

# بررسی پارامترهای موثر در انتقال یون سیانید از پساب سدهای باطله به منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: معدن طلای موته)

احمد خدادادی<sup>i</sup>، محمود عبداللهی<sup>ii</sup>، پژمان تیموری، عبدالله سمیعی<sup>iii</sup>

چکیده:

تحقیقات نشان می‌دهد که پارامترهای هیدرولوژیکی زیادی در انتقال یون سیانید (CN) یا ترکیبات سیانوره از سد باطله به منابع آب زیرزمینی موثر بوده است که این پارامترها شامل تخلخل خاک، نوع خاک، مشخصات آبخوان و سرعت آب زیرزمینی می‌شوند. سیانید در صنایع معدنی از جمله فرآوری طلا، سرب و روی و صنایع شیمیایی مصرف گسترده دارد و انتقال آن به منابع آب دلیل خواص سمی زیاد یکی از معضلات مهم زیست محیطی به شمار می‌رود. با بررسی رفتار سیانید در خاک می‌توان امکان جذب و سرعت انتقال آن به منابع آب زیر زمین را پیش بینی کرد. برای این کار از پساب کارخانه فرآوری طلای موته حاوی ۲۷۰ میلی‌گرم در لیتر یون سیانید استفاده شد. به منظور بررسی پارامترها، سه نمونه مختلف خاک شامل خاک اطراف سد باطله و دو نوع رس طبیعی (بنتونیت و خاک رس دانشگاه) انتخاب و بعد از تراکم خاکها با رطوبت بهینه، آزمایش‌های نفوذپذیری آنها در ستون به وسیله محلول سیانید انجام گرفت. در محلول خروجی از ستون آزمایش، دبی محلول خروجی، ضریب نفوذپذیری و همچنین غلظت سیانید در زمان‌های مختلف اندازه گیری شد. اندازه گیری غلظت سیانید با روش تیتراسیون و با استفاده از محلول معرف ردانین (محلول پارا دی متیل آمینو بنزیلیدین ردانین در استن) و نیترات نقره به انجام رسید. نتایج آزمایش ها نشان می‌دهد که با وجود اختلاف در نفوذ پذیری خاکها تنها مقدار کمی از سیانید در ستون خاک جذب می‌شود همچنین زمان نیمه عمر سیانید (CN)، ۱/۸ سال است.

کلمات کلیدی:

رس، ضریب نفوذپذیری، سیانید، انتقال

## *Investigating on Effective Parameters in Cyanide ion Transport From Tailing Damps to Ground Water Resources (Case Study: Muteh Goldmine)*

### ABSTRACT

Research indicates that various hydrological parameters affect the transport of cyanide from tailing dam to groundwater including porosity of the soil, type of the soil, aquifer characteristics and effective velocity of groundwater. Cyanide is often used by chemical and mineral industries especially in gold, lead and zinc processing. The transport of cyanide to water resources is one of the most important environmental issues due to the acutely toxic properties of many cyanide compounds to humans and acute life. The investigation of cyanide fate into the soil can help to predict the adsorption and transport of cyanide into groundwater. Tailing wastewater which contains about 250 mg/ lit cyanide was obtained from Muteh gold mine factory.

<sup>i</sup> استادیار مهندسی محیط زیست، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس، akdarban@modares.ac.ir

<sup>ii</sup> دانشیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی دانشگاه تربیت مدرس

<sup>iii</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس



Three types of clays soils including a soil from around tailing dam, natural clay samples from Tehran and bentonite clay were used for the coefficient of permeability tests. The volumes of effluents, coefficient of permeability' and concentration of cyanide were measures at specific times. Cyanide concentration in effluents was determined by Rhodanine indicator solution regarding the standard titration method. The results indicate that very little of cyanide was absorbed along the column regardless the type of the clays soil which was employed in this research.

#### KEYWORDS:

Clays, coefficient of permeability, cyanide transport

عوامل موثر بر حرکت سیانید در خاک است، با این تفاوت که در مناطق اشباع از آب زیرزمینی، فرآیند تبخیر دلیل اشباع بودن و واکنش‌های فتوشیمیایی به دلیل عدم وجود نور صورت نمی‌گیرد و انجام واکنش‌های بیولوژیکی نیز بسیار پایین است. با بهره‌گیری از این فاکتور تاخیر می‌توان سرعت حرکت آلاینده در آب زیرزمینی را تخمین زد. رابطه زیر بیان‌کننده فاکتور تاخیر در حرکت آلاینده است. [۸]، [۱۳].

$$R = \frac{V_x}{V_e} = 1 + \frac{P_b}{P_e} \theta \quad (1)$$

که در آن پارامترها عبارتند از:

$V_x$ : سرعت آب زیرزمینی (متر در ثانیه).

$V_e$ : سرعت آلاینده (متر در ثانیه).

$P_b$ : دانسیته سازندها (کیلوگرم بر متر مکعب).

$P_e$ : تخلخل موثر (بدون بعد).

$\theta$ : ضریب جدایش آلاینده از مواد آلی سازنده آبخوان ( $m^3/kg$ ).

مطالعات کمتری راجع به رفتار سیانید در خاک به صورت عملی انجام شده است و بیشتر مطالعات حذف سیانید از پساب صنعتی بر می‌گردد [۱] - [۵].

به طور کلی، مقداری از سیانید و ترکیبات آن به واسطه فرآیندهای ژئوشیمیایی و بیولوژیکی، می‌توانند در خاک تجزیه و حذف شوند. جذب سیانید به وسیله خاک رس با توجه به بار منفی آن می‌تواند کم باشد، ولی در هر صورت با توجه به نوع ترکیبات خاک، در صد تراکم و میزان نفوذپذیری خاک رس و انتقال آن به منابع آبی ممکن است متفاوت باشد [۸]، [۱۳]. عوامل عمده‌ای که در جذب سیانید در خاک و نیز انتقال آن به آبهای زیرزمینی موثرند عبارتند از: درصد مواد رسی خاک، ظرفیت تبادل کاتیون‌ها و آنیون‌های قابل تعویض، مقدار اکسیدهای آبدار آهن و منگنز در خاک، مقدار کربن آلی موجود در خاک و pH خاک [۷]، [۱۰].

مکانیسم‌های جذب سیانید در خاک شامل جذب بر روی سطح کانی‌ها و یا مواد آلی، رسوب‌گیری کمپلکس‌های نامحلول سیانید با فلزات خصوصاً با آهن و اکسیداسیون سیانید به تیوسیانات است [۱۰]، [۱۲]. همان طوری که ذکر شد،

#### ۱- مقدمه

سیانید یک ترکیب شیمیایی کربن و نیتروژن است که سیانید هیدروژن، سیانید سدیم و سیانید پتاسیم مثالهایی از ترکیبات ساده سیانیدی هستند. سیانید یک ماده بسیار سمی و خطرناک است ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم از سیانور (سیانید آزاد) باعث مرگ انسان می‌شود و همین مقدار از آن در هر لیتر می‌تواند برای جانداران دیگر نیز خطرناک باشد. آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا (EPA) ۲/۵ میلی‌گرم در لیتر از سیانید را برای آب شیرین و ۱ میلی‌گرم در لیتر از آن را برای آب شور مجاز دانسته است. ورود از طریق سدهای باطله صنایع فرآوری مواد معدنی و یا پساب صنایع شیمیایی آن به آبهای سطحی، زیرزمینی و خاک خسارات جبران‌ناپذیری را بر محیط زیست و زندگی بشری به همراه دارد [۱]. انتقال و پخش سیانید از سد باطله علاوه بر سرعت افقی آب زیرزمینی، به عوامل دیگری نیز بستگی دارد که عبارتند از: (۱) انتقال سیانید به سبب حرکت توده‌ای آب به سمت جلو (Advection). (۲) پخش و انتقال آلاینده به دلیل فشار آب و تخلخل آبخوان که بدان پخش مکانیکی نیز می‌گویند. (۳) پخش آلاینده به علت وجود گرادیان غلظتی در لایه‌های عرضی آب که نفوذ ملکولی (Diffusion) نامیده می‌شود. به طور کلی آلاینده‌های شیمیایی در ابتدا بوسیله نیروی افقی آب در جهت جریان به سمت جلو منتقل و سپس به دلیل برخورد با خلل و فرج سازند آبخوان، پخش می‌شوند. پخش آلاینده در جاهائیکه سرعت آب زیاد است به پخش مکانیکی مربوط می‌باشد و از اثر گرادیان غلظتی آن می‌توان صرف‌نظر نمود. جذب و دفع سطحی (Adsorption-Desorption) و ترسیب شیمیایی آلاینده‌ها از جمله عوامل موثر در چگونگی انتقال و کاهش غلظت آلاینده‌ها در آبخوان است. ترکیبی از پخش مکانیکی و نفوذ ملکولی، پخش هیدرودینامیکی (Hydrodynamic Dispersion) را به وجود می‌آورد. از این رو، پخش کلی و در نهایت رقیق‌سازی (Dilution) آلاینده‌ها ناشی از پخش هیدرودینامیکی می‌باشند [۱۵]، [۱۶]. از سوی دیگر عوامل موثر در تجزیه، تخریب، تقلیل و تاخیر (نسبت سرعت آب زیرزمینی به سرعت آلاینده) سیانید در آب زیرزمینی همان

## ۲-۲-۲ روش تیتراسیون سیانید

برای تیتراسیون سیانید در ابتدا ۲۰ میلی لیتر از محلول سیانیدی با محلول بلانک به یک لیتر افزایش حجم می‌یابد. از محلول تهیه شده، ۵۰ میلی لیتر در بشیر ریخته شد. و حدود ۰/۵ میلی لیتر از محلول معرف ردانین به وسیله پیپت به درون بشر ریخته می‌شود. بشر در زیر بورت حاوی محلول نیترات نقره قرار گرفته و با باز کردن شیر بورت اجازه داده می‌شود تا محلول نیترات نقره آرام آرام به درون بشر ریخته شود. به محض اینکه رنگ محلول داخل بشر که از ابتدا زرد بود، به رنگ پیازی تبدیل گشت، شیر بورت سریعاً بسته می‌شود و حجم محلول نیترات نقره مصرفی خوانده می‌شود. ایجاد رنگ پوست پیازی نشان دهنده کمپلکس شدن کامل یون سیانید با نقره است و به این ترتیب میزان سیانید اندازه گیری می‌شود. مقدار سیانید موجود در پساب ۲۷۰ میلی‌گرم در لیتر تعیین شد.

## ۲-۲-۳- انتخاب نمونه خاک

نمونه خاک های انتخاب شده برای این تحقیق عبارتند از:  
۱- خاک رس که از رسوبات آبرفتی منطقه موده در اطراف سد باطله، برای مطالعه میزان سیانید در آنها تهیه شد (خاک رس ۲)،  
۲- بنتونیت به دلیل داشتن قابلیت بالای جذب آلاینده ها، ۳- خاک رس دیگر که برای مقایسه میزان نفوذ پذیری سیانید با دیگر خاکها انتخاب شد (رس ۱). به منظور یکنواخت شدن دانه بندی خاک و در نتیجه نفوذ پذیری یکنواخت در تمام بستر خاک، ابتدا خاکها از سرند (۴۰ میکرون) عبور داده شد و خاکهای زیرسردی برای انجام آزمایش ها مورد استفاده شد. دلیل خشک بودن خاکهای مذکور و به منظور تحکیم مناسب خاک در بستر، با توجه به درصد رطوبت میانگین طبقات بر جای خاک، درصدهای رطوبت بهینه برای خاکهای رس ۱، ۲ و بنتونیت تعیین شد. در جدول (۱) مشخصات خاک منطقه موده بیان شده است.

## ۲-۲-۴ روش انجام آزمایش

ابتدا، در صد تراکم بهینه برای هر کدام از خاکها تعیین و سپس در داخل وله از جنس پلیکا به طول ۱۶ و شعاع ۳۰/۴۸ سانتی‌متر انتخاب شد. طول ستون خاک در داخل لوله‌های پلیکا، ۱۴ سانتی‌متر انتخاب گردید و هر سه ستون در ارتفاع یکسان بر روی سه پایه با گیره نصب شد. برای نزدیک کردن و شبیه‌سازی نسبی بستر خاک با لایه‌های زیرین طبقات خاک، خاکها در چند مرحله درون لوله‌های پلیکا ریخته شد و در هر مرحله مقطع ستون‌های خاک کوبیده شد. در ارتفاع ۱/۲ متری بالای ستون‌های خاک، سه مخزن به حجم ۴۰۰ میلی متر، که حاوی محلول سیانیدی (پساب سد باطله موده) با غلظت ۲۷۰

واکنش‌های در سطح بسیار پایینی صورت می‌گیرند. سیانید تحت شرایط هوازی در لایه‌های سطحی خاک و آبهای زیرزمینی به آمونیاک، نیتروژن و حتی نیترات و دی‌اکسید کربن و تحت شرایط بی‌هوازی، به یون آمونیوم، نیتروژن، تیوسیانات و دی‌اکسیدکربن تجزیه می‌شود [۶]، [۱۱]، [۱۴]. این تحقیقات به منظور بررسی انتقال سیانید موجود در سد باطله کارخانه طلای موده به منابع آب زیر زمینی اطراف منطقه بر روی خاک رس اطراف سد باطله و بنتونیت، به علت داشتن قابلیت زیاد در جذب آلاینده ها و یک نمونه خاک دیگر به منظور مقایسه انجام شد.

## ۲- مواد و روش ها

### ۱-۲-۱- مواد لازم برای انجام آزمایش ها

وسایل آزمایشگاهی: pH متر با مدل Hanna، ترازوی دقیق برای اندازه گیری مواد شیمیایی با دقت ۰/۰۰۱ گرم، سرند (۴۰ میکرون)، وسایل آزمایشگاهی اعم از بورت، بالون، قیف، ستون (لوله از جنس پلیکا به طول ۱۶ و شعاع ۳۰/۴۸ سانتی‌متر)، بشر و غیره. مواد لازم محلول سیانیدی، خاک رس، نیترات نقره برای تیتراسیون سیانید، ردانین به عنوان معرف برای تیتراسیون، استون خالص برای تهیه معرف ردانین (محلول تهیه شده از انحلال پارا دی متیل آمینو بنزیلیدین ردانین در استون)، هیدروکسید سدیم برای تهیه محلول بلانک (۰/۰۴ مول) برای جلوگیری از تغییر در مقدار سیانید و جلوگیری از تبخیر سیانید، اسید کلریدریک و محلول سود برای تنظیم pH آب مقطر برای تهیه محلول ها.

## ۲-۲ روش ها

### ۱-۲-۲ نمونه‌گیری از پساب کارخانه و خصوصیات

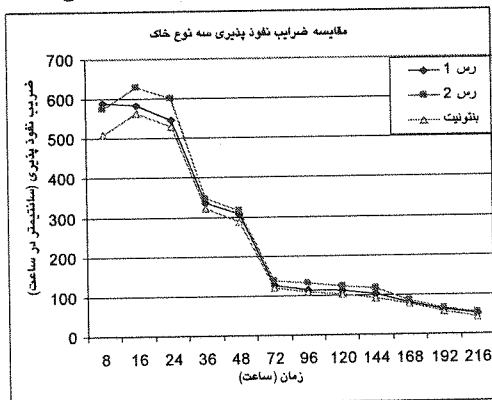
#### پساب

نمونه‌گیری از پساب کارخانه فرآوری طلای موده از پساب خروجی تیکنر به مقدار ۲۰ لیتر انجام گرفت. پساب کارخانه پس از ته نشینی حاوی دو قسمت است: الف) بخش مایع پالپ که شفاف است. ب) بخش لجن پالپ که عمدتاً حاوی ذرات سیاه‌رنگ کربن فعال است. دلیل وجود کانی های رسی به همراه لجن، پس از ته‌نشین شدن لجن در پالپ، لجن ته‌نشین شده به صورت یک توده با چگالی بسیار زیاد و فوق‌العاده چسبنده در می‌آید. پس از انتقال نمونه گرفته شده از پساب، با ته‌نشین شدن کامل لجن، آب بعد از فیلتراسیون جدا شد. [۷].

خاک منطقه موده در زمان های مساوی بیشتر از خاک بنتونیت و خاک رس نوع ۱ است، پس می توان گفت حتی در صورتی که سد باطله امکان نشست هم نداشته باشد دلایل نفوذ پذیری نسبتاً بالای خاک و عدم امکان جذب محلول سیانید می تواند به منابع آب راه یابد.

### ۳-۱-۲- ضریب نفوذپذیری

شکل (۲) تغییرات ضریب نفوذپذیری محاسبه شده در ستون های مختلف را در زمان های مختلف نشان می دهد.

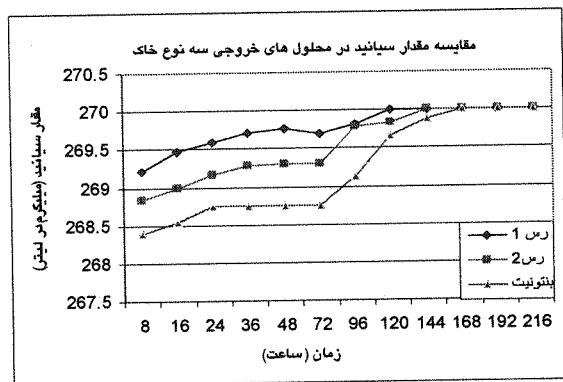


شکل (۲): تغییرات ضریب نفوذپذیری با زمان در ستون های مختلف

با توجه به شکل (۲) میزان ضریب نفوذ پذیری در کلیه ستون های خاک با گذشت زمان کاهش یافته است، این کاهش از رسوب ترکیبات شیمیایی مختلف موجود در پساب کارخانه ناشی شده است که با توجه به pH بالای پساب حدود ۱۲ موجب رسوب اکثر ترکیبات فلزی موجود در پساب و در نتیجه سبب پر شدن فضای خالی موجود بین بافت دانه ای خاک می شود. در هر صورت، میزان نفوذپذیری در خاک متعلق به منطقه اطراف موده بیشتر از دونوع رس دیگر است.

### ۳-۱-۳- تغییرات غلظت سیانید خروجی

شکل (۳) تغییرات غلظت سیانید خروجی از ستون های مختلف را نشان می دهد.



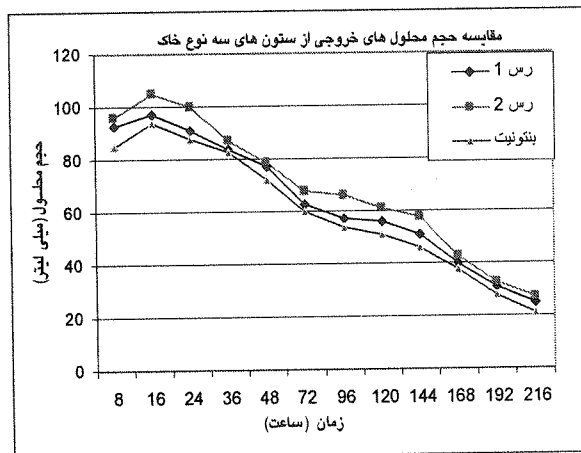
شکل (۳): تغییرات غلظت سیانید در محلول های خروجی از ستون ها با زمان

میلی گرم در لیتر سیانید بود، قرار داده شد و تمام حجم مخزن ها از پساب سیانیدی پر شد. مخزن ها به وسیله لوله پلاستیکی به یک پخش کن (صفحه مشبک) در بالای ستون خاک متصل گردید. دبی محلول های سیانیدی به نحوی تنظیم شد که آب، ضمن توزیع یکنواخت بر روی مقطع خاک در ستون لیچ، به آرامی در طول ستون حرکت کند و ستون خاک سریعاً از محلول سیانیدی اشباع نشود. پس از گذشت هشت ساعت، اولین محلول لیچ سیانیدی خروجی از زیر ستون جمع آوری شد و سایر نمونه ها نیز در زمان های مختلف پس از شروع لیچینگ از محل خروجی ستون ها جمع آوری و غلظت سیانید موجود در آنها اندازه گیری شد [۱۰].

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱-۳- آزمایش ها بر روی محلول سیانیدی فیلتر شده از پالپ

جدول (۲) و شکل های (۱) و (۲) حجم محلول خروجی و غلظت سیانور اندازه گیری شده روش تیتراسیون از سه نوع رس را در زمان های مختلف نشان می دهد.



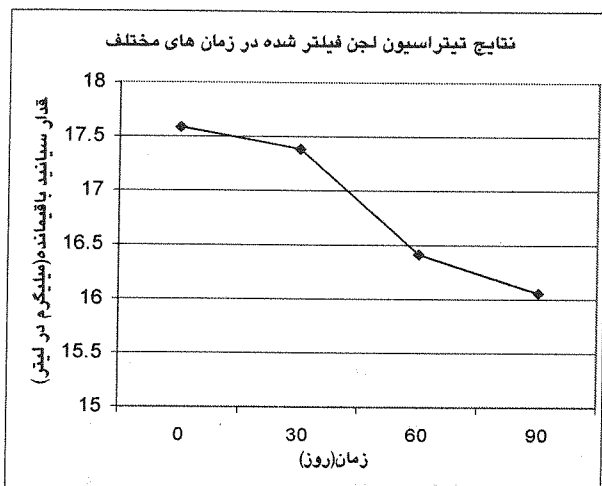
شکل (۱): تغییرات حجم محلول خروجی نسبت به زمان از ستون های

#### ۳-۱-۳- حجم محلول خروجی

همان طور که در جدول (۲) و شکل (۱) نشان داده شده است، تا زمان شانزده ساعت پس از انجام آزمایش ها، حجم محلول های خروجی افزایش می یابد و به ترتیب به ۰.۹۷، ۱.۰۵ و ۹۴ میلی لیتر برای خاک های رس ۱، ۲ و بنتونیت می رسد و پس از زمان ۱۶ ساعت حجم محلول های خروجی بتدریج کاهش می یابد و نشان می دهد که گذر آب در طول ستون کاهش می یابد، از سوی دیگر، تغییرات حجم محلول های خروجی برحسب (ml) نیز بیانگر آن است که به دلیل نفوذپذیری پایین خاک رس اطراف سد باطله، حجم محلول خروجی از ستون

جدول (۳): نتایج تیتراسیون لجن فیلتر شده در زمان‌های مختلف و میزان حلالیت سیانید در باطله جامد

ر	غلظت سیانید در محلول لیچ شده با آب مقطر (mg/l)	میزان حلالیت سیانید در باطله جامد (mg/kg)
۱	۱۷/۵۸	۱۷/۵۸×۱۰۲
۲	۱۷/۳۹	۱۷/۳۹×۱۰۲
۳	۱۶/۴۲	۱۶/۴۲×۱۰۲
۴	۱۶/۰۶	۱۶/۰۶×۱۰۲



شکل (۴): تغییرات غلظت سیانید لجن فیلتر شده بر حسب زمان

همانطوری که در جدول (۳) و نمودار (۴) ملاحظه می‌شود، طی ۲ ماه، کاهش غلظت سیانید ۱/۵۲ میلی‌گرم در لیتر بوده است.

### ۳-۳- محاسبه زمان نیمه عمر سیانید

تنها راه دستیابی به زمان تجزیه سیانید، محاسبه زمان نیمه عمر سیانید است و اصولاً محاسبه شدت تجزیه ترکیبات سیانیدی بسیار مشکل است. برای یون سیانید به دلیل عدم وجود کمپلکس فلزی در آن می‌توان رابطه سینتیک درجه اول را بکار برد. اما زمان نیمه عمر محاسبه شده، به سیانید موجود در فاضلاب یا لجن پساب کارخانه مربوط است و به ترکیبات جذب شده، ترکیب شده و یا یونهای سیانید مبادله شده بر روی ذرات خاک ارتباطی ندارد. البته برای ترسیب سیانیدی نیز روش محاسبه نیمه عمر به همین طریق است، لیکن نوع واکنش‌های انجام شده متفاوت بوده و پیچیدگی بیشتری دارد، پس می‌توان برای یون سیانید به دلیل عدم وجود کمپلکس فلزی در آن رابطه سینتیک مرتبه اول را بکار برد:

$$V=K[CN^-] \quad (1)$$

$$K = \frac{2/303}{t} \times \text{Log} \left( \frac{[CN^-]_i}{[CN^-]_f} \right) \quad (2)$$

همان طور که دیده می‌شود غلظت سیانید در محلول خروجی از ستون‌ها پس از گذشت زمان‌های ۱۲۰، ۱۴۴ و ۱۶۸ ساعت از شروع لیچینگ خاکهای رس ۱، ۲ و بنتونیت، مقدار سیانید در خروجی محلولهای لیچ مجدداً به ۲۷۰ میلی‌گرم در لیتر رسیده است که بر افزایش غلظت سیانید خروجی از خاک رس نوع ۲ دلالت می‌کند به خاک اطراف سد با طله متعلق است. در هر صورت، رسیدن غلظت خروجی سیانید بعد از مدت کوتاهی نشان دهنده آن است که هر سه نوع خاک نتوانسته اند مقدار قابل توجهی از سیانید را جذب کنند. عدم جذب سیانید در سه نوع خاک دلیل وجود بار منفی در انواع رسها و ناتوانایی رس در جذب آنیون می‌باشد. خاکهای آلی یا خاکهایی که درصد مواد آلی آنها بسیار بالاست، سیانید را به خوبی جذب کنند و سبب اکسیداسیون بیولوژیکی آن شوند.

### ۳-۲- آزمایش‌های انجام شده بر روی لجن فیلتر شده

#### پساب

به منظور بررسی میزان تجزیه بیولوژیکی سیانید و نیز برای بررسی مدت زمان حضور سیانید در خاک، میزان غلظت سیانید در لجن فیلتر شده پساب کارخانه طلای موته در زمان‌های مختلف تیتراسیون و مقدار سیانید باقیمانده در لجن باگذشت زمان تعیین شد. بدین منظور نمونه پالپ کارخانه با تحت فشار هفت بار فیلتر شد و کیک فیلتر کاملاً آگیری شد. بخشی از فیلتر کیک جدا و بر روی کاغذ پهن شد تا در مدت زمان طولانی تمام نمونه در تماس با هوا قرار گیرد. طبق استانداردهای موجود، برای تیتراسیون جامدات حاوی سیانید باید ۵۰۰ میلی‌گرم از نمونه جامد را در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرد و به مدت یک ساعت آن را به هم زد. مدت زمان یک ساعت برای برقراری تعادل حلالیت سیانید کافی است. پس از این کار، غلظت سیانید در محلول تعیین می‌شود که حاصل ضرب این غلظت در ۱۰۲ نشان دهنده میزان حلالیت سیانید در باطله جامد بر حسب میلی‌گرم در هر کیلوگرم باطله جامد خواهد بود، لذا در زمان‌های مختلف و به فاصله یک ماه، با انحلال ۵۰۰ میلی‌گرم لجن جامد در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب، سیانید موجود در لجن تیتراسیون شد. نتایج تیتراسیون در زمان‌های مختلف مطابق جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است.

$$\frac{1}{t^2} = \frac{0.693}{K}$$

در روابط بالا،  $[CN^-]_i$  غلظت اولیه سیانید،  $[CN^-]_f$  غلظت نهایی سیانید،  $t$  زمان لازم برای تغییرات غلظت (از اولیه به نهایی)،  $K$  ثابت سرعت (متناسب با عکس زمان)،  $t^{\frac{1}{2}}$  زمان نیمه عمر سیانید (سال) و  $V$  سرعت تجزیه و تخریب سیانید است، اما همان طور که قبلاً ذکر شد، میزان سیانید در لجن فیلتر شده،  $17/08$  میلی گرم در لیتر اندازه گیری شد که پس از گذشت  $90$  روز، مقدار سیانید باقیمانده در لجن به  $16/06$  میلیگرم در لیتر رسیده و کاهش غلظت یون سیانید،  $1/02$  میلی گرم در لیتر بوده است، لذا زمان نیمه عمر سیانید (سال) مطابق جدول (۴) می باشد. همان طوری که از جدول (۴) پیداست، زمان نیمه عمر سیانید ( $CN^-$ )،  $1/8$  سال است. اما سرعت تجزیه و تخریب سیانید با احتساب غلظت اولیه  $270$  میلیگرم در لیتر پساب چنین است:

$$V = K[CN^-] \quad 1.00496 * 10^{-3} * 270 \quad 0.2713392 \left( \frac{mg}{L \cdot Year} \right)$$

باتوجه به اینکه روزانه  $300$  متر مکعب پساب وارد سد باطله می شود که از این حجم،  $\frac{2}{3}$  آن به لجن مربوط می باشد (مابقی آب باطله ای است که دوباره وارد چرخه تولید می شود) لذا حجم تقریبی سالیانه لجن معادل  $300 \times \frac{2}{3} \times 365 = 73000$  متر مکعب خواهد شد و در نتیجه سرعت تجزیه سیانید عبارت است از:

$$0.2713392 \left( \frac{mg}{L \cdot Year} \right) * 73000 * 103 = 19807.7616 (kg / Year)$$

ملاحظه می شود که سالیانه به طور متوسط حدود  $20$  تن سیانید موجود در پسماندهای جامد تجزیه شده و مابقی به صورت  $CN^-$  باقی می ماند که وارد آبهای زیرزمینی می شود.

#### ۴- نتایج

در این تحقیق، برای بررسی جذب سیانید در خاک، آزمایش های لیچ خاک به وسیله محلول سیانیدی انجام شد. در این آزمایش ها، سه نوع خاک با آب باطله کارخانه پلاستیکی مته لیچ شد و با تیتراسیون سیانید در محلول های لیچ خروجی از ستون های خاک، میزان جذب آن در خاک اندازه گیری شد.

بر اساس آزمایش ها انجام شده، جذب سیانید در خاک مته ناچیز و حتی قابل اغماض است، علاوه بر این، سالیانه حدود  $20$  تن سیانید آن هم در صورت فراهم بودن شرایط محیط شیمی - فیزیکی تجزیه شده و مابقی سیانید موجود در سد باطله می تواند در صورت نشت از دیواره و کف سد باطله وارد آبهای

زیرزمینی شود.

باتوجه به اینکه نیمه عمر سیانید کم است ( $1/889$  سال)، واکنش های تجزیه و تخریب سیانید در خاک به سرعت صورت می گیرد. همچنین نظر به اینکه جذب سیانید در خاک کم است، واکنش هایی که به تجزیه و تخریب سیانید منجر می شوند محدود بوده و در سطح بسیار پایینی صورت می گیرند، بدین معنی که سیانید در قشر سطحی خاک، از طریق تبخیر، سریعاً وارد جو می شود و در عین حال در اعماق پایین سد باطله تحت تاثیر واکنش های بیولوژیکی قرار می گیرد. به طور کلی کمپلکس های سیانید با فلزات در حضور نور خورشید سادگی شکسته می شوند که در اعماق خاک این امر ممکن نیست.

باتوجه به نفوذپذیری بالای خاکهای منطقه مته، سرعت حرکت آبهای زیرزمینی بسیار پایین است و در صورت انتقال سیانید به آبهای زیرزمینی، انتقال آن به کندی صورت می گیرد و عملاً الگوی جریان آلاینده تحت تاثیر بافت فیزیکی آبخوان و خصوصاً خاک منطقه قرار می گیرد.

تحت شرایط مناسب در خاک، کانی های رسی، اکسیدهای آبدار و مواد آلی به جذب آلاینده های خاک قادر می باشند، لیکن در مورد سیانید دلیل جذب کم آن در خاک، که در آزمایش های لیچ سیانیدی خاک ثابت شده است، صادق نیست. اکسیدهای آهن و منگنز، برای تشکیل کمپلکس با سیانید قابلیت بالایی را دارند و وجود آنها در خاک سبب تشکیل کمپلکس می شود که این کمپلکس ها قابلیت انتقال پایینی به آبهای زیرزمینی دارند. چنانچه pH خاک در حد (۸ تا ۹) باشد، شرایط مناسبی برای رقیق سازی ژئوشیمیایی آلاینده ها فراهم می کند (کاهش غلظت آلاینده ها). اکثر ترکیبات سیانیدی در pH اسیدی شکست شده و فروسیانید نیز در pH اسیدی، در اثر واکنش های منجر به تبخیر، از محیط خاک دفع می شود.

باتوجه به زمان نیمه عمر پایین سیانید و pH اسیدی خاکهای منطقه، محیط مناسب بودن خاک منطقه برای رقیق سازی کمپلکس های سیانیدی، تجزیه و تخریب آنها و نیز تجزیه خود سیانید می باشد و از طریق اختلاط مداوم باطله های عمقی و سطحی می توان شدت تجزیه را افزایش داد. در این راستا می توان با افزودن کامپوستها (بقایای حاصل از سوزاندن زباله های شهری) و یا سایر ترکیبات آلی ارزان قیمت

کمپلکس‌های آن به درون آبهای زیرزمینی، دیگر امکان تجزیه وجود ندارد و آب براحتی سیانید و سایر آلاینده‌ها را منتقل خواهد کرد.

به پسماندهای جامد سد باطله، این کار را انجام داد، چرا که نیمه عمر سیانید پایین بوده و در خاک زودتر می‌تواند تجزیه شود، در غیر این صورت، چون جذب سیانید در خاک کم است، در اثر نشت سیانید و

جدول (۵): نتایج آنالیز خاک منطقه موته.

ردیف	عمق (متر)	درصد اشباع (SP)	هدایت الکتریکی ( $Ec \cdot 10^{-2}$ )	اسیدیته کل (%)	درصد مواد خنثی شونده	کربن آلی (OC) (%)	میزان رس (%)
۱	(۰-۳۰)	۲۰	۰/۶۲	۷/۷	۴۰/۵	۱۶	۱۵
۲	(۰-۳۰)	۲۷	۴/۴	۸/۲	۴۴	۱۹	۲۱
۳	(۰-۳۰)	۲۶	۱/۷	۷/۷	۲۵	۱۹	۱۵
۴	(۰-۳۰)	۲۱	۰/۶	۷/۸	۲۷/۵	۱۹	۱۱

جدول (۶): حجم محلول‌های خروجی ستون‌های لیچ در زمان‌های مختلف و نتایج تیتراسیون سیانید در آنها

نوع خاک

ردیف	زمان‌های مختلف پس از شروع لیچینگ (ساعت)	رس ۱		رس ۲		بتونیت	
		غلظت سیانید در خروجی (mg/l)	حجم خروجی (ml)	غلظت سیانید در خروجی (mg/l)	خروجی حجم (ml)	غلظت سیانید در خروجی (mg/l)	خروجی حجم (ml)
۱	۸	۲۶۹/۲۲	۹۳	۲۶۸/۸۲	۹۶	۲۶۸/۳۹	۸۵
۲	۱۶	۲۶۹/۴۷	۹۷	۲۶۸/۹۹	۱۰۵	۲۶۸/۵۴	۹۴
۳	۲۴	۲۶۹/۵۹	۹۱	۲۶۹/۱۷	۱۰۰	۲۶۸/۷۵	۸۸
۴	۳۶	۲۶۹/۷۱	۸۴	۲۶۹/۲۸	۸۷	۲۶۸/۷۶	۹۳
۵	۴۸	۲۶۹/۷۷	۷۷	۲۶۹/۳۰	۷۹	۲۶۸/۷۶	۷۲
۶	۷۲	۲۶۹/۷۰	۶۳	۲۶۹/۳۰	۶۸	۲۶۸/۷۶	۶۰
۷	۹۶	۲۶۹/۸۱	۵۷	۲۶۹/۷۸	۶۶	۲۶۹/۱۲	۵۴
۸	۱۲۰	۲۷۰	۵۶	۲۶۹/۸۴	۶۱	۲۶۹/۶۶	۵۱
۹	۱۴۴	۲۷۰	۵۱	۲۷۰	۵۸	۲۶۹/۸۹	۴۶
۱۰	۱۶۸	۲۷۰	۴۰	۲۷۰	۴۳	۲۷۰	۳۸
۱۱	۱۹۲	۲۷۰	۳۱	۲۷۰	۳۳	۲۷۰	۳۸
۱۲	۲۱۶	۲۷۰	۲۵	۲۷۰	۲۷	۲۷۰	۲۱



- [۹] EPA Chemical Profile, *Chemical Identity Sodium Cyanide (NaCN)*, 25 Mar 2002
- [۱۰] Frant. M.S, J.W. Ross and J.H. Risemen, *Electrode indicator technique for low levels of cyanide*. Anal. Chem. **44** (1972) p. 2227.
- [۱۱] Lordi DT, Lue-Hing, whitebloom SW, Kelada), Dennison S. *cyanide problems in municipal waste water treatment plants*. J water pollut control, 1980.
- [۱۲] M. Gordon and J.F. Porter, *Cyanide destruction on trickling filters*. Proceedings of the 10th Industrial Waste Conference, Purdue University (1997) p. 186
- [۱۳] Mitsuo, Matsumara, Thoshinori, Kojima, Journal of Hazardous Materials, *Elution and Decomposition of Cyanide in Soil Contaminated With Various Cyanocompounds*, pp (99-110), B97, 2003
- [۱۴] Moussavi M. and Shanmuga sundarams., *Thermal decomposition of cyanide waste*. Plat. Surf. University of Newcastle upon Tyon, (5-7) July (1982).
- [۱۵] Scott, J.S, *An Overview of Cyanide Treatment Method for Gold Mill Effluents*, In proc. Conf, on Cyanide and The Environ. Tucson, Az., Dec .11-14 P (300-309), (2002)
- [۱۶] Walker, Simon, *Gold from the Mine – Crops from the Tailing Pond*, EBMJP (8-20). , (2002)
- [۱] امیری، فریبا؛ اندازه‌گیری و حذف سیانید در پساب های آبکاری؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۷۶.
- [۲] جلالی، سپیده؛ اندازه‌گیری سینتیکی مقادیر ناچیز سیانید به روش اسپکتروفتومتری؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۷۶
- [۳] معینیان، خلیل‌الله؛ مطالعه حذف سیانید از پساب صنایع آبکاری الکتریکی حاوی کمپلکس‌های سیانید با فلزات، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۲
- [۴] نقیب‌زاده، مرتضی؛ اندازه‌گیری سیانید در پساب های صنعتی ذوب آهن به روش اسپکتروفتومتری؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، ۱۳۷۸
- [۵] American Publish Health Association, *Standard Methods for examination of water and waste water*, Nineteenth, ed, DC, 1999.
- [۶] Botz. M, Stevenson. J, *Cyanide recovery and destruction*. Engineering and mining Journal. 44-47 (June) (1995)
- [۷] Bouwer.H MC Graw – Hill, *Groundwater hydrogeology*, New York. 1979
- [۸] Environmental Protection Agency, *Decomposition and Transport Modeling in Contaminated Water and Soil*, Http://www.Epa.Gov\Cyanide 2002.