INSO
(Std. No.)
.....
(2022)

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
(شمارهٔ استاندارد)
.....
(1401)

Identical with/
Modification of

صنعت نفت- الزامات کنترل آلودگی خاک

Petroleum Industry - Requirements for Soil Pollution Control

ICS: (…….)

استاندارد ملی ایران شمارهٔ ..... (چاپ اول): سال .....

سازمان ملی استاندارد ایران
تهران، ضلع جنوب غربی میدان ونک، خیآبان ولیعصر، پلاک 2592
صندوق‌پستی: 6139-14155 تهران- ایران
تلفن: 5-88879461
دورنگار: 88887080 و 88887103
کرج، شهر صنعتی، میدان استاندارد
صندوق پستی: 163-31585 کرج - ایران
تلفن: 8-32806031 (026)
دورنگار: 32808114 (026)
رایانامه:standard@isiri.gov.ir
وبگاه: http://www.isiri.gov.ir

Iranian National Standardization 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@isiri.gov.ir
Website: http://www.isiri.gov.ir

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

سازمان ملی استاندارد ایران به موجب بند یک مادهٔ 3 قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه 1371 تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را برعهده دارد.

تدوین استاندارد در حوزه‌های مختلف در کمیسیون‌های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب‌نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می‌شود 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، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و واردکنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان‌های دولتی و غیردولتی حاصل می‌شود. پیش‌نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذینفع و اعضای کمیسیون‌های مربوط ارسال شده و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها، در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می‌شود.

پیش‌نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان‌های علاقه‌مند و ذیصلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می‌کنند در کمیته ملی طرح، بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می‌شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می‌شوند که بر اساس مقررات استاندارد ملی ایران شماره 5 تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که در سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌شود به تصویب رسیده باشند.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO)[1]، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین‌المللی اندازه‌شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می‌کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن تـوجه به شرایط کلی و نیازمندی‌های خاص کشور، از آخرین پیشرفت‌های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می‌تواند با رعایت موازین پیش‌بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف‌کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست‌محیطی 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 می‌تواند به منظور حفظ بازارهای بین‌المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری کند. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده‌کنندگان از خدمات سازمان‌ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم‌های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه‌ها و مراکز واسنجی (کالیبراسیون) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد این‌گونه سازمان‌ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می‌کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آنها اعطا و بر عملکرد آنها نظارت می‌کند. 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]1- International Organization for Standardization
[2]2- International Electrotechnical Commission
[3]3- International Organization for Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legals)
[4]4- Contact point
[5]5- Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد
«صنعت نفت – الزامات کنترل آلودگی خاک»

رئیس:	**سمت و/یا محل اشتغال:**
گلستانی‌فر، حافظ (کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط)	کارشناس ارشد حفاظت محیط‌زیست - شرکت ملی نفت ایران
دبیر:	
نیک‌پی، محمدامین (کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست)	مسئول HSE طرح‌ها - شرکت نفت مناطق مرکزی ایران
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
اسدی، فریدون (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)	رئیس حفاظت محیط‌زیست - پالایشگاه تهران
تسبندی، مصطفی (کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست)	رئیس توسعه پایدار - اداره کل HSE وزارت نفت
جعفر زاده حقیقی فرد، نعمت اله (دکتری مهندسی بهداشت محیط)	استاد تمام مرکز تحقیقات فناوری‌های محیط‌زیست - دانشگاه علوم پزشکی جندی‌شاپور اهواز
حمزه‌لو، مهتاب (کارشناسی ارشد انرژی و محیط‌زیست)	کارشناس ارشد حفاظت محیط‌زیست - شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران
رحمانی ایوریق، بهنام (کارشناسی ارشد زمین‌شناسی زیست‌محیطی)	کارشناس بررسی زیست‌محیطی منابع خاک - دفتر حفاظت و مدیریت زیست‌محیطی آب‌وخاک سازمان حفاظت محیط‌زیست
سعیدی، الهام (دکتری مهندسی شیمی- طراحی فرایند)	کارشناس حفاظت محیط‌زیست - شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی ایران
شبانپور، مهدی (کارشناسی مهندسی شیمی)	رئیس واحدهای تصفیه پساب - شرکت فجر انرژی خلیج‌فارس
صمیمی، کیوان (دکتری محیط‌زیست- آلودگی‌های محیط‌زیست)	رئیس حفاظت محیط‌زیست - شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران
عندلیب‌مقدم، سیدحسین (کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط‌زیست)	کارشناس حفاظت محیط‌زیست - شرکت ملی پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران

اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	**سمت و/یا محل اشتغال:**
مهربان، لیلا (کارشناسی ارشد مهندسی محیط‌زیست- آب و فاضلاب)	کارشناس ارشد خاک و پسماند - اداره کل HSE وزارت نفت
ناصری، کیومرث (کارشناسی ارشد HSE)	کارشناس HSE - منطقه عملیاتی چشمه خوش/ شرکت بهره‌برداری نفت و گاز غرب
نیرآبادی، رضا (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی)	کارشناس حفاظت محیط‌زیست - شرکت ملی پتروشیمی
هاشمی، سیده‌مهتاب (کارشناسی ارشد مهندسی شیمی- HSE)	کارشناس حفاظت محیط‌زیست - شرکت بهره‌برداری نفت و گاز غرب
ویراستار: .....، ..... (.....)	.....

فهرست مندرجات

عنوان	صفحه
پیش‌گفتار	ز
مقدمه	ح
1 هدف و دامنه کاربرد	1
2 مراجع الزامی	1
3 تعاریف و اصطلاحات	1
4 منابع آلودگی خاک	5
5 الزامات پیشگیری و کنترل آلودگی خاک	9
5-1 اهم الزامات پایه جهت پیشگیری از ریزش	9
5-2 اهم الزامات طراحی و اجرا برای کنترل آلودگی خاک‌های آلوده	10
5-3 اهم الزامات پیشگیری از ریزش و انتشار آلودگی	11
5-4 اهم الزامات ویژه مخازن ذخیره	12
5-5 اهم الزامات ویژه خطوط لوله	12
6 روش‌های متداول کنترل آلودگی خاک	13
6-1 عایق لرزشی	14
6-2 دوغاب میکروبی	14
6-3 پوشش‌ها	15
6-4 روکش‌ها	15
6-5 طرح‌های متداول پوشش	17
6-6 طرح‌های پوشش جایگزین	18
6-7 پوشش تبخیر و تعرق	18
6-8 پوشش‌های مهندسی زیستی	19
7 نمونه‌برداری	20
8 روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده	21
8-1 کلیات بازسازی خاک	21
8-2 فرایند انتخاب فناوری	21
8-3 فناوری‌های بازسازی خاک	23
پیوست الف (آگاهی‌دهنده) روش‌ها و فناوری‌های بازسازی خاک‌های آلوده	24

پیش‌گفتار

استاندارد «صنعت نفت - الزامات کنترل آلودگی خاک» که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوطه تهیه و تدوین‌شده است؛ در جلسه کمیته ملی استاندارد ..... مورخ ..... تصویب شد. اینک این استاندارد به استناد بند یک مادهٔ 3 قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن‌ماه 1371، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

استانداردهای ملی ایران بر اساس استاندارد ملی ایران شماره 5 (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 مربوطه موردتوجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی ایران استفاده کرد.

منبع و مأخذی (منابع و مآخذی) که برای تهیه و تدوین این استاندارد مورداستفاده قرارگرفته به شرح زیراست:

EXXONMOBIL DESIGN PRACTICE SECTION XX: 2001

مقدمه

خاک یکی از منابع ارزشمند طبیعت است که درصد بالایی از مواد غذایی موردنیاز 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 آب‌وهوا، خاک سومین بخش محیط‌زیست تلقی می‌شود.

ایران یکی از بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های نفت و گاز در جهان است. مواد نفتی حین حفاری و استخراج سایت‌های نفت و گاز، هنگام نقل‌وانتقال زمینی و دریایی، در سایت‌های فرایندی مانند پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها و ... باوجود 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 ازجمله آلودگی خاک می‌گردد. روش‌های متنوعی جهت کنترل آلاینده‌ها و بازسازی خاک‌های آلوده وجود دارد که انتخاب و استفاده از آنها به عوامل متعددی ازجمله نوع آلاینده، غلظت آلودگی، نوع خاک، شرایط آب و هوایی، شرایط آب زیرزمینی، گستره آلودگی، هزینه و ... 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 ازجمله قانون حفاظت از خاک و آیین‌نامه‌های اجرایی آن بوده و در جایگاه مکمل آنها می‌باشد.

1 هدف و دامنه کاربرد

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

این استاندارد برای تأسیسات و تجهیزات واحدهای صنعت نفت مشتمل بر تأسیسات اکتشاف، حفاری و فراورش نفت و گاز فراساحلی و خشکی، واحدهای پالایش نفت و گاز و پتروشیمی و خطوط جریانی، انتقال، توزیع و پخش نفت، گاز و فراورده‌های هیدروکربنی، واحدهای ذخیره‌سازی و سایر واحدها و تأسیسات مرتبط کاربرد دارد.

2 مراجع الزامی

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

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

استفاده از مراجع زیر برای کاربرد این استاندارد الزامی است:

2-1 قانون حفاظت از خاک

2-2 مقررات تعیین واحدهای بزرگ و مقاطع زمانی و ضوابط اندازه‌گیری آلایندگی و نحوه خود اظهاری موضوع تبصره 2 ماده 18 قانون حفاظت از خاک

2-3 آیین‌نامه رفع آلودگی فعالیت‌های نفتی

3 اصطلاحات و تعاریف

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

3-1

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 یا سایر موجودات زنده یا گیاهان و یا آثار و ابنیه زیان‌آور باشد.

2-3

ماده آلاینده

pollutant

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

3-3

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.

4-3

پوشش

cover

سیستم پوشش محل دفن که اغلب از چندلایه مواد مختلف تشکیل‌شده است. پوشش برای جلوگیری از نفوذ و به حداقل رساندن تماس مستقیم با آلودگی، در بالای خاک‌آلوده قرار می‌گیرد.

5-3

خارج از محل

ex situ

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

6-3

در محل

in situ

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

7-3

ژئوممبران

geomembrane

ورق‌هایی از مواد پلیمری مانند پلی‌اتیلن با چگالی بالا، ضخامت معمولاً 20 تا 100 میلی‌متر که برای بسیاری از کاربردها شامل جداسازی و محصورسازی استفاده می‌شود. ورق‌ها می‌توانند به‌صورت حرارتی یا شیمیایی جوش داده شوند تا امکان پوشاندن مناطق وسیع فراهم شود.

3-8

مواد ژئوسنتتیک

geosynthetic

مواد مصنوعی مورداستفاده در کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک.

3-9

ژئوتکستایل

geotextile

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

3-10

HDPE

پلی‌اتیلن با چگالی بالا، متداول‌ترین آستر مصنوعی یا مواد پوششی.

3-11

PAH

هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای

3-12

TPH

کل هیدروکربن‌های نفتی

3-14

سورفکتانت

surfactant

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

3-15

BTEX

یک خانواده از ترکیبات آروماتیک تک حلقه‌ای شامل بنزن، تولوئن، اتیل بنزن و زایلن

3-16

پوشش خاک

soil cover

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

3-17

بایوپایل

biopile

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

3-18

تهویه زیستی

bioventing

تهویه زیستی فرآیند تأمین حجم کم هوا در ناحیه اشباع‌نشده برای تجزیه زیستی هوازی است.

3-19

زیست پالایی

bioremediation

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

3-20

تجزیه زیستی

biodegradation

تغییر و تجزیه شیمیایی آلاینده با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و آنزیم‌ها

3-21

خاک‌شویی یا شستشوی خاک

soil washing

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.

3-22

شستشوی زیستی

bioflushing

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 ایجاد می‌شود.

3-23

روش‌های زیست پالایی طبیعی و کاهش اثر طبیعی

natural attenuation (NA) and intrinsic bioremediation (IB)

روش‌های زیست پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی معمولاً در شرایطی مورداستفاده قرار می‌گیرند که جرم آلاینده به‌اندازه کافی کوچک است تا در یک بازه زمانی مناسب کاهش‌یافته و از بین برود.

3-24

استخراج بخار خاک

soil vapor extraction (SVE)

این روش از انتقال 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.

3-25

جامدسازی

solidification

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

3-26

تثبیت

stabilization

یک فرایند شیمیایی که باعث جلوگیری از نشت می‌شود.

3-27

شیشه گون سازی

vitrification

این فرآیند تصفیه حرارتی، خاک‌آلوده را به یک ماده خنثای شیمیایی و کریستالی پایدار تبدیل می‌کند.

3-28

محصورسازی

containment

یک جایگزین برای تصفیه آب‌وخاک. هدف از محصورسازی، تصفیه محیط آلوده نیست بلکه جداسازی به منظور جلوگیری از انتشار آلودگی است.

4 منابع آلودگی خاک

آلودگی‌های خاک را می‌توان در مراحل آماده‌سازی و ساخت، پیش راه‌اندازی و راه‌اندازی، بهره‌برداری و برچیدن تقسیم‌بندی نمود 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 شمع کوبی، ساخت‌وساز ساختمان‌ها، راه‌ها و محوطه‌ها و سازه‌های فلزی و بتنی، ترانشه‌کنی، نصب تجهیزات و تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و عملیات کارگاهی. فعالیت‌هایی مانند آزمون چاه‌ها و آزمون‌های هیدرو استاتیک، بازرسی‌های غیر مخرب و غیره در مرحله پیش راه‌اندازی طبقه‌بندی‌شده‌اند.
- مرحله پیش راه‌اندازی 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 خواهد بود، باوجوداین، 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 هیدرو استاتیک، بازرسی‌های غیر مخرب و توپک‌رانی و غیره 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 و ... 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 پیش راه‌اندازی 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 است. خرابی تجهیزات شامل خوردگی و نشتی خطوط لوله و مخازن زمینی و زیرزمینی، خرابی شیرآلات، خرابی واحدهای فرایندی و نشتی فاضلاب و درین 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.

ازجمله جنبه‌های زیست‌محیطی مرحله بهره‌برداری که می‌تواند منجر به آلودگی خاک گردد؛ 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 و ... اشاره نمود.

- مرحله برچیدن: بعد از عملیات بهره‌برداری در حدود 30 سال، درصورت 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 قابل‌استفاده، نخاله‌های ساختمانی، خاک‌آلوده 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 مورداستفاده قرار گیرند؛ ولی اگر بنا بر برچیدن کامل سایت باشد، تمام کاربری‌های تغییر داده‌شده باید به حالت اولیه بازگردند.

بر اساس توضیحات ذکرشده در بالا، منابع آلودگی به‌قرار جداول 1 تا 4 ارائه گردیده‌اند:

جدول 1- منابع آلودگی خاک در مرحله آماده‌سازی و ساخت

منبع آلودگی	جنبه
دپوی مصالح و انبارش تجهیزات	باقی ماندن مصالح و آثار آن نظیر خرده‌ها، زنگ فلزات و...
ساخت فونداسیون‌ها و سازه‌های بتنی	نشت و ریزش بتن، باقی‌مانده بتن در محل، دوغاب مصالح
	استفاده از افزودنی‌ها
سازه‌های فلزی	زنگ‌زدایی و سند بلاست، رنگ
نصب تأسیسات و تجهیزات	نشت و ریزش مواد شیمیایی به‌واسطه روغن‌کاری، گریس کاری، چسب کاری و عایق‌کاری
	تولید پساب آغشته به مواد روغنی و اسیدی ناشی از شستشوی تجهیزات
	تولید پسماند جامد
حرکت ماشین‌آلات سنگین برای عملیات خاکی و حمل مصالح، فعالیت کمپرسور، پمپ بتن، جرثقیل و ...، 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 زمین، تسطیح و فرسایش خاک، آلودگی‌های ناشی از جوش‌کاری، عایق‌کاری، زنگ‌زدایی و ریسه کردن
	عبور دادن خط لوله از رودخانه
فعالیت و اسکان کارگران و کارکنان پروژه	تولید پساب بهداشتی
	تولید پسماند انسانی

جدول 2- منابع آلودگی خاک در مرحله پیش راه‌اندازی و راه‌اندازی

منبع آلودگی	جنبه
آزمون‌های هیدرو استاتیک	نشت و ریزش مایعات آلوده به انواع آلاینده‌ها شامل شوینده‌ها، برخی فلزات سنگین مانند کرم و کادمیوم، pH نامتعادل و ...
آزمون چاه‌های حفرشده	نشت و ریزش نفت خام (خارج از کنترل)
	انتشار آب همراه
آزمون و راه‌اندازی آزمایشی تجهیزات	نشت و ریزش مواد شیمیایی
	تولید پساب آغشته به مواد شیمیایی و فلزات سنگین و غیره

جدول 3- 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 ازجمله خوردگی، سرقت، هات‌تپ غیرمجاز، برخورد فیزیکی ماشین‌آلات کشاورزی و راه‌سازی، ریزش کوه و حوادث طبیعی
	آتش‌سوزی و انفجار
فرایندها و عملیات بهره‌برداری ازجمله جداسازی نفت و گاز همراه و آب آزاد در تفکیک‌گرها، انتقال آب جداسازی شده، تبادل حرارتی نفت/نفت، خنک‌سازی، نمک‌زدایی، فرایندهای پتروشیمی و ...	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 ازجمله 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 اعم از نفت شیرین، نفت نامرغوب، سوخت مایع، محصولات پتروشیمی و ...	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 رروانابهای سطحی و پساب صنعتی	نشت از کانال‌های انتقال، حوضچه‌های پساب و تأسیسات تصفیه
	سرریز حوضچه‌های پساب در اثر سیلاب و ...
	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	سرریز تانکر
سایت‌های نگهداری پسماندهای صنعتی	نشت مواد روغنی و نفتی
فعالیت و اسکان کارگران و کارکنان منطقه	تولید پساب بهداشتی
	تولید پسماند انسانی

جدول 4- 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 غیر فرایندی	قطعات و تجهیزات آلوده به مواد نفتی و شیمیایی
	نخاله‌های فلزی شامل خطوط لوله، تأسیسات و ضایعات فلزات بلااستفاده پس از جمع‌آوری قطعات قابل‌استفاده
	نخاله‌های ساختمانی
	خاک‌آلوده به مواد هیدروکربنی و شیمیایی به‌جامانده در اطراف واحدها، مخازن، گودال‌ها، حوضچه‌ها، فلرها و ...

5 اهم الزامات پیشگیری و کنترل آلودگی خاک

با توجه به کلیه مطالب ذکرشده در بخش‌های قبل، الزامات زیر لازم است در کلیه طرح‌ها، پروژه‌ها و تأسیسات جدیدالاحداث صنعت نفت جهت پیشگیری از بروز آلودگی خاک و کنترل آلودگی‌های احتمالی به وقوع پیوسته مدنظر قرار گیرد. این الزامات به‌صورت الزامات پایه پیشگیری از ریزش، الزامات طراحی و اجرا برای کنترل آلودگی، الزامات پیشگیری از ریزش و انتشار آلودگی، الزامات ویژه مخازن ذخیره و الزامات ویژه خطوط لوله طبقه‌بندی و ارائه‌شده است.

5-1 اهم الزامات پایه جهت پیشگیری از ریزش

جلوگیری از ریزش‌ها اولین خط دفاعی در حفاظت از جان، مال 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.

- ضروری است در مرحله طراحی، استفاده کارآمد از روش‌های شناسایی و ارزیابی ریسک و ارائه راهکارهای کنترلی و پیشگیرانه مانند HAZOP، HAZID و CONSEQUENCE MODELLING در دستور کار طراح قرار گیرد؛
- ضروری است در مرحله پیش راه‌اندازی (prestartup) و راه‌اندازی (startup)، شناسایی و رفع کلیه عیوبات اصلی که می‌تواند منجر به آلودگی خاک شود در دستور کار تیم راه‌اندازی قرار گیرد...
- ضروری است در مرحله بهره‌برداری، بازرسی و تعمیرات و نگهداری مناسب و به هنگام از تأسیسات در دستور کار بهره‌بردار قرار گیرد؛
- لازم است 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؛
- 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 باشند؛

- 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؛
- تأسیسات برای جلوگیری از هرگونه ریزش طراحی شود؛
- به حداقل رساندن یا حذف انتشار آلاینده‌ها به محیط‌زیست، به عنوان یک الزام اساسی در دستور کار مرحله طراحی پروژه‌های صنعت نفت قرار گیرد؛
- ضروری است الزامات طراحی به‌طور کامل مراعات گردد تا اطمینان حاصل شود که محیط در برابر کلیه ریزش‌ها و نشت‌ها و آلودگی‌های احتمالی محافظت شوند.

2-5 اهم الزامات طراحی و اجرا برای کنترل آلودگی خاک‌های آلوده

در طراحی لازم است موارد زیر بسته به پروژه و تأسیسات مورداستفاده قرار گیرد:
- جمع‌آوری و بازیابی ریزش‌های نفت و هیدروکربن‌ها جهت کاهش انتشار و آلودگی خاک؛
- طراحی فرآیندهای پایین‌دستی صنعت نفت (پالایشگاه‌های نفت و کارخانه‌های پتروشیمی) باقابلیت تصفیه و بازچرخانی پساب صنعتی و باهدف کاهش حجم تخلیه احتمالی پساب صنعتی به خاک؛
- لازم است خروجی کلیه سپتیک تانک‌ها و کلیه سامانه‌ها و پکیج‌های تصفیه فاضلاب بهداشتی و صنعتی به طریقی مدیریت شود که در صورت نشت یا انتشار مانع از آلودگی خاک موقعیت و پیرامون آن شوند. در مناطقی که امکان نفوذ آلودگی به خاک محیط وجود داشته باشد یا از حساسیت‌های خاصی ازجمله قرارگیری در محدوده مناطق تحت حفاظت محیط‌زیست، حساسیت بالای جوامع محلی و ... برخوردار باشد لازم است موارد زیر مراعات گردد:
- خاک دیواره و کف گودال‌های احتراقی (مانند گودال‌های سوزا) به‌طور کامل متراکم شده و با استفاده از پوشش غیرقابل نفوذ پوشانده شود. ضمناً لازم است پوشش مورداستفاده از مقاومت لازم در برابر حرارت برخوردار باشد؛
- خاک دیواره و کف لاگون‌ها و حوضچه‌های نگهداری یا ذخیره‌سازی سیال‌های حاوی هیدروکربن ازجمله حوضچه‌های تبخیر پساب‌های صنعتی و گودال‌های هرزآب حفاری، به‌طور کامل متراکم شده و با پوشش غیرقابل نفوذ پوشانده شود. (اعم از بتن مسلح، ژئوتکستایل و ژئوممبران و سایر روش‌های مورد تائید) 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 انتخاب‌شده به‌گونه‌ای که پس از اجرا و در طول بهره‌برداری، نشتی رخ ندهد. بدیهی است که ورق‌های مورداستفاده باید حداقل‌های ذکرشده در استانداردهای ملی مرتبط را دارا بوده و فروشنده و نصاب گارانتی‌های لازم را ارائه نمایند؛

- ضروری است در اطراف کلیه مخازن و تانک‌هایی 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 گردد؛
- ضروری است هم در زمان ساخت و هم در زمان راه‌اندازی و بهره‌برداری، هرگونه رواناب یا بارندگی 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)؛
- ضروری است 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؛
- در خصوص حوضچه‌های تبخیر، گودال‌های هرزاب و مشابه آن‌که سیال هیدروکربنی در آن موجود می‌باشد، لازم است 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.

3-5 اهم الزامات پیشگیری از ریزش و انتشار آلودگی

لازم است 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) باشد. ازجمله الزامات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- در نظر گرفتن دیواره‌های نفوذناپذیر در اطراف مخازن حاوی مواد اولیه، نفت خام، گازوییل و سایر فراورده‌های هیدروکربنی؛
- پیشگیری از ورود رواناب به مناطق فرایندی با استفاده از موانع مختلف و یا احداث تأسیسات فرایندی در ترازبالا؛
- تصفیه رواناب آلوده در تأسیسات تصفیه فاضلاب موجود یا انتقال به تأسیسات نفتی مجاور دارای قابلیت تصفیه؛
- در نظر گرفتن سیستم‌های تشخیص نشتی باقابلیت تشخیص حجم کم یا سرعت‌پایین نشت از سیستم خط لوله؛
- استفاده مناسب از شیرآلات برای به حداقل رساندن حجم بالقوه نشت ازجمله LBV ها؛
- برای جلوگیری از خروج بی‌رویه نفت و سایر مواد هیدروکربنی باید سازه‌های انحرافی یا محصورسازی‌های مناسب در نظر گرفته شود؛
- ایجاد پوشش غیرقابل نفوذ روی خاک با استفاده از پوشش بتن مسلح، یک‌لایه خاک رس یا قیر، ورق‌های پلاستیکی (ورق‌های پی‌وی‌سی پوشیده شده از شن، اپوکسی تقویت‌شده با فایبرگلاس) و مواد شیمیایی مخلوط شده با خاک؛

- سیستم زهکش سطحی در محدوده کارخانه برای جمع‌آوری نفت و آب آلوده به نفت و انتقال به شبکه فاضلاب و سپس به یک تفکیک‌گر؛
- استفاده از جوی، خندق، دیوارهای آتش یا موانع خاکی در اطراف مخازن، فرایندها و مناطق عملیاتی برای جمع‌آوری ریزش‌ها جهت پاک‌سازی؛
- محوطه مخزن، فرایند و حمل‌ونقل محصولات باید به سمت مجرای فاضلاب و چاله فاضلاب شیب بندی شده تا امکان جمع‌آوری سریع ریزش وجود داشته باشد؛
- شیرهای اطمینان و مخازن ذخیره باید در انتهای خطوط لوله برای جلوگیری و کنترل نشت نصب شود.
- 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؛
- در صورت امکان، کلیه خطوط لوله باید روزمینی بوده تا بازرسی و شناسایی نشت تسهیل شود؛
- گودال‌های بتنی جهت جمع‌آوری پساب‌های شیمیایی و خروجی فاضلاب‌ها در زیر خطوط لوله ساخته شوند؛
- خروجی پساب تصفیه‌شده باید به‌گونه‌ای طراحی شود که آسیب محیطی به حداقل برسد.

5-4 اهم الزامات ویژه مخازن ذخیره

در خصوص طرح و اجرای مخازن نگهداری و ذخیره لازم است موارد زیر مراعات گردد:

- طراحی و اجرای یک مخزن ذخیره نفت یا فراورده نفتی می‌بایست با حجم ذخیره‌شده و شرایط ذخیره‌سازی مانند فشار، دما و ... سازگار باشد.

- محصورسازی ثانویه غیرقابل نفوذ باید برای ظرفیت بزرگ‌ترین مخزن منفرد به‌علاوه مقدار کافی مجاز برای بارش و ارتفاع آزاد در نظر گرفته شود.

- 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.

- استفاده از مخازن غیرفلزی، در صورت امکان و کاربردی بودن، باید مدنظر قرار گیرد.

- مخازن روزمینی باید تحت آزمایش یکپارچگی مناسب قرار گیرند. رویه‌های مناسب شامل آزمایش هیدرو استاتیک، بازرسی‌های چشمی یا بازرسی‌های غیر مخرب اندازه‌گیری ضخامت پوسته است.

5-5 اهم الزامات ویژه خطوط لوله

در خصوص طرح و اجرای خطوط لوله لازم است موارد زیر مراعات گردد:

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

- خطوط لوله مدفون، باید توسط پوشش‌ها، حفاظت کاتدی یا سایر روش‌های مؤثر حفاظتی در برابر خوردگی محافظت شوند.
- استفاده از خطوط لوله غیرفلزی، در صورت امکان و کاربردی بودن، باید مدنظر قرار گیرد.
- خطوط لوله روزمینی باید تحت آزمایش یکپارچگی مناسب قرار گیرند. رویه‌های مناسب شامل آزمایش هیدرو استاتیک، بازرسی‌های چشمی یا بازرسی‌های غیر مخرب اندازه‌گیری ضخامت پوسته است.
- 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.

6 روش‌های متداول کنترل آلودگی خاک

محصورسازی یک گزینه جایگزین برای تصفیه آب‌وخاک است که می‌تواند از هزینه‌های بالقوه بالای تصفیه جلوگیری کند. هدف از روش‌های محصورسازی، تصفیه محیط آلوده نیست. بلکه هدف سیستم‌های محصورسازی، جداسازی به منظور 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 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.

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

- آلودگی عمیق دفن شده که حفاری برای آن خطرناک بوده و یا تصفیه آن در محل دشوار است
- انواع پسماندهای مخلوط و ترکیبات خاصی که گزینه‌های تصفیه را محدود می‌کنند
- حجم زیاد خاک‌آلوده، آب‌های زیرزمینی یا لجن
- آلودگی‌هایی که تماس با آنها خطرناک است.

بااین‌حال، فناوری محصورسازی به‌طور مداوم در حال بهبود است. اخیراً ازآنجاکه مقررات به سمت استفاده از ارزیابی ریسک و مدیریت ریسک درازمدت می‌روند، علاقه به این فناوری افزایش‌یافته است. این روش ممکن

است مقرون به‌صرفه‌ترین گزینه مدیریت زیست‌محیطی در سایت‌های خاص باشد. فناوری محصورسازی را می‌توان به‌طورکلی به پوشش یا آستر و موانع عمودی تقسیم کرد. فناوری پوشش و آستر اغلب مشابه است. از آسترها به‌طورکلی در زیر آلودگی برای جلوگیری از مهاجرت رو به پایین استفاده می‌شود، درحالی‌که برای جلوگیری از تماس مستقیم یا نفوذ، پوشش‌ها در بالای آلودگی قرار دارند. فناوری پوشش شامل پوشش خاک، لایه‌های رس و ژئوممبران‌ها است. فناوری آستر شامل آسترهای ژئوممبران و لایه‌های زمین نفوذناپذیر است.

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

تقریباً در همه موارد، 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 آب‌وخاک نیاز است. در بیشتر موارد، هزینه‌های طولانی‌مدت برنامه نظارت، مؤلفه قابل‌توجهی برای برآورد هزینه خواهد بود.

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

انواع مختلفی از فناوری‌های درحال‌توسعه وجود دارد که در مطالعات آزمایشگاهی و آزمون‌های آزمایشی نویدبخش است. برخی از فناوری‌های در حال ظهور شامل عایق لرزشی و دوغاب‌های میکروبی است. در زیر هر یک از این فناوری‌ها شرح داده‌شده است.

جهت مطالعه بیشتر می‌توان به مستند زیر مراجعه نمود.

EXXONMOBIL DESIGN PRACTICE SECTION XX-B2: 1999

1-6 عایق لرزشی

عایق لرزشی یک تکنیک فیزیکی است که در حال حاضر در مرحله رشد است. ویبراتور بتونی در صورت لزوم با کمک آب فشار بالا وارد خاک می‌شود. هنگامی‌که در محل قرار گرفت، ارتعاشات خاک رس را فشرده می‌کند که ترک‌ها و شکاف‌ها را می‌بندد. ویبراتورها می‌توانند به‌صورت عمودی یا با زاویه داخل به اطراف محیط آلاینده‌ها نصب شوند و یک کپسول مخروطی معکوس تشکیل دهند. این تجهیزات دارای مزیت سبک بودن، کارکرده فقط توسط دو نفر، سریع و بدون نیاز به حفاری خاک هستند.

عایق لرزشی یک‌راه 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 به‌کاررفته است ممکن است بر ثبات ساختاری خاک یا سازه‌های اطراف تأثیر منفی بگذارد. این ارتعاشات ممکن است پتانسیل افزایش رسانایی هیدرولیکی خاک را در پی داشته باشد. محدودیت دیگر این است که عایق لرزشی به دلیل انرژی موردنیاز برای قرار دادن ویبراتور در خاک رس، فقط در مکان‌های کم‌عمق قابل‌استفاده است.

6-2 دوغاب میکروبی

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

- ژل پلیمر میکروبی – سیستم‌های حاوی ژل پلیمر میکروبی از باکتری‌ها برای تولید ژل‌های پلیمری با ویسکوزیته بالا استفاده می‌کنند. مخلوطی از باکتری و یک پلیمر به زمین تزریق می‌شود. سپس، باکتری‌ها از پلیمر برای تولید ژل نامحلول استفاده می‌کنند. ثابت‌شده است که ژل در محلول آبی پایدار است و در برابر بیشتر حلال‌های آلی مقاوم است. مزایای آن این است که این سیستم غیر سمی است و می‌توان آن را به عنوان یک مانع موقتی طراحی کرد که نیازی به حذف ندارد. بااین‌حال، این سیستم دارای یک‌عمر محدود است و احتمالاً به عنوان یک‌راه حل طولانی‌مدت قابل‌استفاده نخواهد بود.
- بیوفیلم‌ها – بیوفیلم‌ها موادی آلی و سلولی (پلی ساکاریدها) هستند که از میکروارگانیسم‌های جاسازی‌شده در یک پلیمر خود تولیدشده تشکیل‌شده است. در صورت مهندسی صحیح، می‌توان از بیوفیلم‌ها برای پر کردن منافذ خاک استفاده کرد. باکتری‌های «گرسنه» همراه با مواد مغذی به خاک تزریق می‌شوند که باعث تحریک باکتری‌ها برای تولید فیلم می‌شود و برای پر کردن فضای منافذ گسترش می‌یابد. مطالعات نشان می‌دهد که برای حفظ بیوفیلم به تزریق مداوم مواد مغذی نیازی نیست و حتی پس از مرگ باکتری نیز یکپارچگی بیوفیلم حفظ می‌شود. علاوه بر این، نفوذ اسیدها، بازها یا محلول نمکی تأثیر کمی بر بیوفیلم دارد. از مزایای این فناوری می‌توان به هزینه کم، حداقل راهبری و نگهداری و تخریب زیستی هم‌زمان برخی از آلاینده‌ها اشاره کرد. بااین‌حال، بیوفیلم‌ها هنوز تجربی هستند و عملکرد آنها به‌راحتی قابل پیش‌بینی نیست. مواردی مانند مواد مغذی، سموم، pH، دما و رقابت با موجودات دیگر ممکن است تأثیر قابل‌توجهی بر این سیستم داشته باشند. مقاومت بیوفیلم در برابر چرخه‌های خشک و مرطوب، شرایط انجماد و ذوب و سایر مواد شیمیایی و همچنین عملکرد در انواع مختلف خاک و دوام طولانی‌مدت باید ارزیابی شود.

6-3 پوشش‌ها

پوشش یک فناوری محصورسازی است که در بالای آلودگی قرارگرفته است که 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 طراحی‌شده است. آسترها در زیر آلودگی قرار می‌گیرند و به منظور محدود کردن مهاجرت به سمت پایین از آلودگی به آب‌های زیرزمینی طراحی‌شده‌اند. روکش‌ها یا آسترها می‌توانند طبیعی باشند مانند لایه‌های غیرقابل نفوذ، یا می‌توانند مواد مصنوعی باشند. متداول‌ترین پوشش‌ها شامل لایه‌های رس، ژئوممبران مصنوعی مانند HDPE، 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.

6-4 روکش‌ها

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

- نفوذ آب در واحد محصورسازی زیرین را به حداقل می‌رسد.
- از فرسایش محیط‌های آلوده جلوگیری می‌کند.
- از مواجهه انسان، حیوانات و گیاهان با مواد خطرناک جلوگیری می‌کند.
- 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 سامانه‌ها است. زهکشی جانبی از ذخیره آب و فرایندهای تبخیر و تعرق از نفوذ بارش به واحد پسماند جلوگیری می‌کند.

یک پوشش کاملاً طراحی‌شده و ساخته‌شده باید نفوذ به داخل واحد محصورسازی را به حداقل برساند. به‌طورمعمول، خط اصلی دفاع در برابر نفوذ استفاده از لایه‌ای با هدایت هیدرولیکی پایین بوده است. بااین‌حال، بررسی پوشش‌های موجود نشان می‌دهد که باگذشت زمان، مسیرهای جریان می‌توانند از طرق زیر منجر به افزایش میزان نفوذ بیش‌ازحد انتظار شوند.

- کانال‌های ریشه گیاه و حیواناتی مثل کرم‌های خاکی و مورچه‌ها می‌توانند مجرایی ایجاد کنند که انتقال سریع آب از طریق پوشش را امکان‌پذیر می‌کند. به همین ترتیب، ریشه‌های گیاه می‌توانند در اعماق پوشش گسترش پیدا کنند. باگذشت زمان، گیاهان می‌میرند و ریشه‌ها تخریب می‌شوند و مجاری باز را باقی می‌گذارند. این عیب را می‌توان با استفاده از یک‌لایه سنگفرش واقع در بالای لایه زهکشی، به حداقل رساند.
- لازم است لایه‌های خاک در حد مطلوب فشرده شوند تا اطمینان حاصل شود که کمترین رسانایی هیدرولیکی حاصل می‌شود بااین‌حال، بسیاری از محققان اکنون بر این باورند که لایه‌های فشرده و مرطوب بیشتر در معرض ترک‌خوردگی ناشی از خشک شدن هستند.
- ترک‌خوردگی و افزایش رسانایی هیدرولیکی به دلیل چرخه یخزدگی - انجماد و ذوب شدن باعث ترک‌خوردگی لایه‌های خاک می‌شود. علاوه بر این، هنگامی‌که آب وارد منافذ شده و منجمد می‌شود، منبسط‌شده و درنتیجه فضای خالی افزایش‌یافته و هدایت هیدرولیکی افزایش می‌یابد.

لایه بالایی هر پوشش باید طوری طراحی شود که رواناب را به حداکثر برساند درحالی‌که فرسایش را به حداقل می‌رساند. روکش‌ها به‌طور سنتی با شیب نهایی حداقل 3 درصد برای افزایش رواناب طراحی‌شده‌اند، اما برای به حداقل رساندن فرسایش خاک لازم است به 5 درصد محدود شود. در مناطقی که ممکن است شیب‌های تندتری برای استقرار لازم باشد. فرسایش خاک‌پوششی لایه نهایی باید به 5.5 تن در هکتار در سال محدود شود.

در مناطقی که به‌راحتی 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 محلی باشد که در برابر خشک‌سالی، تغییرات دما و کمبود مواد مغذی بسیار مقاوم باشد 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 زره‌پوش 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 10-2 سانتی‌متر در ثانیه و حداقل شیب 3 درصد در پایین لایه باشند. باید از مواد دانه‌ای با قطر بیشتر از 8/3 اینچ (0/95 سانتی‌متر) 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 ذرات 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 داده‌شده است که تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌ها برای جلوگیری از ورود آب به واحد محصورسازی به‌ویژه در محیط‌های خشک است. در آب‌وهوای خشک، تبخیر و تعرق می‌تواند 80 درصد یا بیشتر از کل بارندگی را حذف کند.

مطالعات نشان داده است که افزایش شیب سطح یک پوشش 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 افزایش تبخیری درنتیجه کاهش نفوذ آب در خاک می‌شود.

5-6 طرح‌های متداول پوشش

پوشش‌های چندلایه: یک سیستم چندلایه از بالا به پایین متشکل است از:

یک‌لایه بالایی شامل دو جز: (1) یک جز سطحی رویشی یا مسلح برای کنترل میزان فرسایش خاک تا 5.5 تن در هکتار در سال، (2) یک جزء خاک با حداقل ضخامت 60 سانتی‌متر. اگر این پوشش از پوشش گیاهی حمایت می‌کند، باید حداقل از 15 سانتی‌متر از خاک بالایی استفاده شود.

یک‌لایه زهکشی گرانول یا ژئوسنتتیک با حداقل ضخامت 30 سانتی‌متر و حداقل هدایت هیدرولیکی 0.01 سانتی‌متر در ثانیه. یک‌لایه دوجزئی با هدایت هیدرولیکی کم شامل یک آستر غشای انعطاف‌پذیر باضخامت 30 تا 60 میلی‌متر و یک‌لایه خاک متراکم باضخامت 60 سانتی‌متر با رسانایی هیدرولیکی اشباع در محل کمتر از 10 به توان 7- سانتی‌متر در ثانیه

زمان: 35 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 72 تا 86 درصد ازکارافتاده‌اند. مشخص‌شده است که لایه‌های رس به‌ویژه در محیط‌های خشک، به ترک‌خوردگی حساس هستند.

پوشش خاک: بهتر است پوشش نهایی از بالا به پایین شامل لایه‌های زیر باشد:
الف- 15 سانتی‌متر خاک برای رشد گیاه و به حداقل رساندن فرسایش
ب- 45 سانتی‌متر خاک فشرده
پوشش نهایی باید دارای رسانایی هیدرولیکی کمتر یا مساوی با رسانایی هیدرولیکی لایه زیرین یا کمتر از 10 به توان 5- سانتی‌متر در ثانیه باشد. اگر سرعت نفوذ از زهکشی بیشتر باشد، واحد محصورسازی با آب پر می‌شود.
زمان: 50 ساعت برای هر هکتار
مزیت: توسعه‌یافتگی و هزینه ساخت کم
عیب: استعداد ترک‌خوردگی رس در هوای خشک، کنترل ناکافی بر نفوذ

6-6 طرح‌های پوشش جایگزین

تجربه نشان داده است که طرح‌های چندلایه، ازنظر 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 25/0 اینچ که بین دوپارچه بافته نشده قرارگرفته است.
زمان: 25 ساعت برای هر هکتار
مزیت: طراحی فشرده، ارزان‌تر بودن نسبت به پوشش‌های متداول چندلایه، عدم نیاز به اشباع‌بودن مواد

عیب: استعداد آسیب‌دیدگی ورق‌های مصنوعی نازک براثر فعالیت‌های ساخت، ریشه‌های گیاهان و ...، استعداد ترک‌خوردگی رس در هوای خشک، آسیب‌دیدگی ورق GCL در صورت عدم قرار داشتن پوشش مصنوعی در بالای آن

6-7 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 تشکیل‌شده است. بااین‌حال، به‌جای استاندارد 60 سانتی‌متر 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 طراحی‌شده است تا قبل از نفوذ، تبخیر شود. ضخامت خاک به ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثر آب و آب‌وهوای محلی بستگی خواهد داشت.

زمان: 50 تا 80 ساعت برای هر هکتار

مزیت: ارزان‌تر بودن نسبت به پوشش‌های متداول چندلایه، عدم نیاز به اشباع‌بودن مواد، تبدیل‌شدن محدوده به محیطی مناسب برای حیات‌وحش 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.

6-8 پوشش‌های مهندسی زیستی

پوشش‌های مهندسی زیستی، پوشش‌های موقتی هستند که در سایت‌هایی نصب می‌شوند که انتظار می‌رود فرونشست در آنها، متوسط یا گسترده باشد. پوشش‌های مهندسی زیستی از نوارهای پوششی متناوب نفوذناپذیر (به‌عنوان‌مثال 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 سیستم پوشش ریشه گیاهی زیرسیستم پوششی نفوذناپذیر گسترش می‌یابد تا خاک‌های سطح را آبگیری کند. پوشش‌های مهندسی زیستی شبیه پارکینگ‌هایی است که درختان و درختچه‌ها در جزایر احاطه‌شده توسط آسفالت یا بتن کاشته می‌شوند.

زمان: 25 ساعت برای هر هکتار

مزیت: ارزان‌تر بودن نسبت به پوشش‌های متداول چندلایه، عدم نیاز به اشباع‌بودن مواد، رفع شدن نشست‌ها به‌سادگی 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.

7 نمونه‌برداری

به منظور پایش خاک و یا اطمینان از عدم آلودگی، ضروری است از روش‌های استاندارد نمونه‌برداری و اندازه‌گیری استفاده‌شده و نتایج با حدود مجاز پارامترهای آلاینده خاک (مطابق قوانین و الزامات جاری ملی) مقایسه شود. در این راستا لازم است از استانداردهای معتبر ملی و راهنماهای نمونه‌برداری ابلاغی سازمان محیط‌زیست (به شرح زیر و نه محدود به آن) پیروی گردد:

عنوان	شماره ملی
استاندارد کیفیت خاک - نمونه‌برداری - قسمت 1- راهنمای طراحی برنامه‌های نمونه‌برداری	1-10962
استاندارد کیفیت خاک - نمونه‌برداری - قسمت 2- راهنمای روش‌های نمونه‌برداری	2-10962
استاندارد کیفیت خاک - نمونه‌برداری - قسمت 3- راهنمای دستورالعمل‌های ایمنی	3-10962
استاندارد کیفیت خاک - نمونه‌برداری - قسمت پنجم- روش اجرایی بررسی مناطق شهری و صنعتی در ارتباط با آلودگی خاک - آیین کار	5-10962
استاندارد کیفیت خاک - نمونه‌برداری - قسمت 6 -راهنمای جمع‌آوری، جابجایی و نگهداری خاک تحت شرایط هوازی برای ارزیابی فرآیندهای میکروزیستی، توده میکروبی و تنوع آنها در آزمایشگاه	6-10962
استاندارد کیفیت خاک - نمونه‌برداری - قسمت - 7- راهنمای نمونه‌برداری گاز خاک	7-10962
استاندارد نمونه‌برداری از پسماند و خاک برای تعیین ترکیبات آلی فرار – راهنما	13085
استاندارد کیفیت خاک – ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت و درازمدت نمونه‌های خاک – آیین کار	13200
استاندارد کیفیت خاک - راهنمای ایجاد و نگهداری برنامه‌های پایش	14530
استاندارد خاک - نمونه‌برداری خاک‌ها و مناطق آلوده با استفاده از اُگرهای دستی محفظه‌دار- آیین کار	16894
استاندارد نمونه‌برداری خاک به روش رانش مستقیم برای تعیین مشخصات زیست‌محیطی محل - راهنما	21423
استاندارد خاک- مراقبت و حمل نمونه‌های خاک – آیین کار	8738
استاندارد خاک - جمع‌آوری و حمل خاک‌های به‌دست‌آمده از دستگاه‌های نمونه‌برداری با لوله مغزه گیر	9042

8 روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده

8-1 کلیات بازسازی خاک

باوجود استفاده از سیستم‌های محصورسازی و پیشگیری از وقوع آلودگی، به دلایل مختلف آلودگی خاک رخ خواهد داد. این بخش در خصوص انتخاب فناوری بازسازی خاک‌های آلوده سایت‌های پالایشگاه‌ها و کارخانه‌های پتروشیمی، واحدهای بهره‌برداری، چاه‌های نفت و گاز و ... اعم از روش‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی یا روش‌های ترکیبی می‌باشد. البته با توجه به هدف اصلی این استاندارد، صرفاً رئوس مطلب ذکرشده و برای آگاهی بیشتر می‌توان به پیوست یک که پیوستی آگاهی‌دهنده است؛ مراجعه نمود.

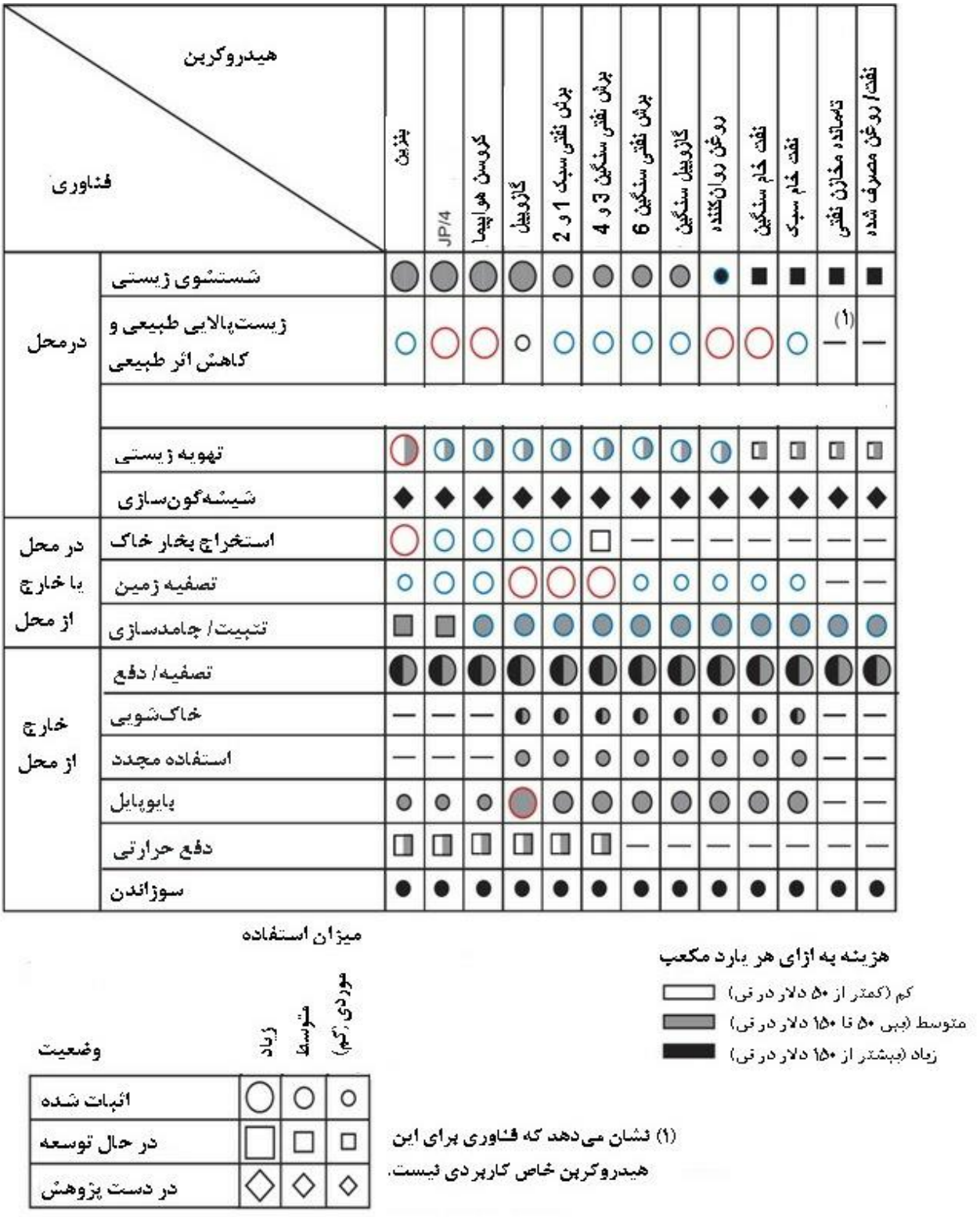
8-2 فرایند انتخاب فناوری

برای یک سناریوی آلودگی خاک، اغلب هیچ فناوری بازسازی منحصربه‌فرد مشخصی وجود ندارد. به‌طورکلی، چندین فناوری ممکن است قابل‌اجرا باشد. شکل 1، فناوری‌هایی را با توجه به کاربرد آنها برای نوع هیدروکربن موجود، تجربیات موفق و هزینه مقایسه می‌کند.

آزمایشات میدانی باید هر زمان که مفید واقع شوند، مخصوصاً برای فناوری‌های در محل انجام شود، زیرا ویژگی‌های سایت اغلب در بخش‌های مختلف منطقه تصفیه متفاوت است. خاک‌آلوده به‌طورمعمول ازنظر 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. به‌عنوان‌مثال، درحالی‌که تصفیه زیستی یا دفع حرارتی آلودگی هیدروکربن را حذف می‌کند، بر فلزات تأثیر نمی‌گذارد یا فناوری خاک‌شویی در حذف هیدروکربن به‌خوبی عمل‌نکرده، 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 تولیدی موجود یا سایت‌های دارای هیدروژئولوژی پیچیده، ممکن است یک برنامه ارزیابی فناوری جامع موردنیاز باشد.



شکل 1- کاربرد فناوری بازسازی در برابر انواع هیدروکربن

3-8 فناوری‌های بازسازی خاک

همان‌طور که در شکل 1 مشخص است، روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده به دودسته فناوری‌های در محل (in situ) و خارج از محل (ex situ) تقسیم می‌گردند.

فناوری‌های در محل

برخی از فناوری‌های در محل به‌قرار زیر می‌باشند.

- شستشوی زیستی
- روش‌های زیست پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی
- تهویه زیستی
- شیشه گون سازی

فناوری‌های خارج از محل/ در محل

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

- استخراج بخار خاک
- تصفیه زمین
- تثبیت/ جامدسازی

فناوری‌های خارج از محل

برخی از فناوری‌های خارج از محل به‌قرار زیر می‌باشند:

- تصفیه/ دفع خارج از محل
- بایوپایل
- خاک‌شویی
- استفاده مجدد
- دفع حرارتی
- سوزاندن

پیوست الف

(آگاهی‌دهنده)

روش‌ها و فناوری‌های بازسازی خاک‌های آلوده

این پیوست، یک پیوست آگاهی‌دهنده می‌باشد که در آن به‌اختصار، روش‌ها و فناوری‌های بازسازی خاک‌های آلوده ناشی از فعالیت‌های صنعت نفت، معایب و محاسن، خاک‌ها و هیدروکربن‌های هدف، هزینه، زمان و ... ارائه گردیده است. جهت دستیابی به مطالب تکمیلی می‌توانید به مستند زیر مراجعه نمایید.
EXXONMOBIL DESIGN PRACTICE SECTION XX-B4: 1996

الف- 1 فناوری‌های بازسازی خاک

همان‌طور که در شکل 1 نیز مشخص می‌باشد، روش‌های بازسازی خاک‌های آلوده به دودسته فناوری‌های در محل و خارج از محل تقسیم می‌گردند.
شایان‌ذکر است موقعیتی که بازسازی در آن انجام می‌شود لازم است ویژگی‌های حداقلی زیر را دارا باشد:
- قرار داشتن در خارج از بستر آبراهه و سایر جریانات سطحی
- قرار داشتن در خارج از اراضی کشاورزی
- قرار داشتن در خارج از اراضی جنگلی
- قرار داشتن در خارج از حوزه آبریز بلافصل سدهای تأمین آب شرب
- فاصله بیش از 2 متر از سطح سفره‌های آب زیرزمینی منطقه

الف-2 فناوری‌های در محل

برخی از فناوری‌های در محل به‌اختصار و به‌قرار زیر معرفی‌شده‌اند.

الف-2-1 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. ازآنجاکه سطح اکسیژن محلول به 8 تا 12 میلی‌گرم در لیتر محدود می‌شود، این روش محدود به مکان‌هایی با سطوح پایین آلودگی یا جایی است که زمان بازسازی اولین نگرانی نیست. می‌توان از اکسیژن خالص (حداکثر 58

میلی‌گرم در لیتر) یا پراکسید هیدروژن (90 تا 200 میلی‌گرم در لیتر) برای انتقال سطوح بالاتر اکسیژن استفاده کرد. تقریباً 3 کیلوگرم اکسیژن برای تجزیه زیستی 1 کیلوگرم هیدروکربن موردنیاز است. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-1- معایب و فواید شستشوی زیستی

معایب	فواید
به زمان زیادی (تا چندین سال) نیاز دارد تا تکمیل شود	فناوری تصفیه نسبتاً ارزان‌قیمت
راندمان بازسازی به نوع هیدروکربن بستگی دارد.	امکان تصفیه هم‌زمان خاک و آب زیرزمینی
احتمال انتقال آلاینده‌ها به سفره آب زیرزمینی	نیاز حداقلی به نیروی کار و تجهیزات
مشکل رساندن اکسیژن و مواد مغذی در خاک‌های با نفوذپذیری کم یا ناهمگون	عدم وجود باقیمانده جهت تصفیه یا دفع آتی
سمی بودن فلزات برای فعالیت‌های میکروارگانیزم‌ها	حفاری محدود.

منطقه تصفیه: منطقه خاک غیراشباع. سفره‌های آب کم‌عمق

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

بهترین شرایط خاک: خاک‌های یکدست، خاک‌های دارای ماسه زیاد، رسانایی هیدرولیکی 10^{-4} سانتی‌متر در ثانیه یا بیشتر.

میزان بازسازی: سطح TPH 500 تا 2000 پی پی ام در خاک می‌تواند به دست آید.

زمان تصفیه: معمولاً طولانی. 6 ماه تا 6 سال.

هزینه تصفیه: متوسط - بستگی به غلظت و انواع آلاینده‌ها، روش انتقال اکسیژن و شرایط خاک دارد.

الف-2-2 روش‌های زیست‌پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی

روش‌های زیست‌پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی معمولاً در شرایطی مورداستفاده قرار می‌گیرند که جرم آلاینده به‌اندازه کافی کوچک است تا در یک بازه زمانی مناسب کاهش‌یافته 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. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف- 2- معایب و فواید زیست پالایی طبیعی یا کاهش اثر طبیعی

معایب	فواید
فرایند بازسازی، طولانی است. نیاز به پایش درازمدت دارد	هزینه کم
ممکن است بازدهی بازسازی، زیاد نباشد	حداقل نیاز به نیروی انسانی و ابزار پایش
احتمال محدود شدن کاربری زمین در آینده	عدم مواجهه کارگران

منطقه تصفیه: خاک اشباع‌نشده و خاک اشباع‌شده
آلاینده‌های هدف: هیدروکربن‌های سبک‌تر، مانند BTEX یا سایر ترکیبات 3C تا 10C، محلول‌تر هستند و ازاین‌رو با فرار شدن و شستشو از بین می‌روند. هیدروکربن‌های سبک‌تر نیز مستعد تجزیه زیستی هستند. تجزیه زیستی هیدروکربن‌های سنگین‌تر (> 10C) در بازه‌های زمانی طولانی‌تری رخ می‌دهد.
بهترین شرایط خاک: نفوذپذیری کم خاک‌ها انتقال آلاینده‌ها را به حداقل می‌رساند، اما فعالیت زیستی را نیز محدود می‌کند. هرچه عمق آب‌های زیرزمینی بیشتر باشد، احتمال آلودگی آب کمتر می‌شود.
اثربخشی بازسازی: بستگی به انواع و شرایط هیدروکربن‌های موجود و تعامل آنها با خاک و آب‌های زیرزمینی دارد. 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.
وضعیت فناوری: در آب‌های زیرزمینی برای برخی از آلاینده‌ها مانند بنزین، گازوئیل و اجزای آنها ثابت‌شده است. آزمایش سایر آلاینده‌ها در حال انجام است. هنوز به‌طور گسترده برای خاک پذیرفته‌نشده است.
زمان تصفیه: سال‌ها. نظارت ممکن است برای چند دهه ادامه یابد.
هزینه تصفیه: کم. هزینه‌هایی که فقط برای نظارت است.

الف-2-3 تهویه زیستی

تهویه زیستی فرآیند تأمین حجم کم هوا در ناحیه اشباع‌نشده 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 توسعه‌یافته است. مشخص‌شده است که فراریت به‌تنهایی قادر به کاهش آلاینده‌های مشاهده‌شده در سیستم‌های استخراج بخار خاک نیست. ازآنجایی‌که 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 اعمال‌شده است. در خاک‌های با نفوذپذیری پایین، ممکن است با شکستن پنوماتیک یا هیدرولیکی، جریان هوا افزایش یابد. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-3- معایب و فواید تهویه زیستی

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

منطقه تصفیه: خاک غیراشباع.

آلاینده‌های هدف: 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: نفوذپذیری بالا.

میزان تأثیر بازسازی: برای ترکیبات سبک‌تر و آسان‌تر تجزیه شونده مناسب است مانند BTEX یا سایر هیدروکربن‌های سبک (3C تا 10C). با افزایش وزن مولکولی ترکیبات یا کاهش مقدار هیدروکربن‌های سبک در مخلوط، اثربخشی کاهش می‌یابد.

وضعیت فناوری: برای هیدروکربن‌های سبک‌تر ثابت‌شده است.

زمان تصفیه: بسته به نرخ تجزیه زیستی آلاینده‌ها از ماه‌ها تا سال‌ها متغیر است.

هزینه تصفیه: کم تا متوسط.

الف-2-4 شیشه گون سازی

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 تا 2000 درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌کند. آلودگی‌های آلی با پیرولیز (تخریب حرارتی در دماهای بالا در غیاب اکسیژن) از بین می‌روند. آلاینده‌های غیر آلی در داخل ماتریس شیشه‌ای ایجاد شده به دام افتاده‌اند. بخارآب و محصولات پیرولیز در هود گرفته می‌شوند و برای تصفیه خارج می‌شوند.

درجه حرارت بالا با استفاده از یک آرایه مربع از چهار الکترود گرافیتی که تا عمق دلخواه در خاک وارد می‌شوند، حاصل می‌شود. یک مسیر رسانا (گرافیت و شیشه پوسته‌پوسته‌شده) بین الکترودها روی زمین قرار می‌گیرد تا پس از خروج رطوبت خاک، مسیر رسانایی را حفظ کند. با اعمال جریان الکتریکی به الکترودها، 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.

شیشه گون سازی در محل منجر به کاهش 25 تا 30 درصدی حجم خاک تحت تصفیه می‌شود.

این فرایند برای مکان‌های حاوی آلودگی‌های مدفون مانند ظروف خاک‌آلوده، مخازن حاوی لجن خطرناک یا لجن‌های فرایندی مورداستفاده قرار گیرد. فلزات مدفون که تا 90 درصد مسیر رسانایی یا 5 درصد از منطقه تصفیه را اشغال کرده‌اند، درروند گرمایش الکتریکی تداخل قابل‌ملاحظه‌ای نخواهد داشت. این تصفیه با عمق آب‌های زیرزمینی یا خاک‌های نزدیک نقطه اشباع محدود می‌شود. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-4- معایب و فواید شیشه گون سازی

معایب	فواید
غلظت بالای آب و مواد آلی می‌تواند دستگاه‌های کنترل انتشار را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد.	با توجه به در محل بودن، نیازی به خاک‌برداری ندارد.
مهاجرت ترکیبات فرار و فلزات، می‌تواند باعث انتشار آلاینده‌ها در پایین ناحیه تصفیه شود.	تصفیه هم‌زمان ترکیبات آلی و معدنی
مقادیر زیاد فلزات، می‌تواند موجب اتصال کوتاه بین الکترودها شود.	ایمنی زیستی طولانی‌مدت تجهیزات شیشه‌ای شده
محدودیت عمق به 15 متر	
جرم شیشه‌ای شده، ممکن است بر کاربری آینده محل مؤثر باشد.	

منطقه تصفیه: خاک‌های غیراشباع تا حداکثر عمق 15 متر. مساحت تا حدود 50 درصد فراتر از فاصله الکترودها گسترش می‌یابد.

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

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

اثربخشی بازسازی: مواد آلی را از بین می‌برد یا حذف می‌کند و ترکیبات آلی باقی‌مانده و اکثر ترکیبات معدنی را تثبیت می‌کند.

وضعیت فناوری: در مقیاس آزمایشی و صنعتی اثبات‌شده است.

زمان تصفیه: مذاب‌سازی تقریباً 4 تا 6 تن در ساعت.

هزینه تصفیه: بالا.

الف-3 فناوری‌های خارج از محل/ در محل

برخی از فناوری‌هایی که ممکن است به‌صورت در محل یا خارج از محل استفاده شوند به‌اختصار و به‌قرار زیر معرفی‌شده‌اند:

الف-3-1 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 به‌تنهایی یا در ترکیب با چاه‌های تزریق هوا برای انتقال هوا از طریق منطقه آلوده استفاده می‌کند. ازنظر مفهومی، طراحی این سیستم در محل شبیه به مواردی است که برای تهویه زیستی استفاده می‌شود.

هنگامی‌که به‌صورت خارج از محل اعمال می‌شود، از یک لوله‌کشی مشابه بایوپایل استفاده می‌شود.

این بازسازی برای فناوری در محل نسبتاً سریع است و معمولاً به 3 ماه تا 3 سال کار نیاز دارد (مدت‌زمان 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، استفاده‌شده 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. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-5- معایب و فواید استخراج بخار خاک

معایب	فواید
تنها بر ترکیبات آلی فرار مؤثر است.	قابل‌استفاده برای تصفیه آب زیرزمینی
عدم تأثیر بر زیر سفره آب	هزینه کم
عملکرد تحت تأثیر شرایط خاک ازجمله نفوذپذیری کم و دانه‌بندی غیریکنواخت است.	امکان اجرا در نزدیکی ساختمان‌ها و تأسیسات
طولانی‌مدت برای خارج از محل	نیاز کم به نیروی انسانی و تجهیزات

منطقه تصفیه: خاک غیراشباع

آلاینده‌های هدف: ترکیبات آلی فرار.

بهترین شرایط خاک: در خاک‌های با نفوذپذیری بالا بهترین عملکرد را دارد.

میزان بازسازی: برای ترکیبات فرار بسیار زیاد است. ترکیبات غیر فرار به‌صورت فیزیکی حذف نمی‌شوند، اما ممکن است تخریب زیستی شوند.

وضعیت فناوری: به‌طور گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرد. فناوری متداول برای خاک‌های آلوده‌شده ناشی از نشت مخازن زیرزمینی ذخیره‌سازی بنزین و گازوئیل.

مدت‌زمان تصفیه: 3 ماه تا 3 سال.

هزینه تصفیه: کم.

الف-3-2 تصفیه زمین

تصفیه زمین یک فناوری تجزیه زیستی خاک با فاز جامد است که می‌تواند در محل یا خارج از محل مورداستفاده قرار گیرد. هدف تصفیه زمین این است که خاک را با افزایش جمعیت بومی میکروب‌های تجزیه‌کننده تصفیه کنیم، به‌طوری‌که تجزیه زیستی خیلی سریع‌تر از شرایط عادی رخ دهد. خاک تا حداکثر عمق 0.6 متر تصفیه می‌شود. تصفیه معمولاً شامل خاک‌برداری دوره‌ای (هوادهی)، افزودن دوره‌ای مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و کنترل رطوبت و pH است. کنترل رواناب و جمع‌آوری شیرابه نیز ممکن است در نظر گرفته شود

استفاده در محل از این فناوری با کمترین هزینه تصفیه امکان‌پذیر است. هنگامی‌که به‌صورت در محل به کار گرفته می‌شود، عملیات بسیار شبیه به لندفارمینگ پسماندهای پالایشگاهی است. تجزیه زیستی خاک می‌تواند تا 70 درصد هیدروکربن‌های سنگین را کاهش دهد. همچنین کاهش شدید PAH نیز به دست می‌آید. اگر فضا یا زمان محدود باشد، بایوپایل‌های مهندسی‌شده کاربرد بیشتری دارند. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-6- معایب و فواید تصفیه زمین

معایب	فواید
طولانی‌مدت	هزینه کم به‌ویژه در حالت در محل
نیاز به زمین بزرگ	حداقل نیاز به نیروی انسانی و تجهیزات
عدم امکان دستیابی به حد بالای پاک‌سازی	قابل کاربرد برای هیدروکربن‌های سنگین.

منطقه تصفیه: خاک غیراشباع. هنگامی‌که در محل اعمال می‌شود، محدود به عمق 60 سانتی‌متر است.

آلاینده‌های هدف: آلاینده‌های آلی زیست تجزیه‌پذیر ازجمله تمام هیدروکربن‌ها.

بهترین شرایط خاک: خاک با نفوذپذیری بالا و رطوبت 50 تا 80 درصد ظرفیت نگهداری (معمولاً 15 تا 30 درصد وزنی)، pH خنثی، دمای محیط 20 درجه سانتی‌گراد یا بیشتر.

اثربخشی بازسازی: تصفیه زیستی هیدروکربن‌های سنگین‌تر تا 70 درصد در شرایط مطلوب. هیدروکربن‌های سبک‌تر به‌طور کامل. 100 تا 2000 پی پی ام TPH قابل‌دستیابی است.

وضعیت فناوری: به‌خوبی توسعه‌یافته است.

زمان تصفیه: 6 ماه تا چند سال.

هزینه تصفیه: کم.

الف-3-3 تثبیت/ جامدسازی

افزودن اتصال‌دهنده‌های مختلف می‌تواند آلودگی‌ها 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 آلاینده‌ها را با استفاده از عوامل اتصال‌دهنده کپسوله کرده و درنتیجه خطر پسماند را کمتر می‌کند. محصول نهایی

جامدسازی یک ساختار یکنواخت ثابت سخت است که دارای یکپارچگی ساختاری است. این فن‌ها را می‌توان در محل یا خارج از محل به کاربرد.

اکثر ضایعات پالایشگاه نفت را می‌توان با استفاده از سیمان یا اتصال‌دهنده‌های پوزولانی (خاکستر، گردوغبار کوره، آهک) جامد کرد. از مواد افزودنی (سیلیکات محلول، کربن فعال، رس) می‌توان برای کمک به تثبیت استفاده کرد. این فناوری از مواد اولیه ارزان‌قیمت و تجهیزات در دسترس استفاده می‌کند. اگرچه این روش طیف گسترده‌ای از پسماندها مانند پسماندهای فلزی/آلی مخلوط را مدیریت می‌کند، اما تخریب نهایی یا حذف آلاینده‌ها را پوشش نمی‌دهد. اطلاعات محدودی در مورد یکپارچگی طولانی‌مدت مواد مدیریت‌شده وجود دارد. چرخه‌های انجماد/ذوب، شستشوی اسیدی و هوازدگی طبیعی بر پایداری طولانی‌مدت آلاینده‌های به دام افتاده تأثیر می‌گذارد. پسماندهای تثبیت‌شده اغلب نیاز به ایزولاسیون اضافی با استفاده از سرپوش یا موانع دیگر دارند. این فناوری یکی از معدود فناوری‌هایی است که برای خاک با آلاینده‌های فلزی کاربرد دارد.

غلظت بالای پسماندهای آلی (10 تا 20 درصد وزنی) مانع از جامدسازی می‌شود. غلظت بالای نمک نیز مانع از پیشرفت جامدسازی می‌شود.

یادآوری 1- دقت شود که صرف اختلاط خاک‌آلوده با موادی ازجمله سیلیس، خاک دیاتومه و امثال آنچه به‌صورت خشک و چه با افزودن آب، تثبیت و کپسوله‌سازی رخ نمی‌دهد و درنتیجه، قابل‌قبول نخواهد بود.

یادآوری 2- ازجمله ترکیباتی که با توجه به پژوهش‌های متعدد انجام‌شده در مراکز مختلف علمی، می‌تواند جهت تثبیت و جامدسازی مورداستفاده قرار گیرد، ترکیب سیمان، سدیم سیلیکات و دیاتومه است که تنها در درصدهای خاصی می‌تواند عملکرد قابل‌قبول ارائه نماید. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-7- معایب و فواید تثبیت/ جامدسازی

معایب	فواید
محدودیت‌های احتمالی کاربری زمین در آینده	مواد خام ارزان
آلاینده‌ها از بین نمی‌روند.	تجهیزات در دسترس
دغدغه مربوط به یکپارچگی طولانی‌مدت	هزینه متوسط
درصد بالای مواد آلی (10 تا 20 درصد) گیرایی سیمان را به تأخیر می‌اندازد.	مدیریت فلزات به‌خوبی مدیریت آلاینده‌های آلی
ترکیبات فرار براثر 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: مواد معدنی (فلزات) و مواد آلی.

بهترین شرایط خاک: از مواد افزودنی شیمیایی می‌توان برای تنظیم مشخصات شیمیایی خاک استفاده کرد.

اثربخشی بازسازی: بدون حذف. از مهاجرت آلاینده‌ها جلوگیری می‌کند.

وضعیت فناوری: موجود

زمان تصفیه: کوتاه.

هزینه تصفیه: متوسط.

الف-4 فناوری‌های خارج از محل

برخی از فناوری‌های خارج از محل به‌اختصار و به‌قرار زیر معرفی‌شده‌اند:

الف-4-1 تصفیه/ دفع

در بسیاری از سایت‌ها، حجم خاک‌های آلوده به‌اندازه‌ای کافی کم است که مقرون به‌صرفه‌ترین گزینه این باشد که خاک را برای تصفیه یا دفع به تأسیسات مدیریت پسماند خارج از محل انتقال دهیم. این گزینه همچنین درزمانی که منفعتی در تصفیه سریع‌تر باشد یا زمانی که فضای بسیار کمی برای تصفیه در محل وجود دارد، مورداستفاده قرار می‌گیرد. خاک‌برداری اولین گام در همه فناوری‌های بازسازی خارج از محل است. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-8- معایب و فواید تصفیه/ دفع

معایب	فواید
تأثیر نوع و غلظت آلاینده‌ها، بر استفاده از تأسیسات بیرون سایت	هزینه بسیار کم برای مقادیر کم خاک
وجود انتشارات تصادفی هوا	زمان بسیار کم برای تکمیل
محدودیت دسترسی به خاک به عللی مانند عمق و ساختار خاک	حفاری و خاک‌برداری یک فناوری کاملاً توسعه‌یافته است.
	در دسترس بودن تعداد زیادی فناوری در بیرون سایت

منطقه تصفیه: محدود به امکان‌سنجی خاک‌برداری.

آلودگی‌های هدف: قابل‌استفاده برای طیف کاملی از گروه‌های آلاینده.

بهترین شرایط خاک: محدود به شرایط خاک نیست.

اثربخشی بازسازی: بازسازی محل به این دلیل اتفاق می‌افتد که خاک‌های آلوده برداشته‌شده و با خاک‌ریزی باکیفیت قابل‌قبول جایگزین می‌شوند.

وضعیت فناوری: حفاری یک فناوری کاملاً اثبات‌شده است.

زمان تصفیه: کوتاه. نرخ حذف خاک به عمق خاک، وجود ساختارها و ویژگی‌های زیرسطحی و انواع تجهیزات حفاری مورداستفاده بستگی دارد.

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

الف-4-2 بایوپایل

بایوپایل یک واحد تصفیه زمینی مهندسی‌شده 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 طراحی‌شده است.

بایوپایل‌ها، کپه‌هایی از خاک‌آلوده هستند که در آنها هوادهی از طریق لوله‌های سوراخ شده انجام می‌شود. مواد مغذی به‌صورت دوره‌ای اضافه‌شده و شیرابه بازیافت می‌شود تا شرایط مطلوب زیستی حفظ شود. همچنین می‌توان از تقویت‌کننده‌های زیستی مانند کودها، سورفکتانت‌ها و معرف فنتون استفاده کرد. کپه‌ها معمولاً برای حفظ گرما و کنترل رطوبت/ رواناب پوشیده می‌شوند. کپه‌های سرپوشیده همچنین می‌توانند دارای منافذ خروجی هوا باشند. ازآنجاکه بایوپایل‌ها می‌توانند تا ارتفاع حدود 3 متر ساخته شوند، برای تصفیه به مساحت کمتری نسبت به تصفیه زمین نیاز دارند. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-9- معایب و فواید بایوپایل

معایب	فواید
هیدروکربن‌های سنگین به‌کندی تخریب می‌شوند.	هزینه‌های کم تا متوسط
عدم امکان دسترسی به حدود بسیار پایین	نیروی انسانی کم
فلزات حذف نمی‌شوند.	زمان تصفیه کمتر نسبت به تصفیه زمینی
	زمین کمتر نسبت به تصفیه زمینی
	تحت کنترل بودن انتشارات هوا

منطقه تصفیه: محدود به قابلیت حفاری و فضای موجود.

آلودگی هدف: آلاینده‌های آلی زیست تجزیه‌پذیر شامل همه هیدروکربن‌ها.

بهترین شرایط خاک: برای اطمینان از هوادهی مناسب، خاک‌های رسی بالا ممکن است نیاز به حجیم شدن داشته باشند.

اثربخشی بازسازی: نقاط پایانی 100 تا 2000 پی پی ام TPH. این روش نمی‌تواند حدود پایانی کمی برای هیدروکربن‌های سن بالا به دست آورد و سرعت تخریب در مقایسه با ترکیبات قابل‌تجزیه، کندتر خواهد بود. حدود بالای حذف برای هیدروکربن‌های سبک‌تر به دست می‌آید.

وضعیت فناوری: در برخی از سایت‌ها انجام‌شده است.

مدت‌زمان تصفیه: 6 ماه تا 2 سال.

هزینه تصفیه: متوسط.

الف-4-3 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 ازنظر شیمیایی یا فیزیکی به سطوح ذرات خاک متصل می‌شوند. ازآنجایی‌که 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 تصفیه‌شده یا دفع می‌شود.

در فرآیند خاک‌شویی، بخشی از خاک (60 تا 90 درصد) با آلودگی کم به محل برگردانده می‌شود. این فناوری برای آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، حلال‌ها و هیدروکربن‌ها استفاده‌شده است. سورفکتانت‌ها، کلات‌کننده (اتصال فلزات در ترکیبات حلقوی)، اسیدها یا بازها اغلب برای بهبود جداسازی ذرات و حل شدن آلاینده‌ها استفاده می‌شود.

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. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-10- معایب و فواید خاک‌شویی

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

منطقه تصفیه: باقابلیت حفاری محدودشده است.

آلاینده‌های هدف: فلزات و هیدروکربن‌های سبک‌تر. هیدروکربن‌های سنگین‌تر یا قدیمی به میزان زیادی حذف نمی‌شوند.

بهترین شرایط خاک: خاک‌های درشت مانند ماسه بهتر است. ضعیف برای خاک‌های ریز مانند لای و رس.

میزان بازسازی: بستگی به ویژگی‌های آلاینده و توزیع اندازه ذرات خاک دارد. حد نهایی 500 تا 2250 پی پی ام TPH قابل‌دستیابی است.

وضعیت فناوری: برای فلزات و هیدروکربن‌های سبک‌تر موجود است.

زمان تصفیه: دبی جریان تابعی از اندازه واحد یا تعداد واحدهای موازی است.

هزینه تصفیه: متوسط. برای فرآیندهای چندمرحله‌ای (برای دستیابی به سطوح بازسازی کمتر) زیاد است.

الف-4-4 استفاده مجدد

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

ساخت آسفالت یک فرایند خارج از محل است که در آن خاک‌آلوده بخشی از محتوای آسفالت می‌شود. برای کارخانه‌های آسفالت مخلوط سرد یا مخلوط گرم قابل‌استفاده است. خاک‌های ماسه‌ای به دلیل ساختار دانه درشت‌تر و تمایل کمتر برای حفظ آب بر خاک‌های رسی ترجیح داده می‌شوند مخصوصاً برای آسفالت مخلوط سرد. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-11- معایب و فواید استفاده مجدد

معایب	فواید
جابجایی تا کارخانه	هزینه متوسط
فعال نبودن کارخانه‌های آسفالت در زمستان	نیاز کم به نیروی انسانی و نگهداشت
عدم امکان استفاده برای آسفالت در صورت وجود ریزدانه‌های زیاد	زمان کم
محدودیت استفاده در سایت	
برخی آلاینده‌ها مانند فلزات از بین نمی‌روند.	

منطقه تصفیه: باقابلیت خاک‌برداری محدودشده است.

آلاینده‌های هدف: هیدروکربن‌های سنگین‌تر. هیدروکربن‌های سبک‌تر برای فرآیند مخلوط سرد ضعیف هستند.

بهترین شرایط خاک: درشت بهتر از ریز است. محتوای آب یک مشکل خاص برای کارخانه‌های آسفالت مخلوط سرد است.

اثربخشی بازسازی: بدون بازسازی خاک، فقط تثبیت. خاک‌های آلوده برداشته‌شده و باکیفیت قابل‌قبول جایگزین می‌شوند.

وضعیت فناوری: فناوری تکامل‌یافته.

زمان تصفیه: وابسته به میزان خاک‌آلوده و تابعی از استفاده نهایی.

هزینه تصفیه: متوسط.

الف-4-5 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. به‌طورمعمول، مواد آلوده تا دمای بین 200 تا 540 درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند. هیدروکربن‌ها و دیگر ترکیبات آلی حذف‌شده از خاک به دستگاه‌های بازسازی منتقل می‌شوند که بسته به نوع دفع‌کننده مورداستفاده و اهداف/الزامات نهایی بازسازی متفاوت است. رایج‌ترین دفع‌کننده‌های حرارتی شامل کوره‌های دوار گرم شده مستقیم و غیرمستقیم، خشک‌کن‌های حرارتی و کوره‌های نقاله است. کوره‌ها معمولاً برای کاربردهای با ظرفیت زیاد (20 تا 50 تن در ساعت) استفاده می‌شوند. نرخ حذف بیش از 99 درصد به‌طورمعمول توسط همه انواع دفع‌کننده‌های حرارتی به دست می‌آید. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-12- معایب و فواید دفع حرارتی

معایب	فواید
نیاز به کنترل انتشارات هوا	هزینه کم
ضرورت کنترل خطر انفجار در تجهیزات دفع‌کننده	پوشش گستره زیادی از هیدروکربن‌ها ازجمله PAH ها
عدم حذف فلزات	تصفیه تا حد مقادیر بسیار پایین
ضرورت انجام پیش‌تصفیه، در صورت وجود درصد بالایی از خاک رس	مشخص بودن ابعاد واحدهای متعدد برای اندازه‌های مختلف پروژه
کاهش راندمان تصفیه در حضور رطوبت	زمان کم

منطقه تصفیه: باقابلیت خاک‌برداری محدودشده است.

آلودگی هدف: ترکیبات فرار و نیمه فرار (ازجمله PAH).

بهترین شرایط خاک: خاک درشت (مقدار ماسه بالا) بیش از همه مستعد تصفیه است. رطوبت کم اقتصاد تصفیه را بهبود می‌بخشد.

اثربخشی بازسازی: می‌تواند به مقادیر بسیار پایینی دست یابد. تابعی از عملکرد دما و زمان‌ماند تصفیه. غلظت نهایی 50 تا 1500 پی پی ام TPH قابل‌دستیابی است.

وضعیت فناوری: موجود.

زمان تصفیه: خیلی کوتاه. مدت‌زمان ماند بیست دقیقه در کوره، متداول است.

هزینه تصفیه: کم تا متوسط برای حجم حدود 150،000 مترمکعب. متوسط تا زیاد برای حجم‌های حدود 15،000 مترمکعب و کمتر.

الف-4-6 سوزاندن

سوزاندن یک فرایند خارج از محل است که از دمای بالا برای فراریت و احتراق هیدروکربن‌ها در خاک و لجن استفاده می‌کند. مواد آلوده در یک محفظه بسته با اکسیژن کافی برای تبدیل آلاینده‌های آلی به دی‌اکسید کربن و آب گرم می‌شوند. دمای کارکرد بین 870 تا 1200 درجه سانتی‌گراد است.

سوزاندن در تصفیه آلاینده‌های معدنی مؤثر نخواهد بود، زیرا معمولاً با اکسیداسیون نمی‌توان آنها را از بین برد. فلزاتی که زیر 1090 درجه سانتی‌گراد فرار می‌شوند 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. معایب و فواید این فناوری به‌قرار زیر است:

جدول الف-13- معایب و فواید سوزاندن

معایب	فواید
ضرورت کنترل انتشارات هوا	از بین رفتن ترکیبات آلی

فلزات از بین نمی‌روند و ممکن است آلودگی هوا رخ بدهد.	راندمان بیشتر از 99.99 درصد برای اکثر ترکیبات آلی
نیاز به سوخت/ انرژی زیاد	همه ترکیبات آلی تصفیه می‌شوند.

منطقه تصفیه: محدود به شرایط خاک‌برداری.

آلودگی هدف: همه آلاینده‌های آلی.

بهترین شرایط خاک: خاک درشت (مقدار ماسه بالا) بیش از همه مستعد تصفیه است. ذرات بزرگ‌تر از قطر 1 اینچ باید از جریان تغذیه زباله‌سوز برداشته شوند. برای به حداقل رساندن تشکیل توده‌های بزرگ، لازم است خاک‌هایی با مقدار زیادی خاک رس، پیش‌تصفیه 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.

اثربخشی بازسازی: زباله سوزهایی که به‌درستی کار می‌کنند به‌طورمعمول به بازدهی تخریب و حذف بیشتر از 99.99 درصد دست می‌یابند که برای تصفیه پسماندهای خطرناک موردنیاز است. آنها می‌توانند برای برآوردن بازدهی 99.9999 درصد موردنیاز برای PCB ها و دیوکسین‌ها عمل کنند.

وضعیت فناوری: فناوری کوره دوار کاملاً اثبات‌شده است.

زمان تصفیه: کوتاه. زمان‌ماند کوره‌های دوار بسته به ویژگی‌های خاک و آلاینده‌ها از چند دقیقه تا بیش از یک ساعت متغیر است. زمان‌ماند احتراق‌های بسترسیال از چند ثانیه برای مواد ریز تا حدود 30 دقیقه برای ذرات بزرگ‌تر متغیر است. زمان موردنیاز برای بازسازی توسط عوامل دیگری مانند زمان موردنیاز برای حفاری و جایگزینی خاک یا تجزیه‌وتحلیل نمونه‌های خاکستر برای تأیید تخریب آلاینده‌ها محدود می‌شود.

هزینه تصفیه: متوسط تا زیاد برای حجم زیاد (حدود 50،000 مترمکعب). برای حجم‌های کمتر، پسماندهای خطرناک یا سخت، تصفیه زیاد است