

مستندات مرتبط به مقاله ارزیابی خطر فلزات سمی در سد باطله یک کارخانه فرآوری سنگ آهن در نشریه محیط زیست طبیعی محفوظ است.

موارد تکمیلی (SM)

آماده سازی واکنشگرها و نمونه ها بر اساس دستورالعمل U.S. EPA ۸/۲۰۰ (۱۹۹۴) انجام گرفت. نمونه های پسماند برداشت شده از سد باطله، بمدت ۷۲ ساعت در آن ۶۰ درجه خشک شده و بمنظور همگن شدن، از الک (مش ۵ = قطر ۴ میلی متر) عبور داده و در هاون چینی خرد شدند. سپس ۰/۵ گرم از نمونه ی الک و خرد شده به بشر ۲۵۰ میلی لیتری منتقل گردید. در مرحله ی بعد ۴ میلی لیتر نیتریک اسید (۱+۱) و ۱۰ میلی لیتر هیدروکلریک اسید (۱+۴) به بشر اضافه گردید. سپس درب بشر با استفاده از شیشه ساعت پوشانده شد و در زیر هود بر روی hot plate در دمای ۸۵ درجه ی سانتی گراد قرار گرفت. ۳۰ دقیقه بعد از گرم شدن، ممکن است نمونه جوشش ملایمی داشته باشد که باید مراقب بود این جوشش شدید نباشد. عمل هضم تا کاهش حجم نمونه به ۳-۴ میلی لیتر ادامه یافت. بعد از خنک شدن، نمونه به بالن حجمی ۵۰ میلی لیتری منتقل شد و با آب دیونیزه به حجم رسانده شد. سپس نمونه از فیلتر واتمن ۴۲ عبور داده شده و به بطری های پلی اتیلنی ۱۲۰ میلی لیتری درپوش دار منتقل گردیدند و تا زمان آنالیز در دمای ۴ درجه ی سانتی گراد نگهداری شدند.

غلظت فلزات در نمونه های پسماند بر حسب mg/kg d.w و بر اساس معادله ی ۱ محاسبه گردید.

$$\text{Sample Conc.} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) d.w = \frac{C \times V}{W} \quad \text{معادله ی ۱:}$$

که در این معادله: C، غلظت فلز مورد نظر (بر حسب میلی گرم بر لیتر)،

V، حجم نهائی نمونه (۵۰ میلی لیتر = ۰/۵ لیتر) و

W، وزن پسماند استفاده شده برای هضم (۰/۵ گرم = ۰/۰۰۰۵ کیلوگرم) است.

جدول S۱- شرایط آنالیز دستگاهی نمونه ها

Instrument	ICP-MS
RF Power	1200 W
Auxillary flow rate	1 - 2 l/m
Solution uptake rate	1 ml/m
Mass range	7-238
Resolution	1 amu (Atomic Mass Unit)
Detector	Electron Multiplier

Dynamic range	0.001 ppb-1000 ppm
Abundance sensitivity	10^{-6}
Scanning rate	3000 amu/s
Argon flow	17 l/m

جدول S۲- حد مجاز آلاینده‌گی فلزات در خاک (mg/kg d.w) برای کاربری‌های مختلف، بر اساس استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران

فلز	مسکونی		تجاری		پارک تفریحی		کشاورزی		جنگل و مرتع		حفاظت محیط زیست	
	γpH>	γpH<	γpH>	γpH<	γpH>	γpH<	γpH>	γpH<	γpH>	γpH<	γpH>	γpH<
(As)	۱۸	۴۰	۴۰	۶۰	۱۸	۷۰	۱۸	۴۰	۱۸	۷۰	-	۱۷
(Cd)	۲	۲	۸	۸	۸	۸	۱	۵	۱	۸	-	۳,۹
(Cr)	۱۱۰	-	۳۵۰	-	۱۱۰	-	۱۱۰	-	۱۱۰	-	-	-
(Cr) +۳	-	۱۶۵	-	۵۰۰	-	۵۳۵	-	۱۱۰	-	۵۳۵	-	۶۴
(Cr) +۶	-	۵	-	۱۵	-	۱۵	-	۲	-	۱۵	-	۰,۴
(Cu)	۱۰۰	۴۰۰	۴۵۰	۱۱۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۶۳
(Hg)	۵	۱۵	۳۰	۵۵	۵	۵۵	۵	۷	۵	۵۵	-	۱۲
(Ni)	۵۰	۱۵۵	۳۰۰	۶۰۰	۵۰	۵۳۰	۵۰	۱۱۰	۵۰	۵۳۰	-	۵۰
(Pb)	۵۰	۸۰	۲۰۰	۷۰۰	۵۰	۲۹۰	۵۰	۷۵	۵۰	۲۹۰	-	۳۰۰
(Zn)	۲۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۲۰۰	۵۰۰	-	۲۰۰

جدول S۳- شاخص‌های ارزیابی خطر اکولوژیک

روش	کلاس‌بندی میزان آلودگی
معادله‌ی ۲: $C.D = \sum_{i=1}^n CF$ C.D: درجه‌ی آلودگی CF: فاکتور آلودگی (معادله‌ی ۳) n: تعداد عناصر	کم: $CD < n$ متوسط: $n \leq CD < 2n$ قابل توجه: $2n \leq CD < 4n$ خیلی بالا: $CD \geq 4n$
معادله‌ی ۳: $CF = \frac{C}{C, background}$	کم: $CF < 1$ متوسط: $1 \leq CF < 3$

$3 \leq CF < 6$: قابل توجه $CF \geq 6$: خیلی زیاد	C: غلظت بدست آمده از عنصر C,background: میانگین غلظت فلز در پوسته زمینه (جدول ۴)
$RI < 150$: کم $150 \leq RI < 300$: متوسط $300 \leq RI < 600$: قابل توجه $RI \geq 600$: خیلی بالا	معادله ی ۴: $RI = \sum_{i=1}^m E_r^i$ E_r^i : شاخص خطر هر فلز (معادله ی ۵) E_r^i : پتانسیل خطر هر فلز (معادله ی ۵) m: تعداد عناصر مورد بررسی
$E_r^i < 40$: کم $40 \leq E_r^i < 80$: متوسط $80 \leq E_r^i < 160$: قابل توجه $160 \leq E_r^i < 320$: بالا $E_r^i \geq 320$: خیلی بالا	معادله ی ۵: $E_r^i = CF \times T_r^i$ T_r^i : فاکتور پاسخ سمیت (جدول ۴)
$I_{geo} = 0$: بدون آلودگی $0 < I_{geo} \leq 1$: بدون آلودگی تا آلودگی متوسط $1 < I_{geo} \leq 2$: آلودگی متوسط $2 < I_{geo} \leq 3$: آلودگی متوسط تا بالا $3 < I_{geo} \leq 4$: آلودگی بالا $4 < I_{geo} \leq 5$: آلودگی بالا تا بسیار بالا $I_{geo} = 5$: آلودگی بسیار بالا	معادله ی ۶: $I_{geo} = \log_2 \frac{C}{1.5 C_{background}}$

جدول S۴- میانگین غلظت عناصر در پوسته زمین به همراه فاکتور پاسخ سمیت

عنصر	میانگین غلظت عنصر در پوسته زمین (Background/ average shale value)	فاکتور پاسخ سمیت (Toxic response factor)
(As)	۱۳	۱۰
(Cd)	۰,۳	۳۰
(Cr)	۹۰	۲
(Cu)	۴۵	۵
(Hg)	۰,۴	۴۰
(Ni)	۶۸	۵
(Pb)	۲۰	۵
(Zn)	۹۵	۱
منبع	Turekian and Wedepohl, 1961	Hakanson 1980; Zheng-Qi et al, 2008

جدول S۵- معادلات استفاده شده برای ارزیابی ریسک سلامت کارگران شاغل در سایت مورد مطالعه

$HI = \sum HQ = HQ_{ingestion} + HQ_{dermal} + HQ_{inhalation}$	معادله ۷
$HQ_{ingestion} = \frac{CDI_{ingestion}}{RfD} = \frac{\frac{C_s \times IR_s \times EF \times ED}{BW \times AT}}{RfD}$	معادله ۸
$HQ_{dermal} = \frac{CDI_{dermal}}{RfD} = \frac{\frac{C_s \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT}}{RfD}$	معادله ۹
$HQ_{inhalation} = \frac{CDI_{inhalation}}{RfD} = \frac{\frac{C_s \times IR_i \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT}}{RfD}$	معادله ۱۰
$CR = \sum CDI \times SF$	معادله ۱۱

جدول S۶- پارامترها و مقادیر بکار گرفته شده برای محاسبه ارزیابی ریسک سلامت کارگران شاغل در سایت مورد مطالعه

پارامتر	مخفف عبارت	معنی	مقدار	واحد
HI	Hazard Index	شاخص مخاطره (مجموع ریسک‌های غیرسرطان‌زایی برای تمام مسیرهای مواجهه یا تمام فلزات).	محاسبه از طریق معادله	-
HQ	Hazard Quotient	حاصل ضرب مخاطره (نسبت مواجهه روزانه به دوز مرجع برای یک فلز و یک مسیر خاص).	محاسبه از طریق معادله	-
CDI	Chronic Daily Intake	میزان جذب روزانه مزمن	محاسبه از طریق معادله	mg/kg.day
C _s	Concentration in Soil/Sediment	غلظت آلاینده در خاک یا رسوب	میانگین غلظت فلز بدست آمده	mg/kg
IR _s	Ingestion Rate of Soil	نرخ بلع خاک (مقدار خاکی که به طور ناخواسته در روز بلعیده می‌شود).	۱۰۰	mg/day
EF	Exposure Frequency	فراوانی مواجهه (تعداد روزها در سال که فرد در معرض آلودگی است).	۳۵۰	day/year

year	۲۵	مدت مواجهه (تعداد کل سال‌هایی که فرد در آن منطقه کار یا زندگی می‌کند).	Exposure Duration	ED
kg	۷۰	وزن بدن (میانگین وزن افراد مورد مطالعه که در این تحقیق کارگران شاغل در آن محدوده هستند).	Body Weight	BW
day	ED*365	زمان متوسط (دوره زمانی که مواجهه در آن میانگین‌گیری می‌شود).	Averaging Time	Non) AT (cancer
day	۳۶۵*۷۰	زمان متوسط (دوره زمانی که مواجهه در آن میانگین‌گیری می‌شود).	Averaging Time	AT (cancer)
cm ²	۵۸۰۰	سطح پوست در معرض (مساحتی از پوست که با خاک آلوده در تماس است).	Skin Surface Area	SA
mg/cm ²	۰,۰۷	ضریب چسبندگی خاک (مقدار خاکی که به هر سانتی‌متر مربع از پوست می‌چسبد).	Adherence Factor	AF
-	طبق راهنمای USEPA 2012، مقدار ABS برای آرسنیک ۳ درصد و برای سایر فلزات به دلیل نبود داده‌های آزمایشگاهی کافی، مقدار محافظه‌کارانه ۰,۱ درصد در نظر گرفته شده است.	ضریب جذب (درصدی از ماده که از طریق پوست یا گوارش جذب بدن می‌شود).	Absorption Fraction	ABS
m ³ /day	۲۰	نرخ استنشاق (حجم هوایی که فرد در روز تنفس می‌کند).	Inhalation Rate	IR _i
m ³ /kg	۱۰ ^{-۹} * ۱/۳	فاکتور انتشار ذرات (رابطه بین غلظت آلاینده در خاک و غلظت ذرات معلق در هوا).	Particulate Emission Factor	PEF
mg/kg.day	جدول ۱-۶	دوز مرجع (حداکثر دوز روزانه‌ای که بدون ایجاد اثرات سمی غیرسرطانی قابل تحمل است).	Reference Dose	RfD

-	محاسبه از طریق معادله	ریسک سرطانزایی (احتمال ابتلای فرد به سرطان در طول دوره زندگی).	Cancer Risk	CR
1/ (mg/kg.day)	جدول ۲-۶ SF	ضریب شیب (نشان‌دهنده قدرت سرطان‌زایی یک ماده).	Slope Factor	SF

جدول ۱-۶ SF- مقادیر RfD استفاده شده برای محاسبه ارزیابی ریسک سلامت در تحقیق حاضر

عنصر	RfD بلع (mg/kg.day)	RfD پوستی (mg/kg.day)	RfD استنشاقی (mg/kg.day)
آرسنیک (As)	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-4}
کادمیوم (Cd)	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-3}
کروم (Cr VI)	3.0×10^{-3}	6.0×10^{-5}	2.8×10^{-5}
مس (Cu)	4.0×10^{-2}	1.2×10^{-2}	4.0×10^{-2}
جیوه (Hg)	3.0×10^{-4}	2.1×10^{-5}	8.6×10^{-5}
نیکل (Ni)	2.0×10^{-2}	5.4×10^{-3}	2.0×10^{-2}
سرب (Pb)	3.5×10^{-3}	5.2×10^{-4}	3.5×10^{-3}
روی (Zn)	3.0×10^{-1}	6.0×10^{-2}	3.0×10^{-1}

جدول ۲-۶ SF- مقادیر SF استفاده شده برای محاسبه ارزیابی ریسک سلامت در تحقیق حاضر

عنصر	SF بلع (mg/kg.day) 1/	SF پوستی (mg/kg.day) 1/	SF استنشاقی (mg/kg.day) 1/
آرسنیک (As)	1.5	1.5	15.1
کادمیوم (Cd)	-	-	6.3
کروم (Cr VI)	0.5	0.5	42
نیکل (Ni)	-	-	0.84
سرب (Pb)	0.0085	0.0085	0.042

جدول ۷-۶ SV- ارزیابی خطر غلظت فلزات مورد بررسی (میلی گرم بر کیلوگرم) با توجه به کاربری تجاری

عنصر	سنجش اثر آلاینده	فاکتور پوشش		
		ضعیف	متوسط	خوب
As	بدون خطر	<۳۵	<۶۰	<۹۰
	امکان وجود خطر	۹۰-۳۵	۱۲۰-۶۰	۲۰۰-۹۰
	خطر فوری	>۹۰	>۱۲۰	>۲۰۰
Cd	بدون خطر	<۳	<۸	<۲۵
	امکان وجود خطر	۲۵-۳	۴۵-۸	۱۰۰-۲۵
	خطر فوری	>۲۵	>۴۵	>۱۰۰
Cu	بدون خطر	<۴۵۰	<۱۱۰	<۲۹۰۰
	امکان وجود خطر	۲۹۰۰-۴۵۰	۴۷۰۰-۱۱۰۰	۱۰۰۰۰-۲۹۰۰
	خطر فوری	>۲۹۰۰	>۴۷۰۰	>۱۰۰۰۰
Ni	بدون خطر	<۲۵۰	<۶۰۰	<۲۰۰۰
	امکان وجود خطر	۲۰۰۰-۲۵۰	۳۴۰۰-۶۰۰	۷۶۰۰-۲۰۰۰
	خطر فوری	>۲۰۰۰	>۳۴۰۰	>۷۶۰۰

جدول SA- مقادیر CDI محاسبه شده با استفاده از معادلات ۸، ۹ و ۱۰

نام عنصر	CDI بلع (mg/kg.day)	CDI تماس پوستی (mg/kg.day)	CDI استنشاق (mg/kg.day)
آرسنیک (As)	0.00004677	0.00000123	3.7E-10
کادمیوم (Cd)	0.00001336	0.000000001	1.1E-10
کروم (Cr)	0.00004134	0.000000025	3.3E-10
مس (Cu)	0.00014384	0.000000088	1.14E-09
جیوه (Hg)	0.000000008	0	0
نیکل (Ni)	0.00032098	0.000000196	2.54E-09
سرب (Pb)	0.00005331	0.000000033	4.2E-10
روی (Zn)	0.0001156	0.000000071	9.1E-10

منابع و مراجع

- Hakanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research* 14(8), 975-1001.
- Turekian, K.K., Wedepohl, K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72(2), 175–192.
- U.S.EPA, 1994. Method 200.8: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma-mass spectrometry (Revision 5.4). Available from https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/method_200-8_rev_5-4_1994.pdf. (Accessed 17th December 2025).
- U.S.EPA, 2011. Exposure Factors Handbook. Available from <https://www.epa.gov/expobox/exposure-factors-handbook-2011-edition>. (Accessed 17th December 2025).
- U.S.EPA, 2012. Supplemental Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Available from <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91003IJK.TXT>. (Accessed 17th December 2025).
- Zheng-Qi, X., Shi-Jun, N., Xian-Guo, T., Cheng-Jiang, Z., 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science and Technology* 31(8), 31-33.