

بررسی امکان جلوگیری از انتقال فلزات سنگین پسماندهای کارخانه‌های تولید روی به محیط زیست

احمد خدادادی^{۱*}، سید جواد کلینی^۲، داوود مرادخانی^۳، بهزاد صداقت^۴، مهدی مرزبان^۵

۱. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، akdarban@modares.ac.ir

۲. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن،

۳. دانشگاه زنجان، گروه مهندسی معدن

۴. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن، mehdi.marzban@gmail.com

(دریافت ۲۱ مهر ۱۳۸۶، پذیرش ۲۶ فروردین ۱۳۸۷)

چکیده

انتقال عناصر خطرناک از باطله معدن و کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی یکی از معضلات مهم زیست‌محیطی است. در این مقاله پارامترهای موثر در انتقال فلزات روی، کادمیم، سرب و کبالت نظیر دانه‌بندی، نرخ جریان، غلظت اسید و زمان انتقال از باطله فروشویی کارخانه زنجان مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله به بررسی روش‌های تراکم و استفاده از آهک در زمینه کاهش حلالیت فلزات سنگین کیک فیلتر گرم کارخانه‌های لیچینگ روی پرداخته شده است که طی آن عامل تراکم در سه سطح ۴۰، ۳۵ و ۳۱ سانتی‌متر و استفاده از آهک در سه سطح ۱، ۰ و ۲ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بهترین نتیجه در میزان تراکم ۳۱ cm و ضخامت آهک ۲ cm بدست آمد که طی آن کمترین حلالیت فلزات سنگین به محیط زیست حاصل شد.

کلمات کلیدی

فلزات سنگین، کارخانه فروشویی روی، کیک فیلتر گرم (کبالت)، خنثی سازی

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مباحثی که در رابطه با پسماندهای جامد حاوی فلزات سنگین مطرح می‌باشد، نحوه خنثی‌سازی و کاهش انتقال عناصر خطرناک به محیط زیست است.

کارخانه‌های لیچینگ روی در طول فرآیند خود سبب تولید سه نوع پسماند جامد می‌شوند که به ترتیب شامل کیک فیلتر لیچینگ، کیک فیلتر گرم و کیک فیلتر سرد می‌باشد. خوراک پرعیار محتوی روی وارد به فرآیند، ابتدا طی یک مرحله با اسید سولفوریک لیچ اسیدی می‌گردد که در این مرحله مواد شیمیایی مانند سولفات آهن، دی اکسید منگنز و سولفات آلومینیم به محلول اضافه می‌شود. در مرحله بعد فرآیند خنثی‌سازی با آهک بر روی آن انجام و با فیلتراسیون محلول خنثی شده کیک لیچ به دست می‌آید. از آنجایی که در مرحله لیچ خنثی ناخالصی‌های بسیاری رسوب داده می‌شوند در نتیجه میزان برخی از عناصر از جمله آهن و سرب در کیک لیچ افزایش می‌یابد. پس از این مرحله، محلول بدست آمده با اضافه کردن پرمنگنات پتاسیم جهت رسوب عنصر کبالت فیلتر می‌شود که کیک فیلتر گرم حاصل می‌گردد. محلول این مرحله با اضافه شدن پودر روی و سولفات مس فیلتر شده و منجر به تولید کیک سرد می‌شود. محلول نهایی بدست آمده دارای کمترین نوع ناخالصی است و جهت تولید ورق روی وارد الکترولیز می‌گردد [۱، ۲].

در این راستا مطالعه‌ای بر روی MSWI^۱ در بلژیک جهت کاهش حلالیت فلزات سنگین انجام شده است [۳] که طی آن تست‌های آزمایشگاهی جهت ارزیابی پتانسیل ترکیب با کربن بررسی شدند. چندین پارامتر شامل درصد CO₂ موجود در هوا، درجه حرارت هوا و درصد رطوبت خاکسترها جهت بهینه‌سازی فرآیند مورد استفاده قرار گرفتند. در بررسی اولیه مشخص گردید که حلالیت عناصر روی، سرب، کبالت، نیکل و باریوم کمتر از حد مجاز و مس، کروم، مولیبدن و آنتیموان بیشتر از حد مجاز است. آزمایش‌ها در یک اتاق CO₂ بر روی نمونه‌ها انجام شد. آزمایش‌ها برای درصد CO₂ ۰/۰۳٪، ۱۰٪ و ۲۰٪، درجه حرارت ۳۰، ۳۷ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد، درصد رطوبت: ۲/۳٪، ۶٪، ۱۳٪، ۲۵٪، ۳۷٪ و ۵۰٪ انجام پذیرفت [۳].

یکی از تکنیک‌های تصفیه در مدیریت پسماندهای خطرناک بررسی جامدسازی و تثبیت^۲ پسماندهای آلوده به فلزات سنگین با سیمان پرتلند می‌باشد که طی آن پسماند خطرناک با مواد چسباننده (بایندر) مخلوط می‌گردد تا از انتقال عناصر

خطرناک در اثر لیچینگ با آب به محیط زیست کاسته شود و پسماند خطرناک به پسماند یا ماده جامدی تبدیل گردد که به لحاظ زیست محیطی برای دفع در زمین دفن^۳ و یا حتی استفاده در مصارف ساخت و ساز، مناسب باشد [۴].

در این زمینه مطالعه‌ای بر روی پسماندهای آلوده به فلزات سنگین در اطراف معادن سرب و روی در استان زنجان انجام شده است. برای جامدسازی آلاینده‌ها از سیمان پرتلند معمولی^۴ به علت در دسترس بودن، ارزان بودن و سازگاری با بسیاری از آلاینده‌ها (پرمصرف ترین و رایج ترین ماده بایندر) استفاده شد. مقایسه نتایج بدست آمده از غلظت فلزات در محلول تصفیه نشده با استاندارد TCLP^۵ نشان داد که غلظت فلزات سرب و کادمیم از مقادیر حداکثر مجاز فراتر رفته و پسماند خطرناک محسوب می‌شود [۵].

در تحقیقات صورت گرفته درباره تثبیت پسماندها، هدف دستیابی به ماده (پسماند) ثانویه‌ای بوده است که برای دفن در زمین‌ها به لحاظ زیست محیطی مشکلی نداشته باشد. هدف از این تحقیق علاوه بر خنثی‌سازی، استفاده از روش‌های ساده، ارزان و کارآمد با نگرش به این دیدگاه که این پسماندها در آینده برای بازیابی عناصر باارزش قابل استفاده خواهند بود، است. بنابراین از روش‌هایی استفاده شد که سبب تغییر در ماهیت پسماندها نگردد.

در این مطالعه جهت کاهش حلالیت فلزات سنگین دو سری آزمایش‌های تراکم و استفاده از ضخامت‌های مختلف آهک بر روی کیک کبالت مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- شناسایی فیلتر کیک سرد

جهت شناسایی فیلتر کیک گرم از روش‌های XRF، نفوذپذیری و EPA ۹۰۴۵ استفاده گردیده است.

• آنالیز XRF

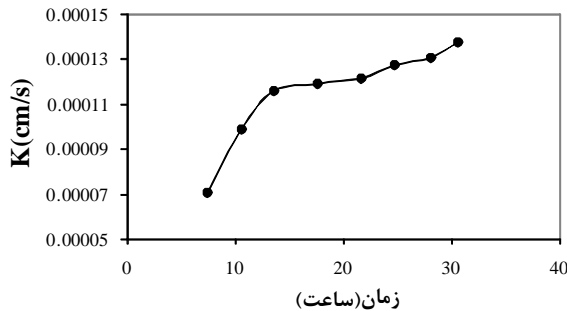
برای آنالیز XRF (مدل PW2404) نمونه‌ای ۱۰۰ گرمی از کیک گرم تهیه و نتایج حاصل از آنالیز نمونه معرف کیک فیلتر کبالت در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: نتایج آنالیز نمونه معرف کیک گرم به روش XRF

نام ترکیب	درصد	نام ترکیب	درصد
Na_2O	۵/۳۱۵	MnO	۵/۲۱۶
MgO	۰/۲۷۳	Co	۰/۴۴۹
Al_2O_3	۰/۱۶۳	Ni	۰/۰۳۷
SiO_2	۰/۱۲۷	Cu	۰/۰۵۱
SO_3	۳۱/۶۱۳	Zn	۲۰/۹۰۲
Cl	۰/۰۵	Pb	۰/۰۸۳
K_2O	۰/۱۰۱	LOI	۲۲/۰۵
CaO	۱۳/۵۷		

- Q: حجم محلول خروجی (متر مکعب)
- L: ارتفاع خاک (متر)
- H: ارتفاع ستون (متر)
- A: سطح مقطع ستون (متر مربع)
- t: زمان جمع آوری آب (ثانیه)
- K: میزان نفوذپذیری (متر بر ثانیه)

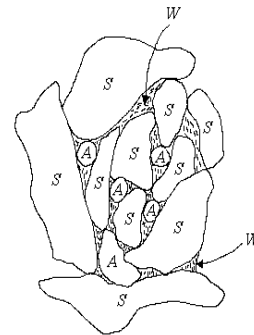
در شکل ۲ میزان نفوذپذیری کیک گرم نشان داده شده است.



شکل ۲: میزان نفوذپذیری کیک گرم نسبت به زمان

• نفوذپذیری

بطور کلی، هر جرمی از خاک شامل مجموعه‌ای از ذرات جامد با تخلخل در بین آن‌ها است. ذرات جامد خاک شامل دانه‌های ریزی از کانی‌های مختلف می‌باشند که فضای خالی بین آن‌ها توسط آب یا هوا و یا هر دو آن‌ها پر می‌شوند (شکل ۱) [۶].



شکل ۱: ساختمان خاک شامل ذرات جامد (S)، فضای خالی با هوا (A) و آب (W) [۶]

• آزمایش استاندارد ۹۰۴۵ EPA

مقدار ۲۰ گرم از کیک فیلتر داخل یک بشر ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و سپس ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر به آن افزوده و توسط همزن میله‌ای بطور کامل مخلوط گردید. پس از گذشت ۵ دقیقه آزمایش متوقف و مخلوط فوق به مدت ۱۵ دقیقه جهت ته‌نشین شدن مایع از جامد در مکانی قرار داده شد. سپس بوسیله فیلتراسیون، pH محلول بدست آمده تعیین شد [۷ و ۸]. بدین ترتیب pH نهایی کیک فیلتر کبالت ۵ بدست آمد.

۲-۲- آزمایشات خنثی سازی

برای انجام آزمایش‌های خنثی‌سازی از ستون‌هایی به قطر داخلی ۶ cm و ارتفاع ۵۰ cm استفاده شد. نحوه آماده‌سازی ستون‌ها بدین ترتیب بود که در انتهای ستون کاغذ صافی قرار داده شده و سپس بر روی آن به ضخامت ۲ الی ۴ سانتی‌متر ماسه برای فیلتر کردن ریخته می‌شد. در مرحله بعد ستون از کیک گرم پر شده و سپس بر روی کیک جهت پخش یکنواخت محلول ورودی از یک لایه ۳ سانتی‌متری پشم شیشه در بین دو کاغذ صافی استفاده می‌شد. تغذیه محلول ورودی بوسیله ست‌های سرم و جمع‌آوری محلول توسط بشرهای ۲ لیتری انجام می‌گردید. نمونه‌برداری از محلول خروجی در بازه زمانی

در آزمایش نفوذپذیری سه ستون به قطر داخلی ۶ سانتی‌متر تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از کیک کبالت پر شد و سپس به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر بر روی کیک‌ها آب ریخته شد. سپس زمان‌هایی که حجم محلول خروجی به اندازه حجم فضای خالی داخل کیک می‌رسید، یادداشت و با توجه به رابطه ۱ میزان نفوذپذیری کیک گرم بدست آمد.

$$K = \frac{Q.L}{H.A.t} \quad (1)$$

که در آن

دانسیته خشک (\bar{D}_d) برای هر ستون از رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$\delta_d = \frac{\delta_i}{1 + \frac{w}{100}} \quad (3)$$

در این رابطه w میزان رطوبت موجود در نمونه، δ_i وزن مخصوص خاک متراکم شده در ستون i ام می‌باشد و مقدار آن از طریق رابطه ۴ بدست می‌آید:

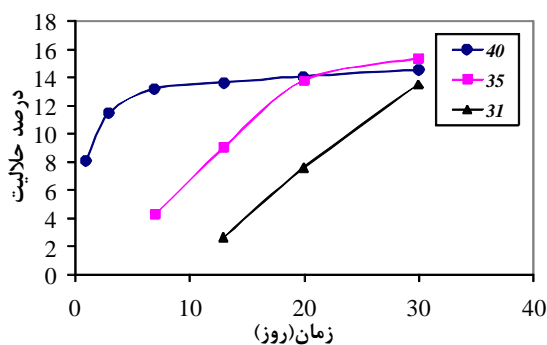
$$\delta_i = \frac{m}{\pi r^2 h_i} \quad (4)$$

در این رابطه m وزن نمونه بر حسب کیلوگرم، r شعاع ستون‌ها و برابر ۳ سانتی‌متر و h_i ارتفاع ستون i پس از تراکم می‌باشند [۹، ۱۰]. در جدول ۳ اطلاعات مربوط به متراکم کردن یک گرم آورده شده است.

جدول ۳: اطلاعات مربوط به متراکم کردن یک‌گرم

نوع کیک	ارتفاع ستون پس از تراکم (cm)	ضریب تراکم	دانسیته خشک (kg/m^3)
کیک گرم	۴۰	۱	۰/۲۲
	۳۵	۰/۸۷۵	۰/۲۵
	۳۱	۰/۷۷۵	۰/۲۹

در شکل‌های ۳ تا ۶ درصد حلالیت عناصر روی، نیکل، کبالت و سرب تحت شرایط ارتفاع ستون پس از تراکم ۳۱، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متر نشان داده شده است.



شکل ۳: درصد حلالیت عنصر روی در سه تراکم مختلف ۳۱، ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متری برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

۳۰ روزه و در روزهای ۱، ۳، ۷، ۱۳، ۲۰ و ۳۰ جهت بررسی روند حلالیت و تاثیر خنثی‌سازی انجام گرفت.

در آزمایش‌های خنثی‌سازی دو پارامتر تراکم و استفاده از ضخامت‌های مختلف آهک در سه سطح مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲). در این مطالعه سعی بر این شد که روش‌هایی انتخاب شوند که ساده، کم هزینه و با کارایی بالا باشند.

جدول ۲: پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده جهت آزمایش‌های خنثی‌سازی

پارامترها	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
تراکم (cm)	۴۰	۳۵	۳۱
استفاده از آهک (cm)	۰	۱	۲

۳- بحث و نتیجه‌گیری

• تراکم

در ستون اول ۱/۰۵۰ کیلوگرم نمونه کیک کبالت بدون اینکه کوبشی بر روی آن صورت گیرد ریخته می‌شود. ارتفاع خاک در ستون اول (۴۰ سانتی‌متر) به عنوان ارتفاع خاک بدون تراکم مبنای محاسبات قرار می‌گیرد. نمونه‌ها در ستون‌های بعدی به اجزا مختلفی تقسیم می‌شوند. در ستون دوم ۱/۰۵۰ کیلوگرم نمونه به ۴ نمونه ۲۶۲/۵ گرمی و ستون سوم به ۸ نمونه ۱۳۱/۲۵ گرمی تقسیم می‌گردد. پس از ریختن هر نمونه در ستون، ضرباتی با استفاده از یک وسیله کوبشی به آن وارد می‌شود و به این ترتیب نمونه متراکم شده و پس از آن جزء دوم به روی قسمت اول ریخته می‌شود و به این ترتیب این کار آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا نمونه تمام شود. به هر یک از قسمت‌ها در هنگام تراکم یک لایه گفته می‌شود. هر چه تعداد لایه‌ها یا اجزا بیشتر باشد، خاک بیشتر متراکم می‌شود. برای ایجاد تراکم مختلف در ستون‌ها باید تعداد لایه‌ها متفاوت باشد. در این مطالعه تعداد لایه‌ها در ستون‌ها به ترتیب ۴ و ۸ انتخاب شدند.

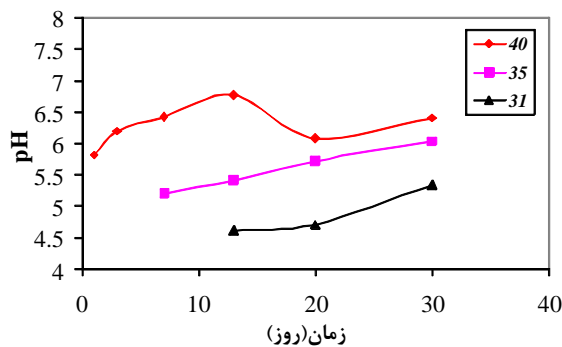
ضریب تراکم در هر ستون از رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$C_c = \frac{H_1}{H_0} \quad (2)$$

در این رابطه H_1 ارتفاع ستون پس از تراکم و H_0 ارتفاع ستون خاک بدون تراکم یا ستون اول می‌باشند.

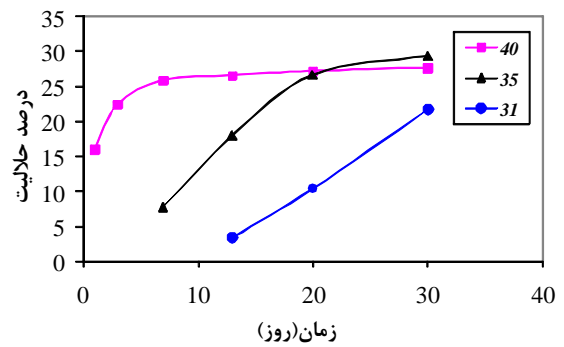
در شکل ۳ درصد حلالیت عنصر روی در ارتفاع‌های متراکم شده در بازه زمانی ۳۰ روزه نشان داده شده است. کمترین درصد حلالیت مربوط به ارتفاع متراکم شده ۳۱ سانتی‌متر می‌باشد. درصد حلالیت عنصر روی در ارتفاع‌های ۴۰، ۳۵ و ۳۱ سانتی‌متر به ترتیب ۱۴/۴۶، ۱۵/۳۵ و ۱۳/۴۷ است. در شکل ۴ درصد حلالیت عنصر نیکل آورده شده است که طی آن درصد حلالیت نیکل پس از گذشت ۳۰ روز در ارتفاع‌های ۴۰، ۳۵ و ۳۱ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۲۷/۶۸، ۲۹/۴۲ و ۲۱/۶۶ می‌باشد. درصد حلالیت کبالت در شکل ۵ نشان داده شده است. کمترین درصد حلالیت مربوط به ارتفاع متراکم شده ۳۱ سانتی‌متر است. درصد حلالیت پس از گذشت ۳۰ روز در ارتفاع‌های ۴۰، ۳۵ و ۳۱ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۰/۱۳۷، ۰/۰۳۵ و ۰/۰۲۴ می‌باشد. در شکل ۶ درصد حلالیت عنصر سرب آورده شده است که طی آن کمترین حلالیت پس از گذشت سی روز مربوط به تراکم ۳۱ سانتی‌متر و برابر با ۰/۰۳۵ می‌باشد و در ارتفاع‌های ۳۵ و ۴۰ سانتی‌متر درصد حلالیت به ترتیب برابر با ۰/۰۷۷۳ و ۰/۰۴۴ است.

شکل ۷ تغییرات pH محلول خروجی حاصل از کیک‌های کبالت متراکم شده را نشان می‌دهد که با گذشت زمان به سمت ۶ نزدیک می‌شود. از آنجایی که در کیک‌های متراکم شده کمترین محلول خروجی حاصل شد در نتیجه pH پایین‌تری نسبت به حالت عادی داشته است.

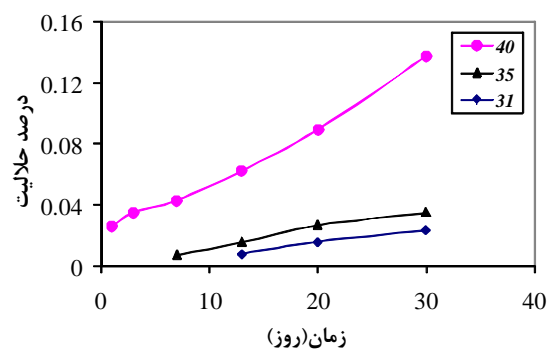


شکل ۷: pH محلول خروجی در سه تراکم مختلف ۳۰ و ۳۵، ۴۰ سانتی‌متری برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

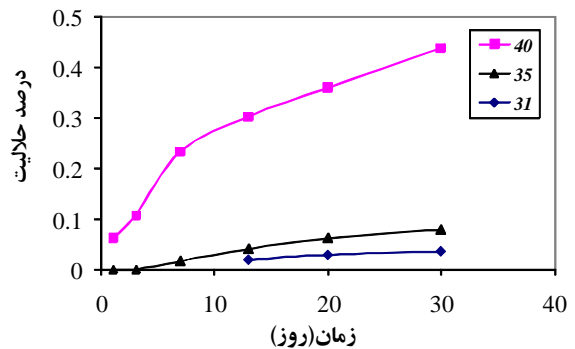
از آنجایی که تراکم با نفوذپذیری رابطه عکس دارد یعنی افزایش میزان تراکم سبب کاهش میزان نفوذپذیری می‌گردد، در نتیجه در اثر تراکم، حجم محلول خروجی کاهش می‌یابد. برای کیک کبالت کمترین حلالیت در ارتفاع متراکم شده ۳۱



شکل ۴: درصد حلالیت عنصر نیکل در سه تراکم مختلف ۳۵، ۴۰ و ۳۰ سانتی‌متری برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

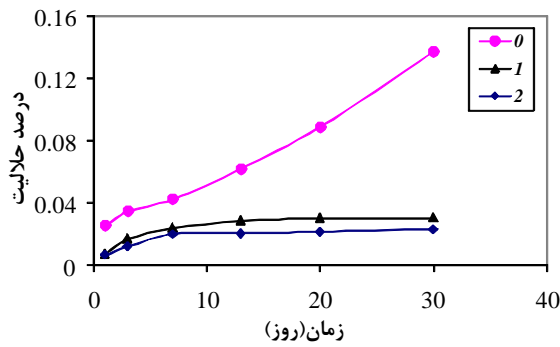


شکل ۵: درصد حلالیت عنصر کبالت در سه تراکم مختلف ۳۵، ۴۰ و ۳۰ سانتی‌متری برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

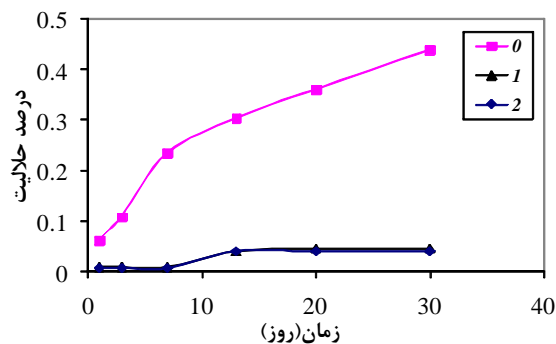


شکل ۶: درصد حلالیت عنصر سرب در سه تراکم مختلف ۳۵، ۴۰ و ۳۰ سانتی‌متری برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

در کیک کبالت وقتی که ارتفاع نمونه داخل ستون پس از تراکم به ۳۵ سانتی‌متر رسید به علت فشردگی کیک پس از گذشت ۵ روز خروجی از انتهای ستون بدست آمد. در ارتباط با نمونه کیک کبالت با ارتفاع متراکم شده ۳۱ سانتی‌متر پس از گذشت ۱۴ روز محلول از انتهای ستون خارج شد.



شکل ۱۰: درصد حلالیت عنصر کبالت در سه ضخامت مختلف آهک برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)



شکل ۱۱: درصد حلالیت عنصر سرب در سه ضخامت مختلف آهک برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

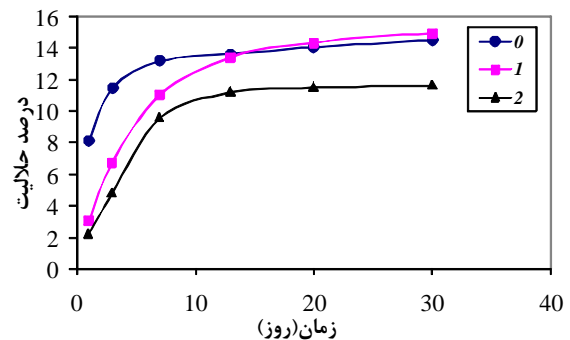
درصد حلالیت عنصر روی در شکل ۸ در بازه زمانی ۳۰ روزه نشان داده شده است. کمترین درصد حلالیت روی مربوط به کیک کبالت با ضخامت ۲ سانتی‌متر آهک در انتهای ستون است. درصد حلالیت عنصر روی با ضخامت ۱ سانتی‌متر آهک تا روز سیزدهم کمتر از حالت بدون آهک می‌باشد. اما پس از آن درصد حلالیت عنصر روی افزایش می‌یابد. درصد حلالیت عنصر روی پس از پایان ۳۰ روز در سه ضخامت مختلف آهک ۰، ۱ و ۲ سانتی‌متر به ترتیب ۱۴/۴۶، ۱۴/۹۰ و ۱۱/۵۹ می‌باشد. در شکل ۹ درصد حلالیت عنصر نیکل آورده شده است. عنصر نیکل نیز رفتاری مشابه با عنصر روی از خود نشان می‌دهد. کمترین درصد حلالیت مربوط به ضخامت ۲ سانتی‌متری آهک است. درصد حلالیت عنصر نیکل در سه ضخامت مختلف آهک ۰، ۱ و ۲ سانتی‌متری پس از گذشت ۳۰ روز به ترتیب برابر با ۲۷/۶۸، ۲۹/۸۸ و ۲۳/۷۱ می‌باشد. در شکل ۱۰ درصد حلالیت عنصر کبالت نشان داده شده است. عنصر کبالت در ضخامت‌های ۱ و ۲ سانتی‌متری از آهک دارای

سانتی‌متر به دست آمد. بنابراین می‌توان تمهیداتی اندیشید که آب باران جمع شده بر روی نمونه کیک متراکم شده و با نفوذپذیری فوق العاده کم توسط پمپی به داخل کانال‌هایی حاوی آهک برای خنثی‌سازی و قلیایی کردن محلول هدایت کرد.

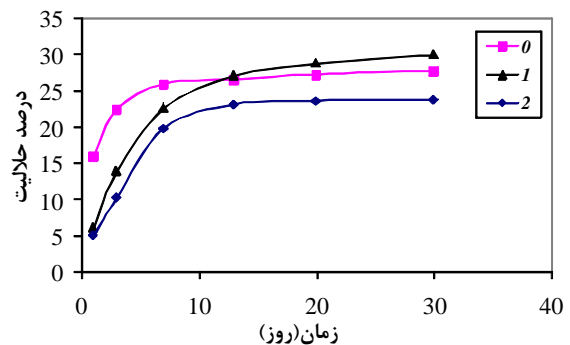
• استفاده از آهک

برای خنثی‌سازی و کاهش انتقال عناصر خطرناک به محیط زیست، آزمایش‌هایی برای بررسی تاثیر ضخامت آهک مصرفی در بخش انتهایی ستون با ضخامت‌های ۰، ۱ و ۲ سانتی‌متر آهک در انتهای ستون انجام شد. هدف از این آزمایش‌ها عبور محلول غنی از فلزات سنگین از لایه‌های ۱ و ۲ سانتی‌متری آهک و در نتیجه کاهش غلظت محلول‌ها در اثر قلیایی شدن pH می‌باشد.

در شکل‌های ۸ تا ۱۱ درصد حلالیت فلزات سنگین روی، نیکل، کادمیم و منگنز در سه ضخامت مختلف ۰، ۱ و ۲ سانتی‌متری از آهک در بازه زمانی ۳۰ روزه نشان داده شده است.



شکل ۱۲: درصد حلالیت عنصر روی در سه ضخامت مختلف آهک برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)



شکل ۱۳: درصد حلالیت عنصر نیکل در سه ضخامت مختلف آهک برای کیک کبالت (دبی: ۱ ml/min و pH ورودی: ۵)

- روش‌های میزان تراکم و استفاده از آهک به دلیل کم هزینه بودن، سادگی و کارآمدی بالا در خنثی‌سازی و همچنین عدم تغییر ماهیت پسماندها، روش‌های مناسبی برای بازیابی عناصر ارزشمند هستند.
- شرایط بهینه در میزان تراکم ۳۱ سانتی‌متر برای عناصر روی، نیکل، کادمیم و منگنز بدست آمد که دلیل آن کاهش نفوذپذیری و در نتیجه میزان حلالیت می‌باشد.
- شرایط بهینه در استفاده از ضخامت ۲ سانتی‌متری آهک بدست آمد زیرا کمترین حلالیت فلزات سنگین در این شرایط است.
- مقایسه دو روش تراکم و استفاده از آهک نشان داد که روش استفاده از تراکم به دلیل ایجاد کمترین حلالیت، روش مناسب‌تری برای خنثی‌سازی می‌باشد.
- pH محلول خروجی در ضخامت‌های ۱ و ۲ سانتی‌متری از آهک بین ۵/۵ تا ۶/۵ است که نشانگر تاثیر نپذیرفتن از لایه آهک و قلیایی نشدن محلول نهایی می‌باشد.

۵- منابع

- [۱] حکمی-ع؛ ۱۳۸۵؛ "گزارشی از خط تولید روی مرکز R&D، شرکت توسعه معادن روی ایران، گزارش شماره ۲۲۴.
- [۲] مرادی، سعید؛ ۱۳۸۳؛ روی؛ انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران؛ چاپ اول.

[3] T. Van Gerven, E. Van Keer, S. Arickx, M. Jaspers, G. Wauters, C. Vandecasteele; 2005; "Carbonation of MSWI-bottom ash to decrease heavy metal leaching, in view of recycling"; Waste Management, No. 25, pp. 291-300.

[4] Park C.; 1999; "Hydration and Solidification of Hazardous Wastes Containing Heavy Metals Using Modified Cementitious Materials"; Cement and Concrete Research, No. 30, pp. 429-435.

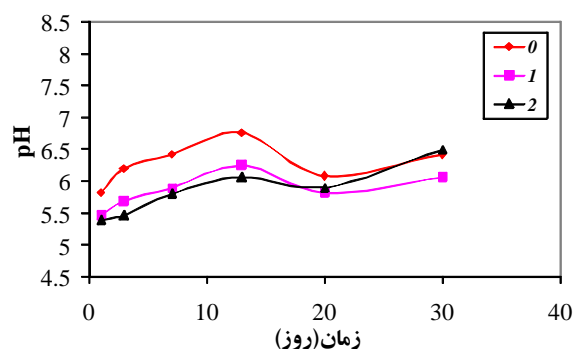
[۵] رجب پور اشکیکی، ع؛ ۱۳۸۶؛ "بررسی امکان تثبیت خاک آلوده به پسماندهای کارخانه فرآوری روی توسط سیمان پرتلند"، دانشگاه تربیت مدرس.

[6] Baker, AJM, and RR. Brooks; 1989; "Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution"; Ecology and Phytochemistry; Biorecovery No.1, pp. 81-126.

[7] Black, Charles Allen; 1973; "Methods of Soil Analysis"; American Society of Agronomy : Madison, WI.

حلالیت بسیار کمتری نسبت به حالت بدون استفاده از آهک می‌باشد. درصد حلالیت عنصر کبالت تا روز هفتم دارای شیب کندی است و پس از آن به یک مقدار ثابت می‌رسد. درصد حلالیت عنصر کبالت در سه ضخامت مختلف آهک ۰، ۱ و ۲ سانتی‌متری پس از گذشت ۳۰ روز به ترتیب برابر با ۰/۱۳۷، ۰/۰۳۱ و ۰/۰۲۳ می‌باشد. درصد حلالیت عنصر سرب در سه ضخامت مختلف ۰، ۱ و ۲ سانتی‌متری از آهک در شکل ۱۱ نشان داده شده است که بر طبق آن درصد حلالیت عنصر سرب به ترتیب برابر با ۰/۰۴۶، ۰/۰۴۱ و ۰/۰۴۱ می‌باشد.

در شکل ۱۲، pH محلول خروجی آورده شده است که از ۵/۵ شروع و در نهایت به ۶ نزدیک می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌گردد محلول خروجی کبالت تحت تاثیر لایه‌های آهک قرار نگرفته و در نهایت دارای pH اسیدی است. لازم به ذکر است که در طول مدت ۳۰ روز، میزان محلول خروجی کمی از هر دو ستونی که دارای ضخامت‌های ۱ و ۲ سانتی‌متری آهک بودند، حاصل شد. پس از پایان ۳۰ روز، تخلیه ستون‌ها نشان داد که در مرز مشترک کبک و لایه آهک یک لایه فوق العاده سخت و محکم از ترکیب و برخورد این دو ماده تشکیل شده و در نتیجه نفوذپذیری را به حداقل رسانده بود. ضخامت ۲ سانتی‌متری از آهک می‌تواند به عنوان بهترین گزینه جهت کاهش حلالیت عناصر خطرناک کبک‌های کبالت مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۲: pH محلول خروجی در سه ضخامت مختلف آهک برای کبک کبالت (دبی: ۱ و ۲ ml/min و pH ورودی: ۵)

۴- نتایج

- میزان نفوذپذیری کبک کبالت بسیار پایین بوده و در نتیجه سرعت انتقال فلزات سنگین به محیط زیست خیلی کند است.

[8] National Bureau of Standard Reference Material Catalog; 1986-87; Special Publication 260.

[۹] رحمانی، م؛ ۱۳۸۳؛ "بهبودسازی عوامل موثر بر هیپ لیچینگ معدن مس سرچشمه"؛ دانشگاه تربیت مدرس.

[۱۰] طاحونی، ش؛ ۱۳۷۹؛ "اصول مهندسی ژئوتکنیکی"؛ جلد اول.

-
- ¹ - Municipal Solid Waste Incinerator
 - ² - Stabilization
 - ³ - Land fill
 - ⁴ - Ordinary Portland Cement(OPC)
 - ⁵ - Toxicity Characteristic Leaching Procedure