شود.

در فرآیند خاک‌شویی، بخشی از خاک در حدود ۶۰٪ تا ۹۰٪ با آلودگی کم به محل برگردانده می‌شود. این فناوری برای آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، حلال‌ها و هیدروکربن‌ها استفاده شده است. سورفکتانت‌ها، کلات‌کننده (اتصال فلزات در ترکیبات حلقوی)، اسیدها یا بازها اغلب برای بهبود جداسازی ذرات و حل شدن آلاینده‌ها استفاده می‌شود.

1- Total Petroleum Hydrocarbons

ارزیابی‌های اقتصادی نشان داده است که برای حذف آلاینده‌های هیدروکربنی متداول، فرایندهای چندمرحله‌ای مانند شستشوی خاک با فرایندهای تک‌مرحله‌ای مانند تجزیه زیستی و دفع حرارتی قابل‌رقابت نیست. هزینه‌های تصفیه به‌شدت تحت تأثیر مقدار ریزدانه‌هایی که باید حذف شود یا تعداد مراحل تصفیه است. فرایند خاک‌شویی دومرحله‌ای نسبتاً ارزان است، اما حجم زیادی از ریزدانه‌ها را برای دفع باقی می‌گذارد. در جدول الف-۱۰ معایب و مزایای فناوری خاک‌شویی ارائه شده است.

جدول الف-۱۰- معایب و مزایای خاک‌شویی

مزایا	معایب
توانایی حذف فلزات	باقی ماندن بخشی از خاک برای دفع یا تصفیه آتی
می‌تواند به عنوان مرحله اول تصفیه عمل کند تا حجم برای تصفیه تکمیلی کاهش یابد.	هیدروکربن‌های کهنه به‌سختی شسته می‌شوند.
	عدم امکان دسترسی به حدود بسیار کم
	منطقه تصفیه: باقابلیت حفاری محدودشده است.

آلاینده‌های هدف در این فناوری شامل فلزات و هیدروکربن‌های سبک‌تر است. هیدروکربن‌های سنگین‌تر یا قدیمی به میزان زیادی حذف نمی‌شوند.

بهترین شرایط خاک در استفاده از این فناوری خاک‌های درشت مانند ماسه بهتر است. ضعیف برای خاک‌های ریز مانند لای و رس است.

میزان بازسازی در استفاده از این فناوری بستگی به ویژگی‌های آلاینده و توزیع اندازه ذرات خاک دارد. حد نهایی ۵۰۰ ppm تا ۲۲۵۰ ppm از TPH قابل دستیابی است.

این فناوری برای فلزات و هیدروکربن‌های سبک‌تر است.

زمان تصفیه در این فناوری متناسب دبی جریان و تابعی از اندازه واحد یا تعداد واحدهای موازی است.

هزینه تصفیه در این فناوری متوسط است. برای فرایندهای چندمرحله‌ای (برای دستیابی به سطوح بازسازی کمتر) زیاد است.

الف-۴-۴ استفاده مجدد

در برخی موارد، خاک آلوده ممکن است به‌عنوان مصالح ساختمانی استفاده شود؛ درحالی‌که بعضی خاک‌ها مستقیماً به عنوان مصالح اساس جاده استفاده می‌شود. متداول‌ترین فناوری مورد استفاده برای استفاده مجدد از خاک، ساخت آسفالت، سیمان و آجر است.

ساخت آسفالت یک فرایند خارج از محل است که در آن خاک آلوده بخشی از محتوای آسفالت می‌شود. برای کارخانه‌های آسفالت مخلوط سرد یا مخلوط گرم قابل استفاده است. خاک‌های ماسه‌ای به دلیل ساختار دانه‌ای

درشت تر و تمایل کمتر برای حفظ آب بر خاک‌های رسی ترجیح داده می‌شوند (مخصوصاً برای آسفالت مخلوط سرد). در جدول الف-۱۱ معایب و مزایای فناوری استفاده مجدد ارایه شده است.

جدول الف-۱۱- معایب و مزایای استفاده مجدد

مزایا	معایب
هزینه متوسط	جابجایی تا کارخانه
نیاز کم به نیروی انسانی و نگهداشت	فعال نبودن کارخانه‌های آسفالت در زمستان
زمان کم	عدم امکان استفاده برای آسفالت در صورت وجود ریزدانه‌های زیاد
	محدودیت استفاده در سایت
	برخی آلاینده‌ها مانند فلزات از بین نمی‌روند.
	منطقه تصفیه: باقابلیت خاک‌برداری محدود شده است.

آلاینده‌های هدف در این فناوری هیدروکربن‌های سنگین تر هستند. هیدروکربن‌های سبک‌تر برای فرآیند مخلوط سرد ضعیف هستند.

در این فناوری شرایط خاک درشت بهتر از ریز است. حضور آب یک مشکل خاص برای کارخانه‌های آسفالت مخلوط سرد است.

در این فناوری بدون بازسازی خاک، فقط تثبیت خاک انجام می‌شود. خاک‌های آلوده برداشته شده و باکیفیت قابل قبول جایگزین می‌شوند. این فناوری تکامل یافته است.

زمان تصفیه در این فناوری وابسته به میزان خاک آلوده و تابعی از استفاده نهایی است.

هزینه تصفیه در این فناوری متوسط است.

الف-۴-۵ دفع حرارتی

دفع حرارتی یک فرایند خارج از محل است که از تبادل حرارتی مستقیم یا غیرمستقیم برای فراریت و استخراج آلاینده‌های آلی از خاک استفاده می‌کند. به‌طور معمول، مواد آلوده تا دمای بین 200°C تا 540°C گرم می‌شوند. هیدروکربن‌ها و دیگر ترکیبات آلی حذف شده از خاک به دستگاه‌های بازسازی منتقل می‌شوند که بسته به نوع دفع کننده مورد استفاده و اهداف/الزامات نهایی بازسازی متفاوت است. رایج‌ترین دفع کننده‌های حرارتی شامل کوره‌های دوار گرم شده مستقیم و غیرمستقیم، خشک‌کن‌های حرارتی و کوره‌های نقاله است. کوره‌ها معمولاً برای کاربردهای با ظرفیت ۲۰ تن در ساعت تا ۵۰ تن در ساعت استفاده می‌شوند. نرخ حذف بیش از ۹۹٪ به‌طور معمول توسط همه انواع دفع کننده‌های حرارتی به دست می‌آید. در جدول الف-۱۲ معایب و مزایای فناوری دفع حرارتی ارایه شده است.

جدول الف-۱۲- معایب و مزایای دفع حرارتی

مزایا	معایب
هزینه کم	نیاز به کنترل انتشارات هوا
پوشش گستره زیادی از هیدروکربن‌ها از جمله PAH ها	ضرورت کنترل خطر انفجار در تجهیزات دفع کننده
تصفیه تا حد مقادیر بسیار پایین	عدم حذف فلزات
مشخص بودن ابعاد واحدهای متعدد برای اندازه‌های مختلف پروژه	ضرورت انجام پیش تصفیه، در صورت وجود درصد بالایی از خاک رس
زمان کم	کاهش راندمان تصفیه در حضور رطوبت
منطقه تصفیه: باقابلیت خاکبرداری محدودشده است.	

آلودگی هدف در این فناوری شامل ترکیبات فرار و نیمه فرار (از جمله PAHs) است.

با استفاده از این فناوری خاک درشت (مقدار ماسه بالا) بیش از همه مستعد تصفیه است. رطوبت کم اقتصاد تصفیه را بهبود می بخشد.

اثربخشی بازسازی تابعی از عملکرد دما و زمان ماند تصفیه است. غلظت نهایی TPH از ۵۰۰ ppm تا ۱۵۰۰ ppm قابل دستیابی است.

این فناوری در حال حاضر در دسترس است.

زمان تصفیه در این فناوری خیلی کوتاه است. مدت زمان ماند بیست دقیقه در کوره، متداول است.

هزینه تصفیه در این فناوری برای حجم حدود 150000 m^3 کم تا متوسط، متوسط تا زیاد برای حجم‌های حدود 15000 m^3 و کمتر از آن است.

الف-۴-۶ سوزاندن

سوزاندن، یک فرایند خارج از محل است که از دمای بالا برای فراریت و احتراق هیدروکربن‌ها در خاک و لجن استفاده می کند. مواد آلوده در یک محفظه بسته با اکسیژن کافی برای تبدیل آلاینده‌های آلی به دی اکسید کربن و آب گرم می شوند. دمای کارکرد بین 870°C تا 1200°C است.

سوزاندن در تصفیه آلاینده‌های معدنی مؤثر نخواهد بود، زیرا معمولاً با اکسیداسیون نمی توان آن‌ها را از بین برد. فلزاتی که زیر 1090°C فرار می شوند مانند آرسنیک، جیوه، سرب و سلنیوم ممکن است در طول سوزاندن بخار شده یا اکسیدهای فرار تشکیل دهند. تصفیه گازهای گلخانه‌ای ناشی از آن دشوار است. در جدول الف-۱۳ معایب و مزایای فناوری سوزاندن ارائه شده است.

جدول الف-۱۳- معایب و مزایای سوزاندن

مزایا	معایب
از بین رفتن ترکیبات آلی	ضرورت کنترل انتشارات هوا
راندمان بیشتر از ۹۹,۹۹ درصد برای اکثر ترکیبات آلی	فلزات از بین نمی‌روند و ممکن است آلودگی هوا رخ بدهد.
همه ترکیبات آلی تصفیه می‌شوند.	نیاز به سوخت / انرژی زیاد
منطقه تصفیه: محدود به شرایط خاک‌برداری	

آلودگی هدف در این فناوری شامل همه آلاینده‌های آلی است.

در این فناوری خاک درشت (مقدار ماسه بالا) بیش از همه مستعد تصفیه است. ذرات بزرگ‌تر از قطر ۲/۵ cm باید از جریان تغذیه پسماندسوز برداشته شوند. برای به حداقل رساندن تشکیل توده‌های بزرگ، لازم است خاک‌هایی با مقدار زیادی خاک رس، پیش تصفیه داشته باشند. همچنین خاک‌هایی که نسبت ریزدانه بالایی دارند می‌توانند مقدار زیادی ذرات معلق ایجاد کرده و مشکل انتشار هوا را ایجاد کنند. رطوبت زیاد هزینه‌های بالاتری را برای تصفیه ایجاد می‌کند.

پسماندسوزهایی که به درستی کار می‌کنند، به‌طور معمول به بازدهی تخریب و حذف بیشتر از ۹۹/۹۹٪ دست می‌یابند که برای تصفیه پسماندهای خطرناک مورد نیاز است. آن‌ها می‌توانند برای برآوردن بازدهی ۹۹/۹۹۹۹٪ مورد نیاز برای PCBها و دیوکسین‌ها عمل کنند.

فناوری کوره‌دوار کاملاً اجرایی و اثبات شده است.

زمان تصفیه در این فناوری کوتاه است. زمان ماند کوره‌های دوار بسته به ویژگی‌های خاک و آلاینده‌ها از چند دقیقه تا بیش از یک ساعت متغیر است. زمان ماند احتراق‌های بستر سیال از چند ثانیه برای مواد ریز تا حدود ۳۰ دقیقه برای ذرات بزرگ‌تر متغیر است. زمان مورد نیاز برای بازسازی توسط عوامل دیگری مانند زمان مورد نیاز برای حفاری و جایگزینی خاک یا تجزیه و تحلیل نمونه‌های خاکستر برای تایید تخریب آلاینده‌ها محدود می‌شود.

هزینه تصفیه در این فناوری متوسط تا زیاد و برای حجم زیاد (حدود 50000 m^3) است. برای حجم‌های کمتر، پسماندهای خطرناک یا سخت، تصفیه زیاد است.

کتابنامه

- [۱] آیین‌نامه رفع آلودگی فعالیت‌های نفتی مصوب ۱۳۸۸ هیأت دولت بنا به پیشنهاد شماره ۳۶۵۸۲-۱ مورخ ۱۳۸۷/۶/۱۱ سازمان حفاظت محیط زیست