



معاونت محیط زیست انسانی

دفتر آب و خاک

راهنمای شماره ۳

دستورالعمل برآورد هزینه های ناشی از آلودگی منابع خاک

مقدمه

خاک به دلیل اهمیت فزاینده در مسایل توسعه جهانی نظیر امنیت غذایی، تخریب زمین، خاصیت پالایندگی و ارائه خدمات اکوسیستمی اهمیت دارد. آلودگی خاک در اثر ورود آلاینده های آلی و معدنی باعث اثر بر سلامت انسان، حیوانات، گیاهان و منابع آب می شود.

دامنه کاربرد

- دستورالعمل هزینه پاک سازی برای خاک مناطقی مانند کشاورزی، تجاری، محل دفن زباله ها، لندفیل ها، مراتع و جنگل ها قابل استفاده است.

- این دستورالعمل برای حفاظت خاک ایران در حین فعالیت های انسانی در صورت استفاده های نابجا از خاک و به تشخیص سازمان حفاظت محیط زیست کشور برای کنترل، جلوگیری و پاک سازی آلودگی خاک است.

- برای تعیین هزینه از معادله $(X_{real\ k}/X_{cleanup\ k})$ استفاده می شود.

- مبنای پاک سازی خاک با توجه به ماهیت آلاینده در محل و خارج از محل انجام می شود.

- مبنای عمق خاک ۰-۱۵۰ سانتی متر است.

برای تعیین pH باید از روش گل اشباع استفاده شود (Klute, 1986).

- غلظت آلاینده ها بر اساس غلظت کل آلاینده بر حسب میلی گرم در کیلوگرم (mg/kg) در خاک خشک شده در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد برای حداقل ۲۴ ساعت است.

- غلظت کل فلزات آلاینده با روش (Klute, 1986) باید تعیین شود.

- غلظت کل مواد آلی با روش ارائه شده با روش (USEPA, 1996) باید اندازه گیری شود.

- ارزیابی میدانی و آزمایش نمونه ها، میزان هزینه پاک سازی مقایسه مقدار آلودگی اندازه گیری شده خاک با استفاده از مقادیر حدود مجاز آلودگی و حدود مجاز سطح پاک سازی محاسبه شود.

- میزان هزینه پاک سازی با استفاده از جداول تهیه شده در این گزارش محاسبه می شود.

- تابع هزینه پاک سازی به صورت کلی زیر در نظر گرفته می شود که تمامی متغیرهای آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

$$Total-Cost = Co_{k_1, k_2, \dots, k_n} \sum_{k=1}^n Di_k \cdot Ha_{i,k} \cdot F \left[\left(X_{real\ k} / X_{cleanup\ k} \right), W_{i,k} \right]$$

$W_{i,k}$ = نشان دهنده دستمزد مورد نیاز برای i امین روش مورد استفاده در پاک سازی آلاینده می باشد.

(Di_k) = ضریب احتمال انتشار آلودگی به منابع حیاتی واحد فاصله از منبع آلودگی

$(Ha_{l,k})$ = ضریب ویژگی های خاک

Cok1,k2,... = مربوط به مربوط به تعداد آلاینده ها می باشد.

ضرایب فوق از جداول ۱ تا ۵ قابل استخراج می باشد.

- نسبت مقدار آلودگی موجود به مقدار پاک سازی ($X_{real}/X_{cleanup}$): هر اندازه آلودگی موجود در خاک از آلاینده بیشتر از مقدار حدود مجاز پاک سازی تعیین شده برای این آلاینده باشد، هزینه های پاک سازی همچنین مدت زمان مورد نیاز برای انجام پاک سازی نیز بیشتر خواهد بود. انتخاب ضریب بستگی به نوع آلاینده در خاک دارد و به دو گروه اصلی فلزات سنگین و آلاینده های تقسیم می شود. فلزات سنگین در خاک تجزیه نمی شوند. بنابراین باید با استفاده از روش های پاک سازی غلظت این عناصر تا حد حدود مجاز کاهش یابد. انتخاب روش پاک سازی و مدت زمان مورد نیاز بستگی به نوع عنصر در خاک دارد. آلاینده های آلی در خاک ممکن است وارد واکنش های تجزیه مانند تجزیه توسط میکروارگانیسم های خاک، فتولیز و یا هیدرولیز شوند. بنابراین انتخاب روش پاک سازی این مواد نه تنها به غلظت ترکیب در خاک، بلکه به نیمه عمر آن نیز بستگی دارد.

- کاربری زمین:

- 0 مسکونی: شامل شرایط مسکونی است که اغلب مردم را در برگیرد.
- 0 کشاورزی: شامل کلیه زمین های کشاورزی و باغات می شود.
- 0 جنگل و مرتع: شامل کلیه اراضی مرتعی و جنگلی و کاربردهای مشابه می باشد.
- 0 پارک/تفریحی: کاربرد خاک برای پوشش دادن فعالیت های ورزشی و تفریحی می باشد.
- 0 تجاری: شامل انواع مختلف فعالیت های تولیدی، عمرانی، اقتصادی، خدماتی و زیربنایی می باشد.

- روش های پاک سازی آلودگی خاک

- 0 تصفیه زیستی در محل (In Situ Biological Treatment): منفذ زیستی (Bioventing)، تصفیه زیستی در محل (In Situ Biological Treatment)
- 0 تصفیه فیزیکی شیمیایی در محل: اکسیداسیون شیمیایی (Chemical Oxidation)، جداسازی الکتروسینتیک، شکستن (fracturing)، شستشوی خاک (soil flushing)، استخراج بخار خاک (soil vapor extraction)، استحکام/تثبیت (Solidification/Stabilization)

- o تصفیه حرارتی در محل (Thermal Treatment)
- o تصفیه بیولوژیکی خارج از محل (Ex Situ Biological Treatments): کمپوست کردن (Composting)،
لندفarming (Landfarming)، تصفیه بیولوژیکی فاز آبی (Slurry Phase Biological Treatments)
- o تصفیه فیزیکی و شیمیایی خارج از محل: استخراج شیمیایی (Chemical Extraction)، اکسیداسیون و احیاء
شیمیایی (Chemical Reduction/Oxidation)، هالوژن زدایی (Dehalogenation)، جداسازی (Separation)، شستشوی خاک
(Soil Washing)، استحکام/تثبیت (Solidification/Stabilization)
- o تصفیه حرارتی خارج از محل (Ex Situ Thermal Treatment): آلودگی زدایی با گاز داغ (Hot Gas Decontamination)،
خاکستر کردن (Incineration)، سوزاندن باز / انفجار باز (Open Burn/Open Detonation)، تجزیه با استفاده از
حرارت (Pyrolysis)، دفع حرارتی (Thermal Desorption)

جدول ۱- متغیرهای مربوط به مدل تعیین هزینه پاکسازی آلودگی خاک

متغیر	دامنه	ضریب
درصد ماده آلی (H_i)	$1 \geq$	۱/۲
	> 1	۱
درصد رس (H_i)	$30 \geq$	۱/۲
	> 30	۱
عمق سفره آب زیرزمینی (متر) (D_i)	$20 \geq$	۱/۲
	> 20	۱
فاصله از مناطق حساس (مراکز جمعیتی، منبع آب و مناطق چهارده گانه تحت مدیریت محیط زیست) (کیلو متر) (D_i)	$2 >$	۱/۵
	$2-5$	۱/۲
	> 5	۱
نسبت مقدار آلودگی موجود به مقدار پاک سازی ($X_{real\ k}/X_{cleanup\ k}$)	$2 >$	۱
	$2-4$	۱/۲
	> 4	۱/۵

جدول ۲- روش های پاک سازی خاک های آلوده در محل

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

حدود مجاز آلودگی خاک و آلاینده های ورودی به آن برای کاربری های مختلف خاک و راهنماهای آن

جدول ۳- روش های پاکسازی خاک های آلوده خارج از محل

نوع روش	نام روش	آلاینده هدف	محدودیت ها	هزینه (دلار)
تصفیه بیولوژیکی	توده زیستی	VOCs غیر هالوژنه، هیدروکربن های نفتی، VOCs و SVOCS هالوژنه و آفت کش ها	حفاری خاک آلوده	۲۶۰
	کمپوست کردن	ترکیبات آلی قابل تجزیه، TNT، RDX، HMX و سایر سموم و PAH	حفاری خاک آلوده و نیاز به فضای زیاد	۵۷۸
	لند فارمینگ	هیدروکربن های نفتی، سوخت های دیزلی، سوخت های نفتی شماره ۲ و ۶، لجن های نفتی و ضایعات چوبی و برخی آفت کش ها	نیاز به فضای زیاد، تأثیر عوامل مختلف بر تجزیه	۱۰
	تصفیه بیولوژیکی فاز آبی	VOCs و SVOCS غیر هالوژنه	نیاز به حفاری خاک آلوده	۲۱۰
تصفیه فیزیکی و شیمیایی	استخراج شیمیایی	PCBs، VOCs، حلال های هالوژنه، ضایعات نفتی و فلزات سنگین	نوع خاک و مقدار رطوبت خاک بر کارایی روش موثر است.	۳۶۱
	اکسیداسیون و احیاء شیمیایی	آلاینده های غیر آلی، VOCs و SVOCS غیر هالوژنه	نوع آلاینده و مواد اکسیدکننده	۶۶۰
	هالوژن زدایی	SVOCS هالوژنه و آفت کش ها	افزایش مقدار رس و رطوبت خاک هزینه را افزایش می دهد.	۵۵۰
	جداسازی	SVOCS، سوخت ها، ترکیبات غیر آلی، VOCs، آفت کش ها، فلزات سنگین، رادیونوکلئیدها و ذرات رادیو اکتیو مغناطیسی	افزایش مقدار رس و رطوبت خاک هزینه را افزایش می دهد.	۱۰۰۰
	شستشوی خاک	SVOCS، سوخت ها، فلزات سنگین، VOCs و آفت کش ها	ترکیب پیچیده ضایعات و مقدار زیاد ترکیبات هوموسی	۷۰
	استحکام/تثبیت	آلاینده های غیر آلی شامل رادیونوکلئیدها	شرایط محیطی ممکن است بر تحرک آلاینده ها موثر باشد.	۱۹۰
	آلودگی زدایی با گاز داغ	ترکیبات قابل احتراق	هزینه زیاد	۳۰۰۰
تصفیه حرارتی	خاکستر کردن	ضایعات قابل احتراق و خطرناک به خصوص هیدروکربن های کلردار، PCBs و دی اکسین ها	بر جای ماندن فلزات	۱۳۹۹
	تجزیه با استفاده از حرارت	SVOCS و آفت کش ها	رطوبت خاک باید به کمتر از ۱ درصد کاهش یابد.	۳۳۰
	دفع حرارتی	VOCs، LTDD، VOCs غیر هالوژنه و سوخت ها، SVOCS	رطوبت خاک باید کاهش یابد.	۱۱۰

جدول ۴- هزینه پاکسازی (دلار) به ازاء مترمکعب خاک بر اساس ضریب تأثیر و روش پاک سازی (در محل)

ضریب تأثیر																
روش پاک سازی (در محل)		۱	۱/۲	۱/۴	۱/۵	۱/۷	۱/۸	۲/۱	۲/۲	۲/۳	۲/۵	۲/۶	۲/۷	۳/۱	۳/۲	۳/۹
	منفذ زیستی	۱۰۹	۱۳۱	۱۵۳	۱۶۳	۱۸۵	۱۹۶	۲۲۹	۲۴	۲۵۱	۲۷۲	۲۸۳	۲۹۴	۳۳۷	۳۴۸	۴۲۵
	تصفیه زیستی	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰	۱۵۰	۱۷۰	۱۸۰	۲۱۰	۲۰	۲۳۰	۲۵۰	۲۶۰	۲۷۰	۳۱۰	۳۲۰	۳۹۰
	گیاه پالایی	۴۸۳	۵۷۹	۶۷۶	۷۲۵	۸۲۱	۸۶۹	۱۰۱۴	۱۰۶	۱۱۱۱	۱۲۰۷	۱۲۵۵	۱۳۰۴	۱۴۹۷	۱۵۴۵	۱۸۸۳
	اکسیداسیون شیمیایی	۲۵۰۰	۳۰۰۰	۳۵۰۰	۳۷۵۰	۴۲۵۰	۴۵۰۰	۵۲۵۰	۵۵۰	۵۷۵	۶۲۵۰	۶۵۰۰	۶۷۵۰	۷۷۵۰	۸۰۰۰	۹۷۵۰
	جداسازی الکتروسینتیک	۵۰	۶۰	۷۰	۷۵	۸۵	۹۰	۱۱	۱۱۰	۱۱۵	۱۲۵	۱۳۰	۱۳۵	۱۵۵	۱۶۰	۱۹۵
	شکستن	۱۲	۱۴	۱۷	۱۸	۲۰	۲۲	۳	۲۶	۲۷	۳۰	۳۱	۳۲	۳۷	۳۸	۴۶
	شستشوی خاک	۲۷	۳۲	۳۸	۴۱	۴۶	۴۹	۶	۵۹	۶۲	۶۷	۷۰	۷۲	۸۳	۸۶	۱۰۵
	استخراج بخار خاک	۹۷۵	۱۱۷۰	۱۳۶۵	۱۴۶۳	۱۶۵۸	۱۷۵۵	۲۰۶	۲۱۴۵	۲۲۴۲	۲۴۳۷	۲۵۳۵	۲۶۳۲	۳۰۲۲	۳۱۲۰	۳۸۰۲
	استحکام/ تثبیت	۳۳۰	۳۹۶	۴۶۲	۴۹۵	۵۶۱	۵۹۴	۶۹	۷۲۶	۷۵۹	۸۲۵	۸۵۸	۸۹۱	۱۰۲۳	۱۰۵۶	۱۲۸۷
	تصفیه حرارتی	۲۸	۵	۵۳	۵۷	۶۵	۶۸	۸	۸۳	۸۷	۹۵	۹۸	۱۰۲	۱۱۷	۱۲۱	۱۴۸

حدود مجاز آلودگی خاک و آلاینده های ورودی به آن برای کاربری های مختلف خاک و راهنماهای آن

جدول ۵- هزینه پاک سازی (دلار) به ازاء مترمکعب خاک بر اساس ضریب تأثیر و روش پاک سازی (خارج از محل)

ضریب تأثیر																
روش پاک سازی (خارج از محل)		۱	۱/۲	۱/۴	۱/۵	۱/۷	۱/۸	۲/۱	۲/۲	۲/۳	۲/۵	۲/۶	۲/۷	۳/۱	۳/۲	۳/۹
	توده زیستی	۲۶	۳۱	۳۶	۳۹	۴۴	۴۶	۵۴	۵۷	۶۰	۶۵	۶۷	۷۰	۸۰	۸۳	۱۰۱۴
	کمپوست کردن	۵۸	۶۹	۸۱	۸۶	۹۸	۱۰۴	۱۲۱۳	۱۲۷۱	۱۳۲۹	۱۴۴۵	۱۵۰۲	۱۵۶۰	۱۷۹۱	۱۸۴۹	۲۲۵۴
	لند فارمینگ	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۷۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۱۰۰۰	۲۲۰۰۰	۲۳۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۶۰۰۰	۲۷۰۰۰	۳۱۰۰۰	۳۲۰۰۰	۳۹۰۰۰
	تصفیه بیولوژیکی فاز آبی	۲۱	۲۵	۲۹۴	۳۱۵	۳۵۷	۳۷۸	۴۴۱	۴۶۲	۴۸۳	۵۲۵	۵۴۶	۵۶۷	۶۵۱	۶۷۲	۸۱۹
	استخراج شیمیایی	۳۶	۴۳	۵۰۵	۵۴۱	۶۱۳	۶۴۹	۷۵۸	۷۹۴	۸۳۰	۹۰۲	۹۳۸	۹۷۴	۱۱۱۹	۱۱۵۵	۱۴۰۷
	اکسیداسیون و احیاء	۶۶	۷۹	۹۲۴	۹۹۰	۱۱۲۲	۱۱۸۸	۱۳۸۶	۱۴۵۲	۱۵۱۸	۱۶۵۰	۱۷۱۶	۱۷۸۲	۲۰۴۶	۲۱۱۲	۲۵۷۴
	هالوژن زدایی	۵۵	۶۶	۷۷۰	۸۲۵	۹۳۵	۹۹۰	۱۱۵۵	۱۲۱۰	۱۲۶۵	۱۳۷۰	۱۴۳۰	۱۴۸۵	۱۷۰۵	۱۷۶۰	۲۱۴۵
	جداسازی	۱۰۰	۱۲۰	۱۴۰۰	۱۵۰۰	۱۷۰۰	۱۸۰۰	۲۱۰۰	۲۲۰۰	۲۳۰۰	۲۵۰۰	۲۶۰۰	۲۷۰۰	۳۱۰۰	۳۲۰۰	۳۹۰۰
	شستشوی خاک	۷	۸	۹۸	۱۰۵	۱۱۹	۱۲۶	۱۴۷	۱۵۴	۱۶۱	۱۷۵	۱۸۲	۱۸۹	۲۱۷	۲۲۴	۲۷۳
	استحکام/تثبیت	۱۹	۲۲۸	۲۶۶	۲۸۵	۳۲۳	۳۴۲	۳۹۹	۴۱۸	۴۳۷	۴۷۵	۴۹۴	۵۱۳	۵۸۹	۶۰۸	۷۴۱
	آلودگی زدایی با گاز داغ	۳۰۰	۳۶۰۰	۴۲۰۰	۴۵۰۰	۵۱۰۰	۵۴۰۰	۶۳۰۰	۶۶۰۰	۶۹۰۰	۷۵۰۰	۷۸۰۰	۸۱۰۰	۹۳۰۰	۹۶۰۰	۱۱۷۰۰
	خاکستر کردن	۱۳۹	۱۶۷۹	۱۹۵۸	۲۰۹۸	۲۳۷۸	۲۵۱۸	۲۹۳۷	۳۰۷۷	۳۲۱۷	۳۴۹۷	۳۶۳۷	۳۷۷۷	۴۳۳۶	۴۴۷۶	۵۴۵۶
	تجزیه حرارتی	۳۳	۳۹۶۰۰۰	۴۶۲	۴۹۵	۵۶۱	۵۹۴	۶۹۳	۷۲۶	۷۵۹	۸۲۵	۸۵۸	۸۹۱	۱۰۲۳	۱۰۵۶	۱۲۸۷
	دفع حرارتی	۱۱	۱۳۲	۱۵۴	۱۶۵	۱۸۷	۱۹۸	۲۳۱	۲۴۲	۲۵۳۰	۲۷۵	۲۸۶	۲۹۷	۳۴۱	۳۵۲	۴۲۹