

روش‌های پاک‌سازی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی

حافظ گلستانی فر*، مدیرت HSE شرکت ملی نفت ایران

مقدمه

را تهدید می‌کنند و باید زایدات حاصل از فعالیت‌های مربوط به صنعت نفت، قبل از دفع به محیط، تصفیه شوند [۲ و ۳].

ایران یکی از بزرگ‌ترین تولیدکننده‌های نفت در جهان است. مواد نفتی حین حفاری و استخراج در سایت‌های نفتی یا هنگام نقل و انتقال زمینی و دریایی آنها، با وجود تدابیری که جهت کنترل آلودگی آنها در نظر گرفته می‌شود به محیط اطراف نشت می‌کنند. وارد شدن نفت تولیدی و مشتقات آن در اثر حوادث گوناگون به محیط، باعث ایجاد آلودگی شدید زیست محیطی از جمله خاک می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت‌های صنعتی انسان، تنها عامل آلودگی محیط زیست به ترکیبات سمی و خطرناک توسط این دسته از آلاینده‌هاست [۴].

روش‌های متنوعی جهت پاک‌سازی خاک‌های آلوده وجود دارد که انتخاب و استفاده یک روش به عوامل متعددی از جمله قوانین سخت‌گیرانه‌ی موجود، هزینه، نوع آلودگی، غلظت آلودگی، نوع خاک، درجه‌ی اشباع، وضعیت زمین‌شناسی، ابعاد گسترش آلودگی، شرایط آب زیرزمینی، شرایط آب و هوایی و ... بستگی دارد. بنابراین با توجه به شرایط موجود همواره می‌توان بهترین روش پاک‌سازی را انتخاب کرد [۵]. در این راستا مطابق میزان آلودگی، سطح خطر و محدودیت‌های زمانی و اقتصادی پروژه‌ی پالایش، دو راهکار عمده اتخاذ می‌شود؛ یکی جابجایی فیزیکی خاک از محل آلودگی به محل دیگر و سپس پالایش آن و دیگری مدیریت برجای آلودگی که پالایش آلاینده‌ها از خاک در محل آلودگی انجام می‌شود [۶].

به‌طور کلی چهار دسته از فن‌آوری‌های پاک‌سازی خاک‌های آلوده شناخته شده‌اند:

- روش‌های فیزیکی و شیمیایی
 - روش‌های بیولوژیکی
 - روش‌های تثبیت (همچنین ذخیره‌سازی و تثبیت)
 - روش‌های تخریب حرارتی
- که گاه ممکن است ترکیبی از این روش‌ها به کار رود [۷ و ۸].

۱- روش‌های فیزیکی و شیمیایی

هدف از روش‌های فیزیکی و شیمیایی پالایش تغییر محیط شیمیایی به‌نحوی است که از انتقال مواد سمی به دیگر عناصر سیستم خاکی جلوگیری شود. مثال‌هایی که اینجا ارائه می‌شود توسط انتقال به گیاهان، آب زیرزمینی یا موجودات زنده‌ی خاک است. چنین اقدامات پیشگیرانه‌ای ممکن است شامل

خاک قشر طبیعی سطحی زمین با ساختمانی نرم و ضخامتی متغیر است که از تغییر و تحول سنگ مادر تحت تأثیر پدیده‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به‌وجود آمده است. خاک یکی از منابع ارزشمند طبیعت است که حدود ۹۶ درصد مواد غذایی مورد نیاز انسان از آن تأمین می‌گردد. در نبود خاک سالم، حیات روی کره‌ی زمین امکان‌پذیر نخواهد بود. خطر آلودگی خاک کمتر از خطر آلودگی هوا نیست. از دیدگاه جهانی پس از آب و هوا، خاک سومین جزء عمده‌ی محیط‌زیست تلقی می‌شود. ورود مواد، ارگانوسم‌های زیستی یا انرژی به داخل خاک سبب تغییر کیفیت آن می‌گردد. همین مسأله باعث می‌شود خاک از حالت طبیعی خود خارج شود. بنابراین مدیریت صحیح برای داشتن خاکی سالم لازمه‌ی بقای انسان است.

خاک‌ها علاوه بر اینکه تأمین‌کننده‌ی مواد غذایی هستند، خاصیت تصفیه‌کنندگی نیز دارند. خاصیت خاک‌ها در اثر خواص فیزیکی (عمل نفوذ آب از منافذ)، خواص شیمیایی (جذب سطحی و تبخیر) و خواص زیستی (تجزیه و فساد مواد آلی) آنها حاصل می‌گردد. آلودگی خاک عبارت است از وجود، پخش یا آمیختن یک یا چند ماده‌ی خارجی در خاک به مقدار و مدتی که کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن را طوری که برای انسان یا سایر موجودات زنده یا گیاهان یا آثار و ابنیه زیان‌آور باشد، تغییر دهد. به‌عبارت دیگر هرگونه تغییر در ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خاک طوری که استفاده از آن ناممکن گردد آلودگی خاک نامیده می‌شود. آلاینده‌های خاک عموماً به دو نوع اصلی تقسیم می‌شوند. درشت‌آلاینده‌ها که معمولاً با مقادیر زیادی وارد خاک می‌گردند و ریزآلاینده‌ها که معمولاً با مقادیر جزئی و در شرایطی هستند که می‌توانند طبیعت بعضی از واکنش‌های بیوشیمیایی کلیدی خاک‌زیان را اصلاح نمایند [۱].

یکی از مهم‌ترین گروه‌های آلاینده‌های آلی محیطی، هیدروکربن‌های نفتی هستند که اغلب از طریق صنایع نفت و گاز وارد محیط زیست می‌شوند. این دسته از ترکیبات TPH^۱ ترکیبی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک، آروماتیک، هتروسیکلیک و آسفالتن‌ها هستند. هیدروکربن‌های نفتی در زمره‌ی آلاینده‌های خطرناک مقاوم و شامل ترکیباتی هستند که به‌صورت زیستی در زنجیره‌ی غذایی تجمع می‌کنند و سمیت حادی دارند. این ترکیبات اثرات سوئی بر محصولات کشاورزی، آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و کیفیت خاک اراضی دارند. بنابراین ورود آنها به زنجیره‌ی غذایی از طریق آب، هوا و خاک آلوده به‌شدت سلامت انسان

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (hoseinmir@gmail.com)

کاهش پویایی و تحرک تغییر ساختمان شیمیایی یا هر عامل دیگری باشد. روش‌های فیزیکی و شیمیایی شامل موارد زیرند:

۱-۱- حفاری و خاک‌برداری

در این روش آلاینده‌ها را به مکان دیگری انتقال داده و خاک آلوده را برای پاک‌سازی آلاینده‌ها به مکانی امن خارج از آن محل انتقال داده شود. در این روش لازم است مرز آلودگی، شناسایی منطقه‌ای مناسب جهت تخلیه (لندفیل) و مقادیر زیادی ماده‌ی جایگزین سالم (خاک سالم) تعیین شود. از جمله مشکلات این روش، افزایش احتمال آلودگی آب زیرزمینی در اثر آلودگی ستون خاک، تردد زیاد برای جابجایی خاک، سر و صدا، آلودگی هوا و آبهای سطحی است.

۲-۱- دفن کردن

در این روش، خاک‌های آلوده در یک یا چند محل جمع‌آوری شده و به‌منظور اجتناب از پراکندگی، آلاینده‌ها در یک گودال عمیق (لندفیل) دفن می‌شوند. باید محلی را انتخاب کرد که از هر نظر خصوصیات دفن پسماند را داشته باشد و تا حد امکان در آینده باعث آلودگی آبهای زیرزمینی یا هوا نگردد.

۳-۱- اکسیداسیون

اکسیداسیون یک فن‌آوری پالایش مؤثر متداول برای خاک‌های آلوده به‌وسیله‌ی مواد آلی و شیمیایی ستمی و سیانیدهاست. عوامل اکسیدکننده‌ی استفاده شده در این فن‌آوری شامل دامنه‌ی وسیعی از مواد است که متداول‌ترینشان پراکسید هیدروژن، ازن و پرمنگنات پتاسیم هستند. استفاده از فن‌آوری اکسیداسیون جهت احیاء در محل در مناطق منبع آلودگی و برای تصفیه‌ی نهر با موفقیت همراه بوده که عمدتاً برای بنزن، اتیل بنزن، تولوئن و زایلن (BTEX) به‌همراه PAH's، فنول‌ها و آلکین‌ها استفاده می‌شوند [۱].

۴-۱- تبادل یون و ترسیب

ترکیبات خاک با مقادیر زیاد ظرفیت تبادل کاتیونی قادر به پیوند مواد شیمیایی آلی با بار مثبت و فلزات به‌روشی که آنها را به‌طور شیمیایی بی‌تحرک می‌سازد و از این‌رو باعث کاهش خطر وارده توسط آنها به محیط خاک می‌گردد. افزودن نرم‌کننده‌های خاک از قبیل رزین‌های مصنوعی ژئولیت یا خاک رس به افزایش ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی خاک کمک می‌کند و از این‌رو پیوند آلاینده‌های با بار مثبت را به گروه‌های عاملی منفی خاک ارتقاء می‌دهد.

۵-۱- جذب روی کربن فعال گرانوله (GAC)

این فن‌آوری بستگی به گرایش بیشتر ترکیبات آلی به جذب بر سطح

کربن فعال دارد. تمایل جذب بسته به نقطه‌ی جوش، وزن مولکولی ماده‌ی آلی افزایش می‌یابد. از این‌رو فن‌آوری جذب روی کربن فعال گرانوله (GAC) برای ترکیبات آلی فرار، هیدروکربن‌های با وزن‌های مولکولی زیاد، ترکیبات آلی فرار هالوژنه (VOC) و اشکال هالوژنه‌ی آنها به‌همراه بعضی مواد منفجر شونده و آفت‌کش‌ها مناسب‌ترین است. پالایش از طریق جذب روی کربن فعال روشی است که می‌تواند در فاز مایع در زمان تصفیه‌ی آب زیرزمینی یا در فاز گازی مانند تصفیه‌ی گازهای خروجی از روش‌های پالایش استخراج بخار خاک اجرا گردد. رس با داشتن بار الکتریکی زیاد در بسیاری موارد یک جاذب مناسب برای جذب آلاینده‌هاست.

۶-۱- استخراج بخار خاک (SVE)

استخراج بخار خاک که فن‌آوری معروفی برای پالایش خاک‌هاست فرآیند نسبتاً ساده‌ای به‌منظور حذف آلاینده‌های آلی فرار و آنهایی که به‌آسانی تبخیر می‌شوند از ناحیه‌ی هواده دارد که آلاینده‌های مقاوم یا تجمع یافته در بالای سطح ایستایی آب هستند. فرآیندهای فنی این فن‌آوری شامل تزریق هوای تمیز به ناحیه‌ی غیراشباع به‌منظور تأثیر بر جداسازی بخارات آلی از محلول خاک به‌وسیله‌ی تفکیک بین محلول خاک و هوای خاک است. بخارات هوای خاک سپس توسط چاه‌های استخراج خلأ حذف می‌گردند [۱].

فن‌آوری استخراج بخار خاک هنگامی کاربرد دارد که آلودگی‌های زیر سطح زمین از نوع بخار شندی و لایه‌های خاک همگن و با نفوذپذیری زیاد باشند.

۱-۶-۱- مزایای روش استخراج بخار خاک

- نسبت به روش‌های دیگر اقتصادی است.
- سبب کمترین دست‌خوردگی در سایت می‌شود.
- برای تصفیه به زمان کمی نیاز دارد (در شرایط بهینه ۶ ماه تا ۲ سال)
- برای تصفیه‌ی هر دو فاز حل شندی و آزاد از آلودگی مفید است.

۲-۶-۱- معایب روش استخراج بخار خاک

- آلودگی‌هایی که در شروع کار دفع می‌شوند بسیار زیاد هستند اما این نسبت با گذشت زمان کاهش می‌یابد
- این روش در خاک‌های لایه‌لایه با نفوذپذیری کم و درصد رطوبت زیاد مؤثر نیست [۹].

۷-۱- خاک‌شویی^۲

خاک‌شویی یکی از روش‌های مؤثر پالایش خاک جهت حذف آلاینده‌های فلزی از خاک‌های آلوده است. در این فن‌آوری خاک آلوده توسط آب و همزن مکانیکی تمیز می‌شود تا آلاینده‌های خطرناک

حوضچه‌ی ته‌نشینی ساده، محلول شوینده از خاک پاک جدا شده و برای استفاده‌ی مجدد یا به واحد تصفیه‌ی پساب هدایت می‌گردد و خاک پالایش شده نیز به محل برگردانده می‌شود [۱۱].

روش خاک‌شویی مزیت‌های زیر را دارد:

- فرآیند در جهت حذف ماندگار فلزات از خاک‌های آلوده است و می‌تواند امکان بازیافت آنها را فراهم کند
- حجم خاک آلوده شده را به شدت کاهش می‌دهد
- خاک شستشو شده می‌تواند دوباره به محل بازگردانده شود

موفقیت فرآیند خاک‌شویی نیازمند موارد زیر است:

- دانستن ویژگی‌های کامل خاک
- مطالعه‌ی نوع فلزات
- دانستن ارتباط میان ماتریس خاک و فلزات

خاک‌شویی می‌تواند به‌طور مستقل یا در ترکیب با فن‌آوری‌های پالایش دیگر استفاده شود [۱۲].

۲- روش‌های بیولوژیکی

از دیگر روش‌های پاک‌سازی که به کمک میکروارگانیسم‌ها انجام می‌شود روش تصفیه‌ی بیولوژیکی است. روش‌های مختلف پاک‌سازی بیولوژیکی عبارتند از:

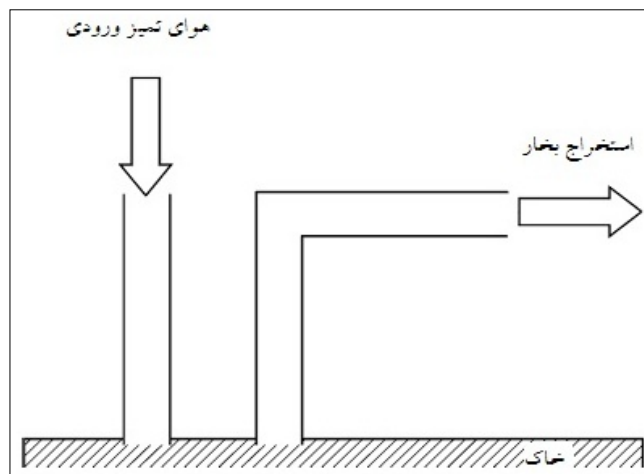
۱-۲- زیست‌پالایی (پاک‌سازی زیستی^۲)

یکی از فن‌آوری‌های مهم و به‌روز دنیا جهت پاک‌سازی خاک‌های آلوده، زیست‌پالایی است. در این روش به کمک تکثیر و تلقیح میکروارگانیسم‌های مؤثر در تجزیه‌ی یک نوع ویژه‌ی آلاینده، خاک‌های آلوده را پاک‌سازی می‌کنند. در مقایسه با روش‌های فیزیکی و شیمیایی و حرارتی، این روش کم‌هزینه‌تر بوده، به‌صورت طبیعی انجام می‌شود و مزایای قابل توجهی دارد. میکروارگانیسم‌ها نیاز به شرایط مناسبی برای رشد و زنده ماندن خود دارند که این عوامل شامل pH مناسب، دما، اکسیژن، شوری و عناصر غذایی است. با توجه به تنوع متابولیکی میکروارگانیسم‌ها و توان استفاده‌ی آنها از آلاینده‌های محیطی، با یک انتخاب مناسب می‌توان از آنها در جذب، کاهش و حذف کامل آلاینده‌های مختلف سود برد. زیست‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت تحت تأثیر عوامل شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی است. باکتری‌ها با تغذیه از هیدروکربن‌های موجود در خاک به‌عنوان منبع غذایی، باعث پاک‌سازی آلودگی‌های نفتی می‌شوند [۱].

حذف یا حجم آنها کاهش یابد. بنابراین استفاده از پیوندهای انتخابی آلاینده‌ها به مواد ریز (لای و خاک رس) را نسبت به مواد درشت خاک از قبیل شن و ماسه میسر می‌سازد. اضافه کردن افزودنی‌های شیمیایی یا سورفاکتانت‌ها به آب این فرآیند را ارتقاء می‌بخشد. بعد از جداسازی دو بخش خاک، مواد زیر حامل بخش اصلی آلاینده‌ها توسط دیگر روش‌های پالایش بیشتر تصفیه می‌شود تا از آلاینده‌های تفکیک شده عاری گردد. از محاسن این روش آنست که برای انواع مختلفی از ترکیبات قابل استفاده است. اما به دلیل استفاده‌ی زیاد از آب و به تبع آن حجم زیاد پساب و هزینه‌ی دورریزی، استفاده از این روش چندان متداول نیست. البته کارآیی روش خاک‌شویی به گذرپذیری، تخلخل همگنی، بافت و کانی‌شناسی خاک بستگی دارد [۱۰ و ۱۱].

خاک‌شویی به دو شکل کلی؛ در محل (درجا) و خارج از محل قابل اجراست. در خاک‌شویی درجا پاک‌سازی خاک با استفاده از تزریق یک شوینده‌ی آبی به درون خاک توسط گمانه‌های عمودی صورت می‌گیرد. این محلول شوینده می‌تواند به درون محدوده‌ی خاک غیراشباع (بالای سطح ایستابی) یا محدوده‌ی خاک اشباع تزریق گردد. محلول شوینده با عبور از محدوده‌ی آلوده به‌همراه آلودگی جدا شده از خاک وارد جریان آب زیرزمینی می‌گردد. جریان خروجی در پائین دست محل آلوده دوباره استخراج شده و برای دفع یا تزریق مجدد تصفیه می‌گردد. محلول تزریقی می‌تواند شامل سورفاکتانت‌ها، کمک حلال‌ها یا آب زیرزمینی تصفیه شده باشد.

در خاک‌شویی خارج از محل پس از غربال کردن ابتدایی خاک و جداسازی دانه‌های بزرگ‌تر و نخاله‌ها، باقیمانده‌ی خاک وارد یک مخزن شوینده می‌شود. مخزن محتوی آب و مواد شوینده با ایجاد حرکات چرخشی، امکان تماس آب و شوینده‌ها با خاک را فراهم می‌کند. پس از شسته شدن خاک، با ایجاد یک



شکل ۱ | نمودار طرح کلی جهت توضیح چیدمان فنی لازم برای استخراج بخار خاک (SVE)

الفاء بیولوژیکی^۴:

مبنای این روش اضافه کردن مواد مغذی (نیتروژن، فسفر، اکسیژن، آب و...) به خاک آلوده برای تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌ها به محیط آلوده است.

ازدیاد بیولوژیکی^۵:

اضافه کردن میکروارگانیسم‌های اگزوژن (جداسازی شده از محیط‌های دیگر) به خاک آلوده‌ای که میکروارگانیسم‌های آن قادر به تجزیه‌ی آلاینده‌های خاص نیستند. هیدروکربن‌ها منبع کربن مورد استفاده‌ی میکروارگانیسم‌ها هستند و دیگر مواد مغذی مثل نیتروژن و فسفر هم باید در خاک موجود باشند. همچنین مقدار رطوبت، دمای خاک و pH نیز باید تنظیم شوند.

۲-۲- پالایش فاز جامد

در اینجا خاک آلوده در بالای زمین در بسترهای آماده، تصفیه می‌گردد. اما با وجود هزینه‌ی کم آن نسبت به تصفیه‌ی بستر دوغاب، چندان اثربخش نیست و به زمان و فضای بیشتری جهت آماده‌سازی بسترها نیاز دارد. به‌منظور انجام این روش پالایش سه روش اصلی به‌طور متداول استفاده می‌شوند: کشت خاک^۶، توده‌های بیولوژیکی خاک^۷ و کمپوست (کودسازی) [۱].

۳-۲- لندفارمینگ یا کشت خاک

در این روش خاک حفاری شده به‌صورت لایه‌های نازک روی زمین قرار می‌گیرند و مرتباً شخم زده و زیر و رو می‌شوند تا با هوا مخلوط شده و فعالیت بیولوژیکی را در بستر ارتقاء بخشند. در صورت نیاز، مواد مغذی اضافه می‌گردند؛ زیرا کمبود و فقدان اکسیژن و مواد مغذی منجر به تأخیر در فرآیندهای تجزیه‌ی بیولوژیکی می‌گردد. عمق بسته به قابلیت‌های تجهیزات هوادهی ۳۰-۴۵ سانتی‌متر است. کنترل pH و مواد مغذی شامل افزودن دوره‌ای کود، آهک یا سولفور است و معمولاً به‌صورت مایع به خاک تزریق می‌شود.

مزایای لندفارمینگ

- طراحی نسبتاً آسان و اجرایی
- مؤثر بودن بر اجزای آلی با تجزیه‌ی مولکولی کم
- زمان کوتاه پاک‌سازی ۶ ماه تا ۲ سال (بسته به شرایط مطلوب)

معایب لندفارمینگ

- برای غلظت بیش از ۵۰۰۰۰ ppm هیدروکربن‌های نفت اثر بخش نیست
- نیازمند زمین زیادی جهت اصلاح خاک است

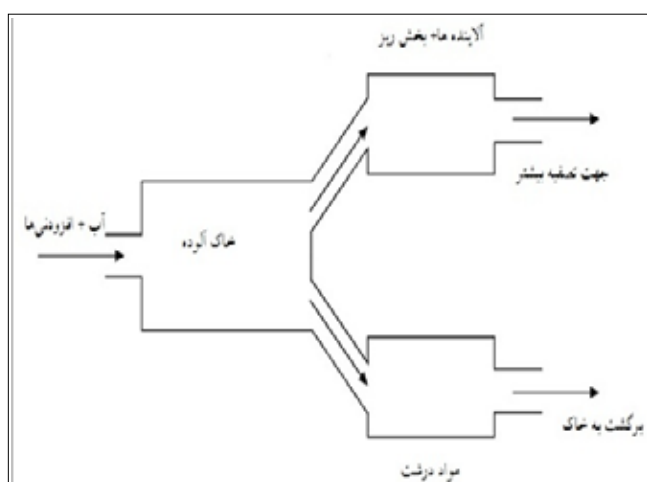
■ غبار و بخارات زیادی در طول عملیات به‌وجود می‌آیند که باعث نگرانی است [۱۳]

۴-۲- توده‌های بیولوژیکی خاک

این روش ترکیبی از روش کشت خاک و کمپوست است. خاک حفاری شده به شکل توده‌های با ارتفاع چندین متر انباشته می‌گردد. جهت ارتقاء فعالیت تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها، هوا از میان توده دمیده می‌شود. در صورت نیاز، مواد مغذی نیز اضافه می‌گردد. با کنترل مقدار مواد مغذی، اکسیژن، رطوبت، دما و pH، بازده این روش افزایش می‌یابد. توده‌ها با پلی‌اتیلن پوشیده شده و در صورت نیاز میکروارگانیسم، آب و مواد مغذی اضافه می‌گردد [۱].

۵-۲- کمپوست (کودسازی)

کمپوست از کلمه‌ی کمپوست به معنی مخلوط یا مرکب اقتباس شده و به عمل تجزیه‌ی مواد آلی نامتجانس که توسط میکروارگانیسم‌های مختلف در حضور رطوبت و گرما در محیط هوایی انجام می‌شود. کمپوست فرآیندی هوایی است که طی آن کود آلی توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده و تولید گرما دی‌اکسیدکربن، بخار آب و هوموس می‌کنند. در روش کمپوست‌سازی، پسماندهای قابل تجزیه‌ی بیولوژیکی یا خاک آلوده، با مواد حجم‌دهنده از قبیل نی مخلوط می‌گردند تا گردش جریان هوا و آب موردنیاز برای فعالیت‌های بیولوژیک میکروارگانیسم‌ها را تسهیل کنند. مواد مغذی نیز در صورت نیاز اضافه می‌شوند. تجزیه‌ی بیولوژیکی پسماندها یا آلاینده‌ها برخی مواقع در تلبار توده‌های کمپوست ساکن رخ می‌دهد؛ جایی که خاک به شکل توده‌هایی تلبار می‌شود و به‌طور دوره‌ای با دمنده‌ها یا پمپ‌های وکیوم هوادهی می‌گردد [۱۴].



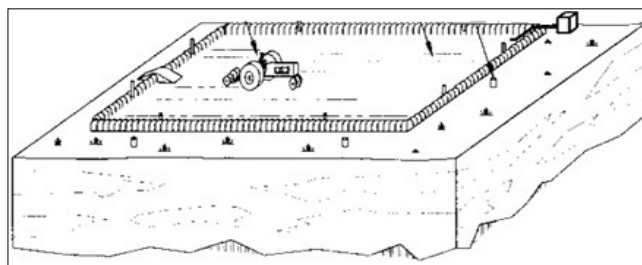
۲ | نموداری از طرح کلی مراحل مختلف در خاک‌شویی

۲-۶- گیاه‌پالایی^۱ (پاک‌سازی زیستی با کمک گیاه)

گیاه‌پالایی، فن‌آوری ارزان و مؤثری جهت کنترل آلودگی بوده که قادر به حذف طیف وسیعی از آلاینده‌های آلی است و به دلیل دارا بودن مزیت‌هایی مثل کمترین به‌هم خوردگی خاک، حجم کم ضایعات، جذب اشعه‌ی خورشید، پایداری بسیار خوب، سادگی کاربرد، امکان استفاده در سطح وسیع و کمک به رشد گیاهان دیگر جهت رفع آلودگی‌ها، مورد توجه خاص قرار گرفته است. به گیاهان اجازه داده می‌شود در خاک آلوده به ترکیبات نفتی رشد و مواد نفتی را با مکانیزم‌های خاصی تجزیه کنند [۴].

گیاه‌پالایی با استفاده از مهندسی گیاهان سبز شامل گونه‌های علفی و چوبی برای برداشت مواد آلاینده از آب و خاک یا کاهش خطرات آلاینده‌های محیط زیست نظیر فلزات سنگین، عناصر کمیاب، ترکیبات آلی و مواد رادیواکتیو به کار برده می‌شود [۱۵].

این فن‌آوری بستگی به استفاده‌ی گیاهان جهت حذف، تجزیه یا تثبیت آلاینده‌ها در محل‌های آلوده‌ی نسبتاً کم عمق دارد. پالایش گیاهی از طریق فعالیت‌های مختلف بیولوژیکی عمل می‌کند و بستگی به طبیعت و شیمی آلاینده‌ی خاک دارد. هدف این روش، تجمع فلزات سنگین در اندام‌های هوایی و برداشت گیاهان از منطقه‌ی مورد نظر است. در این روش، گیاهان در محیط‌های آلوده مستقر می‌شوند. ریشه‌های گیاهان مذکور پس از نفوذ به بستر خاک، آلاینده‌های فلزی را جذب کرده، آنها را به بخش‌های هوایی منتقل و در آنجا ذخیره می‌کنند [۱۰].



شکل ۳ | نندفارمینگ

در این روش گیاه با استفاده از مکانیسم‌های پاک‌سازی متنوعی در ناحیه‌ی ریشه‌ی گیاه یا درون خود گیاه نظیر تثبیت گیاهی (Phytostabilization)، استخراج گیاهی (Phytoextraction)، تبخیر گیاهی (Phytovolatilization)، تجزیه‌ی ریزوسفری Rhizodegradation، ریزوفیلتراسیون (Rhizofiltration)، تجزیه‌ی گیاه (Phytodegradation) و کنترل هیدرولیکی، آلاینده‌ها را از آب و خاک حذف می‌کند [۱۶ و ۱۷]. به‌طور کلی گیاهان مختلفی وجود دارند که می‌توانند عمل گیاه‌پالایی را در خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی را انجام دهند. اما نتیجه‌ی بررسی‌های انجام شده در دنیا نشان می‌دهد که گونه‌های چمنی و لگومی به دلیل سیستم ریشه‌ای-افشان برای انجام گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی مناسبند [۱۸ و ۱۹].

۳- روش‌های تثبیت/جامدسازی

فرآیند تثبیت معمولاً به فرآیندی اطلاق می‌گردد که ریسک و خطر پسماند و مواد آلاینده‌ی موجود با کاهش حلالیت، کاهش حرکت‌پذیری و تغییر فرم مواد به حالتی با سمیت کمتر تبدیل می‌شود و جامدسازی نیز به فرآیندی اطلاق می‌گردد که مواد ذرات آلاینده در محیطی یکنواخت از یک ماده‌ی جامد با ساختار یکپارچه به‌صورت کاملاً مناسب احاطه می‌شود. تثبیت و جامدسازی یک روش پالایش خاک است که در آن مواد آلاینده به دلیل واکنش با مواد افزودنی یا فرآیندهایی مختلف، ثابت و غیرمتحرک می‌شوند. فرآیندهای تثبیت و جامدسازی را می‌توان در محل سایت آلوده (in situ) یا در خارج از آن (ex situ) انجام داد. در فرآیند تثبیت و جامدسازی در محل، عملیات اختلاط و واکنش گر و خاک آلوده بدون خارج کردن مواد آلاینده در محل سایت انجام می‌شود. در فرآیند تثبیت و جامدسازی خارج از محل، فرآیند اختلاط در بالاتر از سطح خاک انجام می‌گردد و خاک، تثبیت شده یا به سایت قبلی برگردانده شده و به‌صورت دفن در یک سلول دفع می‌گردد یا به تأسیسات دفع دیگری منتقل می‌شود [۲۰].

۱ | مقایسه‌ی روش‌های مختلف حرارتی حذف آلاینده‌های خاک

متغیرها	سوزاندن	رها سازی گرمایی	پیرولیز
محدودیت‌های روشی و اقتصادی	سیستم‌های پالایش فلزات سنگین و کنترل‌کننده‌های مستقیم انتشار دی‌اکسیدها و فوران‌ها مورد نیاز است	احتیاج به دستگاه خشک‌کننده و آبگیردار و در بسیاری از موارد نیاز به تصفیه‌ی تکمیلی دارد	برای از بین بردن ترکیبات غیرآلی کارا نیست و کارایی آن وابسته به میزان رطوبت خاک است
تأثیرات اجتماعی	در بسیاری موارد موجب اعتراض مردم ساکن در منطقه می‌شود	اگر مرحله‌ی بعدی فرآیند، سوزاندن باشد موجب اعتراض مردم ساکن در منطقه می‌شود	هیچ‌گونه تضادی با زندگی شهروندان ندارد و موجب اعتراض نمی‌شود
خطرات احتمالی برای محیط زیست	پتانسیل انتشار مواد خطرناک دی‌اکسیدها و فوران‌ها و نیز تولیدات جانبی سوخت را دارد	خطر زیاد انتشار مواد فعال و فرار وجود دارد. همچنین در صورت ادامه توسط روش سوزاندن احتمال تشکیل دی‌اکسیدها و فوران‌ها را دارد	پتانسیل خروج ترکیبات خطرناک دی‌اکسیدها و فوران‌ها و گازهای تولید شده‌ی جانبی از سوزاندن وجود دارد

۴- روش‌های حرارتی

تبخیر و تخریب آلاینده‌ها توسط روش‌های حرارتی، بسیار مؤثر است که طی حرارت دادن خاک آلوده در کوره‌هایی در دماهای ۷۰۰-۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حاصل می‌گردد. پس از آن جهت تصفیه‌ی بیشتر گاز خروجی کوره در دماهای بیشتر (۱۲۰۰-۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) اکسیداسیون کامل مواد آلی فرار انجام می‌شود. در حالت کلی به معنای استفاده از حرارت به‌منظور جداسازی و تبدیل مواد آلی به فاز دیگری که راحت‌تر قابل جداسازی باشد یا سوزاندن (که در این حالت و با این دما در آلاینده‌ها تغییرات ساختاری شیمیایی ایجاد کرده و پیوند بین اتم‌ها و مولکول‌های آنها را از بین می‌برد) است. روش‌های حرارتی شامل فن‌آوری‌های مختلفی هستند که مهم‌ترین آنها عبارتند از: سوزاندن، رهاسازی گرمایی و پیرولیز. ■

۲ | روش‌های مؤثر مختلف با روش‌های پالایش متناظر با آنها [۱]

حالت عملیاتی	روش مناسب پالایش
در محل	استخراج خلأ خاک (SVE)، رسوب‌شویی
در محل یا در بسترهای آماده	جذب سطحی کربنه، تبادل یون
در محل یا در مخزن	کلرزدايي، جامدسازی سیمانی، تبدیل به شیشه، جامدسازی آهکی، میکروکپسوله کردن قابل‌ارتجاع حرارتی، عریان‌سازی حرارتی
تمام روش‌ها (در محل، در مخزن و در بستر)	خشک‌سازی، اکسیداسیون، تجزیه‌ی بیولوژیکی (همه‌ی روش‌ها)
در بستر آماده	فتولیز
در بستر آماده یا در مخزن	ترسیب، کاهش، جذب سطحی کربنه، تبادل یون
در مخزن	پیرولیز، مادون قرمز، کوره‌ی دوار، بستر سیال، خاک‌شویی

پانویس‌ها

1. Total Petroleum Hydrocarbon
2. Soil Washing
3. Bioremediation
4. Bioaugmentation

5. Biostimulation
6. land farming,
7. soil biopiles
8. Phytoremediation

منابع

- [۱] گلستانی فر حافظ، ملای جلال الدین. آلودگی خاک (منشأ، پایش و پالایش). انتشارات خانیان، ۱۳۹۵
- [2]-Wang J, Xu HK, Guo SH. isolation and characteristics of a microbial consortium for effectively degrading phenanthrene. *Petroleum Science Journal*. 2007;4(3):6875-.
- [3]- Joner EJ, Hirmann D, Szolar OH, Todorovic D, Leyval C, Loibner AP. Priming effects on PAH degradation and ecotoxicity during a phytoremediation experiment. *Environmental Pollution*. 2004;128(3):42935-.
- [۴] بشارتی حسین، پالایش میکروبی خاک‌های آلوده به مواد نفتی و بررسی نقش ریزوسفر در کارایی ریزجانداران. نشریه‌ی پژوهش‌های خاک علوم خاک و آب، جلد ۲۸ شماره‌ی ۲، ۱۳۹۳
- [۵] بابالار محمود، رئیسی علی، عبدالمجید جمال، تأثیر روش‌های حرارتی و شستشو در پاک‌سازی یک خاک رسی آلوده به گازوئیل. مجله‌ی تحقیقات آب و خاک ایران، دوره‌ی ۷۴، شماره‌ی ۲، تابستان ۱۳۹۵
- [۶]- بسالت پور علی اصغر، حاج‌عباسی محمد علی، درستکار وجیهه، ترابی غزال. اصلاح خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی به روش ترکیبی زمین‌پالایی-گیاه‌پالایی، مجله‌ی علوم آب و خاک، جلد-۱۴، شماره‌ی-۵۲، ۱۳۹۰
- [7]- Nathanail CP, Bardos RP. *Reclamation of Contaminated Land*. UK: John Wiley & Sons; 2004.
- [8]-Sharma H, Reedy K. *Geoenvironmental Engineering*. 3th ed. Canada: John Wiley & Sons; 2004.
- [۹]-محمدی اکبرآبادی مصطفی، هاشمی نمین شیوا، حسین پور محمدعلی، بررسی روش استخراج مواد فرار در بهسازی خاک‌های آلوده. همایش زمین‌شناسی و محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، سال ۱۳۸۷.
- [۱۰] تابنده لیل، معرفی روش‌های مختلف اصلاح خاک‌های آلوده، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، نشریه‌ی فنی، شماره‌ی ۱۶، سال ۱۹۳۱
- [۱۱] گیتی‌پور سعید، فیروزبخت سعید، میرزایی احسان، خلیلی ایمان. بازدهی محلول‌های شوینده برای
- خاک‌شویی آلاینده‌ی آرسنیک تحت تأثیر دما، نشریه‌ی علمی پژوهشی امیرکبیر، مهندسی عمران و محیط زیست، دوره‌ی-۴۷، شماره‌ی-۳، زمستان ۱۳۹۴
- [۱۲]- حسین پور محمدعلی، گیتی‌پور سعید، جانقریان مهدی. بررسی استفاده از روش خاک‌شویی (Soil Washing) جهت حذف فلزات از خاک‌های آلوده، چهارمین همایش زمین‌شناسی و محیط زیست، ۱۳۸۷.
- [13]-Chekol T1, Vough LR, Chaney RL. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils: the rhizosphere effect. *Environ Int*. 2004 Aug;30(6):799804-.
- [14]-Hait S, Tare V. Optimizing vermin stabilization of waste activated sludge using vermicompost as bulking material. *Waste Manage*. 2011 Mar; 31(3): 502-11.
- [۱۵]- فرشادفر محسن، کمری الهیار. فن‌آوری نوین گیاه‌پالایی برای ایجاد محیط زیست پایدار. مجله‌ی ایمنی زیستی دوره‌ی پنجم، شماره‌ی دوم، زمستان ۱۳۹۱.
- [16]-Cherian S, Oliveira MM. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 2005;39(24):937790-.
- [17]-Ma X, Burken J. Modeling of TCE diffusion to the atmosphere and distribution in plant stems. *Environmental Science & Technology*. 2004;38(17):458086-.
- [18]-Kaimi E, Mukaidani T, Tamaki M. Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Plant production science*. 2007;10(2):21118-.
- [19]-Anderson TA, Guthrie EA, Walton BT. Bioremediation in the rhizosphere. *Environmental Science & Technology*. 1993;27(13):263036-.
- [۲۰]- گلستانی فر حافظ، بهشتی علی، مدیریت پسماند حفاری در چاه‌های اکتشافی نفت و گاز، انتشارات فرهنگ، ۱۳۹۳