Journal of Health

Vol. 10, No. 2, Summer 2019, 169-178

Removal of Heavy Metals from Urban Sewage Sludge Using *Acidophilic Thiobacillus ferrooxidans*

Azhdarpoor A*[1], Hoseini R[2], Dehghani M[1]

1. Associate Professor, Department of Environmental Health, School of Health, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
2. MA student of Environmental Health Engineering, Shiraz University of Medical Sciences, Shiraz, Iran
**** Corresponding author.*** Tel: +987137251001, Fax: +987137260225, E-mail: azhdarpoor@sums.ac.ir

Received: Jan 28, 2018 Accepted: Oct 11, 2018

ABSTRACT

Background & objectives: The presence of heavy metals in urban sewage sludge limits its use as a soil modifier. The purpose of this study was to remove heavy metals (Cu, Zn, Cd and Pb) from urban sewage sludge using *Acidophilic Thiobacillus ferrooxidans* bacteria.

Methods: In this experimental study, the sludge samples were collected from Shiraz wastewater treatment plant. Bioleaching tests were carried out in 250 ml flasks containing 100 ml fresh sludge, 15 ml *Acidophilic Thiobacillus ferrooxidans* bacteria and 1-4 g/L Fe^{+2} at temperature of 28 °C and speed of 180 rpm for 9 consecutive days. Heavy metal removal was monitored by polarograph.

Results: The optimum condition for separation of heavy metals in this method was obtained at retention time of 5 days and iron concentration of 2gr/l. Under this condition, 80% of cadmium, 78% of lead, 87% of zinc and 69.9% of copper were removed from sludge. Also, sludge dewatering was increased up to 99%. The residual concentrations of zinc, cadmium, lead and copper in sludge after bioleaching were 783, 1, 18 and 607 mg/kg, respectively, which were within the EPA's standards for agriculture.

Conclusion: The results showed that the bioleaching method by *Thiobacillus* bacterium could be used as a suitable method for removal of heavy metals and increasing sludge dewatering efficiency.

Keywords: Bioleaching; *Thiobacillus ferrooxidans*; Sewage Sludge; Heavy Metals

جداسازی فلزات سنگین از لجن فاضلاب شهری با استفاده از باکتری *اسیدو تیوباسیلوس فرواکسیدانت*

ابوالفضل اژدرپور[1]*، ربیعه حسینی[2]، منصوره دهقانی[1]

۱. دانشیار گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز
۲. کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شیراز
* نویسنده مسئول. تلفن: ۰۷۱۳۷۲۵۱۰۰۱ فاکس: ۰۷۱۳۷۲۶۰۲۲۵ ایمیل: azhdarpoor@sums.ac.ir

چکیده

زمینه و هدف: حضور فلزات سنگین در لجن فاضلاب شهری، استفاده از آن را به عنوان اصلاح کننده خاک محدود می‌کند. هدف از این مقاله امکان حذف فلزات سنگین Cu، Zn، Cd و Pb از لجن فاضلاب شهری با استفاده از باکتری *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانت* بود.

روش کار: در این مطالعه تجربی، نمونه لجن از تصفیه خانه فاضلاب شهر شیراز جمع آوری شد. شستشوی بیولوژیکی لجن در ظروف ۲۵۰ میلی لیتر حاوی ۱۰۰ml لجن تازه، ۱۵میلی لیتر محیط کشت حاوی باکتری *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانت* و آهن با غلظت ۱-٤ gr / l در دمای ۲۸ درجه سانتیگراد و دور ۱۸۰ rpm انجام شد و مقدار حذف فلزات سنگین توسط دستگاه پلاروگراف پایش گردید.

یافته ها: شرایط بهینه برای حذف فلزات سنگین در این روش، زمان ماند ۵ روز و غلظت آهن ۲ gr/l به دست آمد. تحت این شرایط، ۸۰ درصد کادمیوم، ۷۸ درصد سرب، ۸۷ درصد روی و ۶۹/۹ درصد مس از لجن حذف شد. همچنین میزان آبگیری لجن به ۹۹ درصد افزایش یافت. غلظت باقی مانده روی، کادمیوم، سرب و مس در لجن بعد از شستشوی بیولوژیکی به ترتیب ۷۸۳، ۱، ۱۸ و ۶۰۷ میلی گرم بر کیلوگرم بود که در محدوده استانداردهای لازم EPA برای کشاورزی می باشد.

نتیجه گیری: نتایج نشان داد روش شستشوی بیولوژیکی توسط باکتری تیوباسیلوس می تواند به عنوان روشی مناسب برای حذف فلزات سنگین و افزایش کارایی آبگیری لجن کاربرد داشته باشد.

واژه های کلیدی: شستشوی بیولوژیکی، *تیوباسیلوس فرواکسیدانت*، لجن فاضلاب، فلزات سنگین

دریافت: ۹۶/۱۱/۸ **پذیرش:** ۹۷/۷/۱۹

مقدمه

لجن فاضلاب، مخلوطی غیرهمگن از مواد مختلف می‌باشد که با روش‌های مختلفی مانند استفاده در کشاورزی، استفاده در ساختمان، بازیافت، استفاده در صنعت، تولید پلیت‌های قابل احتراق و لندفیل مدیریت می‌شود (۱،۲). کاربرد لجن فاضلاب شهری در زمین‌های کشاورزی، روشی متداول برای دفع لجن می‌باشد که به علت حضور مواد آلی و نوترینت‌هایی مثل نیتروژن، فسفر و پتاسیم برای خاک مفید است (۳). استفاده لجن در زمین کشاورزی باعث بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود. همچنین بافت خاک و ظرفیت نگهداری خاک توسط لجن بهبود می‌یابد و شرایط برای رشد ریشه گیاه فراهم می‌گردد (۲). با این وجود، غلظت زیاد فلزات سنگین سمی، تهدیدی برای بهداشت عمومی می‌باشد (٤). فلز سنگین می‌تواند وارد خاک

شده و سپس به آب‌های زیرزمینی منتقل شود و به علت مقاومت زیست محیطی بالا و غیر قابل تجزیه بودن، در محیط زیست تجمع یابد (۵). بنابراین حذف مناسب فلزات سنگین قبل از کاربرد لجن لازم است. روش‌های مختلفی برای حذف و بازیافت فلزات سنگین از لجن استفاده شده است، این روش‌ها شامل استخراج (۲،۶)، کلرزنی (۲)، الکتروشیمیایی (۷)، تبادل یون (۸) و جداسازی غشایی (۹) می‌باشد. یک روش موثر برای کاهش سمیت فلزات سنگین در لجن فاضلاب، شستشوی بیولوژیکی (بیولیچینگ) است. شستشوی بیولوژیکی یک روش پیش تصفیه اقتصادی، کارا و دوست دار محیط زیست برای حذف فلزات سنگین از لجن فاضلاب می‌باشد. تولید محصولات اسیدی و متابولیسم باکتری‌ها می‌تواند باعث حذف یا اصلاح ترکیبات از لجن فاضلاب در طی شستشوی بیولوژیکی شود (۱۰). مولپاس[1] و همکاران مطالعه ای با هدف تعیین شستشوی بی هوازی بر حذف فلزات انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد در مرحله اول (اسیدی سازی بی هوازی)، ۸۷ درصد روی، ۹٤ درصد نیکل و ۷۳ درصد کادمیوم از لجن آزاد شد. ژانگ و همکاران نیز بر روی اثرات شستشوی بیولوژیکی در میزان حذف کادمیوم و آبگیری لجن مطالعاتی انجام دادند، نتایج نشان داد که پودر سولفور در حذف کادمیوم و افزایش سرعت آبگیری لجن موثر است و ۸۸ درصد کادمیوم را حذف می‌کند (۱۱).

در این مطالعه از باکتری‌های اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس برای حذف فلزات سنگین از لجن فاضلاب در شرایط هوازی استفاده شد. توانایی شیمیولیتوتروفیک باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس در اکسیدکردن سولفات فرو، باعث انتخاب این باکتری در شستشوی بیولوژیکی می‌شود. در واقع گونه‌هایی مانند اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس، Fe^{2+} را به Fe^{+3} اکسید کرده و منجر به تولید H^+ و کاهش pH و انحلال فلزات از لجن می‌شوند (۱۲).

[1] Meulepas

هدف از مطالعه حاضر، بررسی امکان حذف فلزات سنگین مانند Cu، Zn، Cd و Pb از لجن فاضلاب شهری با استفاده از باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس و تعیین ایمن بودن لجن از لحاظ غلظت فلزات سنگین باقی مانده برای استفاده در کشاورزی بود.

روش کار

مواد مورد استفاده

در این مطالعه که از نوع تجربی بود، لجن مورد نیاز از تصفیه خانه فاضلاب شیراز تهیه و پس از انتقال به آزمایشگاه در دمای ٤ درجه سانتیگراد در یخچال نگهداری شد. برای تعیین مقدار فلزات سنگین، از دستگاه پلاروگراف (Metrohm) و برای اندازه‌گیری pH از دستگاه pH متر (Metrohm) استفاده شد. H_2SO_4 (97%) و NaOH یک مولار برای تنظیم pH استفاده شد. محلول استوک فلزات سنگین نیز برای تهیه استانداردهای روی، کادمیوم، سرب و مس تهیه گردید. همه مواد شیمیایی مصرفی دارای درجه مرک آلمان بودند.

میکروارگانیسم و محیط کشت

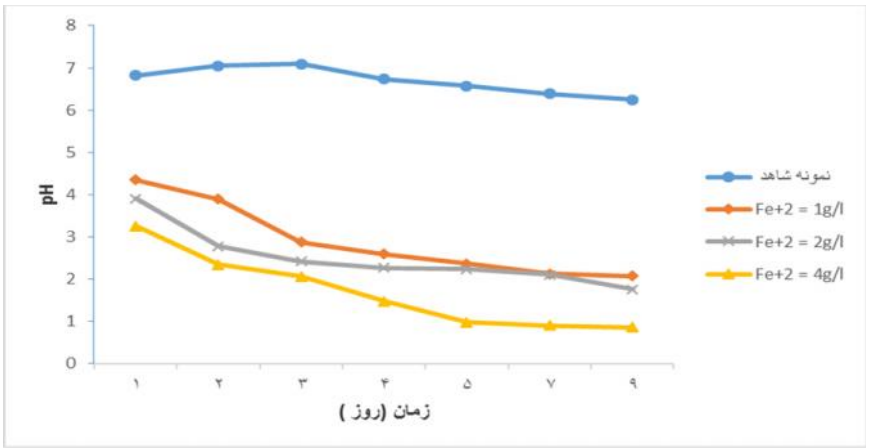
در ارلن‌های ۲۵۰ میلی لیتر، ۱۰۰ سی سی از محیط کشت K ۹ ریخته و به آن ۱۰ میلی لیتر محیط کشت حاوی باکتری اضافه گردید و روی شیکر با سرعت ۱۸۰ rpm اختلاط داده شد. میکروارگانیسم‌ها در محیط کشت K ۹ متشکل از $(NH_4)_2SO_4$ 3.0 g/L؛ KCl 0.1 g/L؛ K_2HPO_4 0.5 g/L؛ $MgSO_4.7H_2O$ 0.5 g/L؛ $Ca(NO_3)_2$ 0.01 g/L؛ $FeSO_4.7H_2O$ 44.22 g/L کشت داده شدند (۱۳). pH محیط کشت بعد از افزودن $FeSO_4.7H_2O$ تا ۲/۵ تنظیم شد. سویه *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس* (PTCC 1647) از سازمان علمی و صنعتی ایران به عنوان سویه بومی تهیه شد.

تطابق باکتری با لجن

تطابق و سازگار کردن باکتری‌ها در لجن شامل دو مرحله متوالی بود. در مرحله اول، ۱۰۰ ml لجن در ارلن ۲۵۰ml ریخته و بعد از افزودن (Fe^{+2} ٤ g/l)، ml ۱۵ محیط کشت حاوی باکتری، به آن اضافه شد و در دمای ۲۸ درجه و ۱۸۰ rpm روی شیکر قرار گرفت. وقتی pH به حدود ۲ رسید، دوباره به ۱۰۰ ml لجن تازه که به آن آهن اضافه شده بود، ۱۵ cc از لجنی که مرحله تطابق اول را طی کرده بود، اضافه شد. آزمایشات شستشوی بیولوژیکی به مدت ۹ روز در ارلن‌های ۲۵۰ ml و با افزودن ۱۰۰ ml لجن تازه، ۱۵ml باکتری تطابق یافته و Fe^{+2} در غلظت‌های ٤gr/l-۱ در دمای ۲۸ درجه سانتیگراد و با سرعت ۱۸۰rpm انجام شد. تعداد نمونه‌های مورد آزمایش لجن در این مطالعه حدود ۷۲ نمونه با دو تکرار بود. برای اندازه گیری فلزات لجن، ابتدا نمونه‌های خشک شده را پودر کرده و ۲۵۰ میلی گرم از نمونه (بر اساس وزن خشک) به دقت وزن شده و درون بوته چینی ریخته شد. ٤ میلی لیتر اسید سولفوریک ۹۶ درصد به آن اضافه کرده و مخلوط تا دمای ۲۰۰ درجه سانتی گراد حرارت داده شد. وقتی تمام آب تبخیر شده و رنگ مخلوط به رنگ قهوه ای تبدیل شد، ۱ میلی لیتر پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد به آن اضافه شد. بعد از سرد شدن کروزه، مخلوط باقیمانده را با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی لیتر رسانده و مقداری از این نمونه هضم شده برای تعیین فلزات سنگین برداشته می‌شود. برای اندازه‌گیری فلزات سنگین از دستگاه پلاروگراف (Metrohm) و با روش آنالیز شماره 113/2 e مقدار فلزات سنگین اندازه‌گیری شدند (۱٤).

یافته‌ها

تغییرات pH با زمان در طی فرایند شستشوی بیولوژیکی در نمونه حاوی باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس و سولفات فرو در غلظت‌های مختلف به عنوان منبع انرژی و نیز در نمونه کنترل (بدون افزودن آهن و باکتری) در نمودار ۱ نشان داده شده است. همان طور که از نمودار مشخص است، با افزایش غلظت آهن در نمونه‌ها از ۱ به ٤ گرم بر لیتر، روند کاهش pH سریع تر بود. در نمونه کنترل بدون باکتری تیوباسیلوس، در طی ۹ روز، pH به طور بسیار ناچیزی از ۶/۸۲ به ۶/۲۵ کاهش داشت. این نشان‌دهنده تولید اسید کمتر است، چون هیچ فعالیت میکروبی و هیچ منبع انرژی برای حمایت از رشد باکتری‌های موجود در لجن تامین نشده است. در لجن حاوی Fe^{+2} ۲ gr/l و ۱۵ ml باکتری، در طی ۲ روز، pH به سرعت از ۶/۸ به ۲/۷ کاهش پیدا کرد، سپس در طی ۹ روز به آهستگی به ۱/۷۵ کاهش یافت.



نمودار ۱. تغییرات pH با تغییر غلظت آهن در حین فرایند شستشوی بیولوژیکی با اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانت

در نمودارهای۲ (الف، ب و ج) تاثیر غلظت‌های مختلف آهن بر کارایی حذف فلزات سنگین از لجن نشان داده شده است. همان طور که از نمودارها مشخص است، با افزایش زمان شستشوی بیولوژیکی تا ۵ روز، در هر سه غلظت Fe^{+2}، راندمان حذف فلزات افزایش قابل توجه و از زمان ۵ روز تا ۹ روز، افزایش جزئی و یا کاهش داشت. در غلظت ۱، ۲ و ٤ gr/l Fe^{+2} در زمان ٢٤ ساعت، میزان حذف روی (۳۶/۵، ۶۸/۷ و ۷۲ درصد)، کادمیوم (۲۰، ۲۱/۵ و ۸٤/۷ درصد)، سرب (۱۵/٤، ۱۲ و ٤/۸ درصد) و مس (۱۲/۵، ٤۰/۳ و ۵۸/۶ درصد) و در روز ۵ میزان حذف روی (۷۷/۳، ۸۷/۱ و ۸۵/۳ درصد)، کادمیوم (۶۹/۳، ۸۰/۷ و ۹۹/۶ درصد)، سرب (۶۸/۵، ۷۷/۹ و ۷۵/۸ درصد) و مس (۷٤، ۶۹/۹ و ٦٤/۹ و در روز ۹ به ترتیب روی (۸۱، ۹۰/۳ و ۸۵/۸ درصد)، کادمیوم (۷۷/۳، ۹۳ و ۹۹ درصد)، سرب (۸۲/۷، ۹۱/۱ و ۸۱/۳ درصد) و مس (۷۳/۳، ۷۱/۲ و ٦٤/۷ درصد) بود.

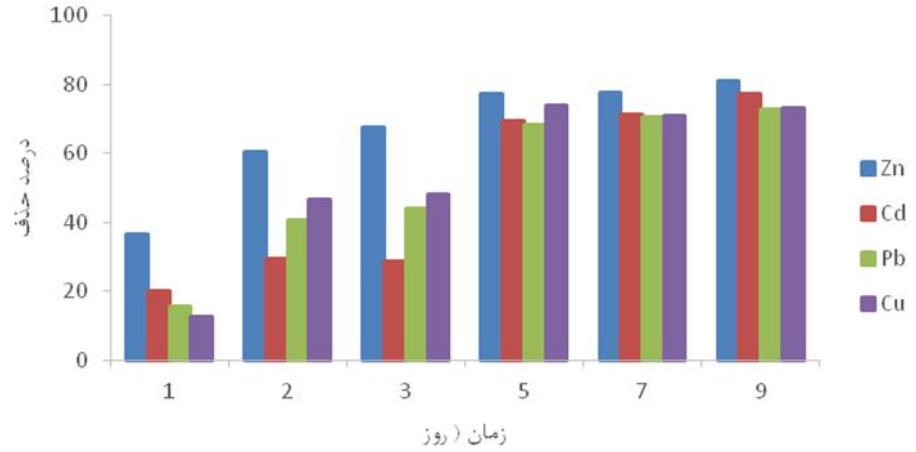
برای غلظت‌های آهن ۱، ۲ و ٤ gr/l، میزان pH در روز ۱ به ترتیب ٤/۳، ۳/۹ و ۳/۲ بود. در غلظت آهن ۱gr/l، کمترین راندمان حذف برای روی، کادمیوم و مس مشاهده شد. تنها در مورد سرب، غلظت ۱gr/l در روز اول، راندمان حذف بیشتری را نشان داد. نتایج به دست آمده از غلظت‌های ۲ و ٤ mg/l آهن نیز نشان داد که تا روز سوم، بیشترین میزان حذف مربوط به ٤mg/l Fe^{+2} بود، ولی بعد از این زمان pH به زیر ۱/۵ می‌رسد و راندمان حذف کاهش می‌یابد و نتایج روزهای ۳، ۵، ۷ و ۹ راندمان بالاتری را در غلظت آهن ۲mg/l نشان داد.

اگرچه، با افزایش غلظت Fe^{+2}، میزان حذف کادمیوم افزایش قابل توجهی داشت؛ به طوری‌که میزان حذف کادمیوم در زمان ٢٤ ساعت در غلظت‌های آهن ۱و ۲g/l حدود ۲۰ درصد بود و در غلظت ٤g/l، میزان حذف به ۸٤/۷ درصد رسید. علاوه بر این، چنانکه از نمودار ۳-۲ مشخص است، سرعت حذف فلزات در روزهای اول شستشوی بیولوژیکی زیاد است و با افزایش زمان سرعت حذف آهسته‌تر شده و یا در مورد مس سرعت حذف کاهش می‌یابد. از نتایج به‌دست آمده می‌توان این نتیجه را گرفت که غلظت آهن ۲mg/l و زمان ۵ روز برای فرایند شستشوی بیولوژیکی، مقدار بهینه است و تحت این شرایط ۸۷/۱ درصد روی، ۸۰/۷ درصد کادمیوم، ۷۷/۹ درصد سرب و ۶۹/۹ درصد مس از لجن حذف شد.

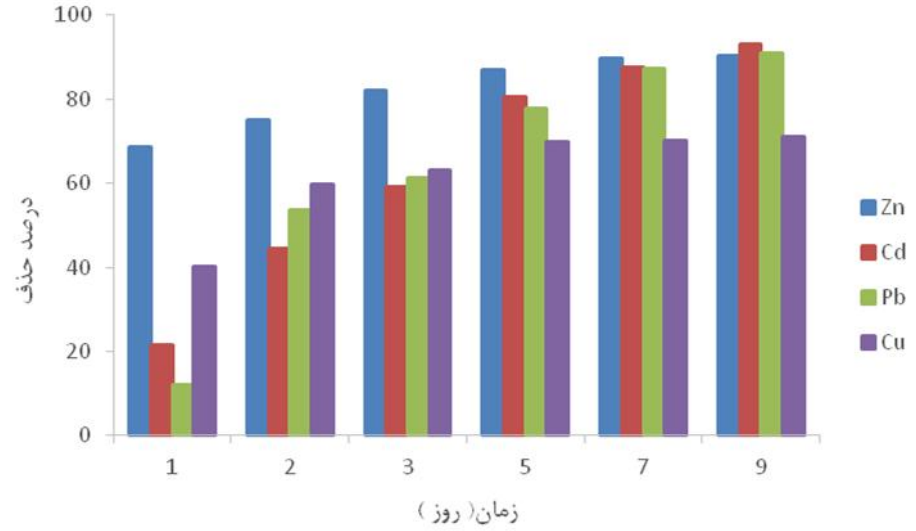
نمودار ۳ اثر شستشوی بیولوژیکی در حذف TSS، VSS، SCOD و قابلیت آبگیری لجن را طی ۹-۱ روز نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که تیوباسیلوس فرواکسیدانس قادر است تا به سرعت باعث اسیدی شدن لجن و همچنین آبگیری لجن بعد از ۲-۱ روز گردد. بر طبق شکل، بعد از ۲ روز از تصفیه با تیوباسیلوس فرواکسیدانس، بیش ترین کاهش TSS، VSSو SCOD لجن در غلظت ۲ گرم بر لیتر Fe^{2+}، به ترتیب ۳۳، ۳۷ و ۷۲ درصد بود. میزان آبگیری لجن نیز به ۹۹ درصد افزایش پیدا کرد.

جدول ۱. حداکثر مقدار مجاز توصیه شده EPA برای فلزات سنگین در لجن

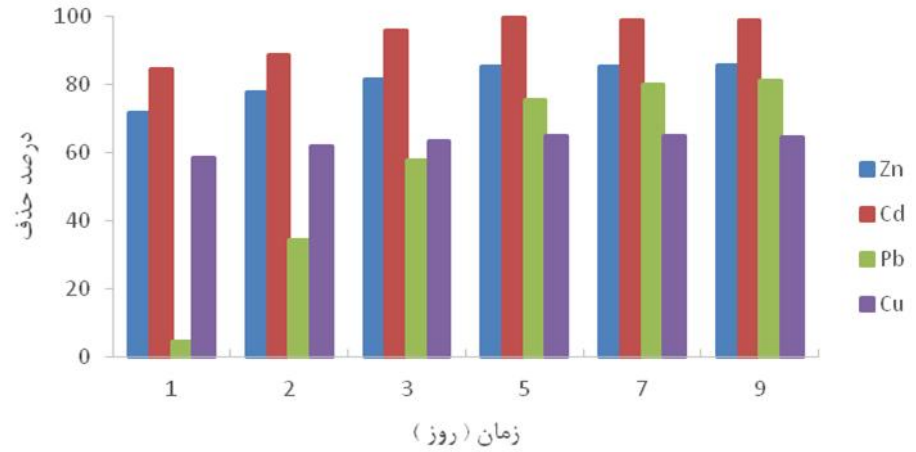
فلز سنگین	غلظت mg Kg-1
کادمیوم	۳۹
مس	۱۵۰۰
سرب	۳۰۰
روی	۲۸۰۰



(الف)

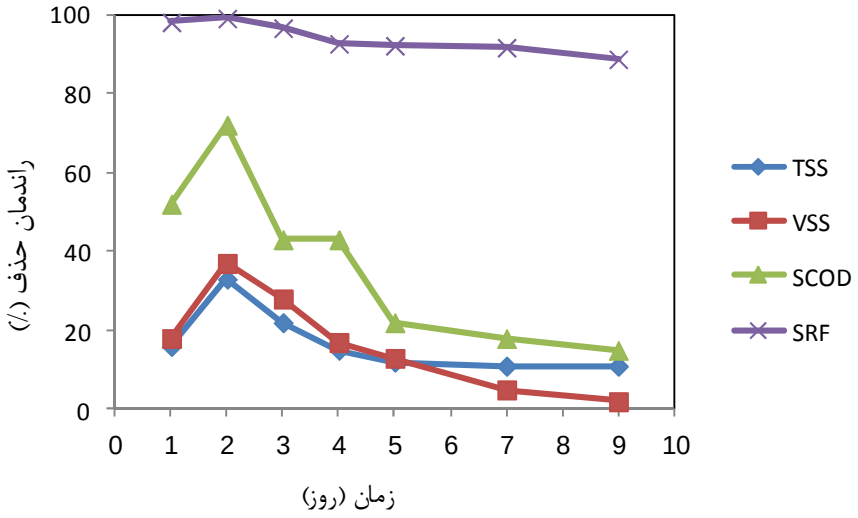


(ب)



(ج)

نمودار ۲. حذف فلزات سنگین از لجن فاضلاب شهری با استفاده از شستشوی بیولوژیکی در مقادیر مختلف آهن (الف= ۱ Fe gr/l)، (ب= ۲ Fe gr / l) و (ج= ٤ Fe gr / l)



نمودار ۳. بررسی تاثیر شستشوی بیولوژیکی جهت حذف SCOD، TSS، VSS و کاهش SRF لجن فاضلاب در غلظت آهن ۲ گرم بر لیتر

بحث

مطابق با نتایج به دست آمده، آهن یکی از پارامترهای مهم در حذف فلزات سنگین از لجن فاضلاب می‌باشد و افزایش غلظت آن می‌تواند باعث افزایش سرعت شستشوی بیولوژیکی لجن شود. همان طور که از نمودار ۱ و ۲ مشخص است، با افزایش غلظت Fe^{+2}، میزان کاهش pH با سرعت بیشتری انجام شد و در زمان کمتر، میزان حذف بیشتری به دست آمد. سولفات آهن که به عنوان منبع انرژی برای باکتری‌ها در مرحله بیولوژیکی استفاده می‌شود، بر میزان انحلال و کارایی حذف فلزات تاثیر می‌گذارد (۱٤). تیوباسیلوس فرواکسیدانس به یون‌های فرو به عنوان منبع انرژی نیاز دارند و از بیواکسیداسیون Fe^{+2}، H^{+} تولید می‌شود که باعث کاهش pH و آزادشدن فلزات از لخته‌های لجن می‌شود (۱۵). pH نیز یکی از پارامترهای مهم تاثیرگذار بر انحلال فلزات سنگین متصل به لجن در طی شستشوی بیولوژیکی است. همچنین کاهش pH در طی شستشوی بیولوژیکی می‌تواند بیانگر فعالیت باکتری‌های اکسیدکننده آهن باشد (۱۶).

در غلظت‌های بالای یون فرو، محلولی جامد به نام کوپیاپیت، بین یون فرو و فریک ایجاد می‌شود که احتمالاً این ترکیب، نقش کاتالیزوری آهن را ضعیف می‌کند (۱۷). علاوه براین، شرایط بهینه برای رشد اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس در pH ۲/۵-۳/۵ است، با این حال این باکتری قادر است که pH کمتر از ۲ را تحمل کند (۱۸) و این احتمال وجود دارد که با کاهش شدید pH در غلظت ٤mg/l، رشد این باکتری کاهش یافته و بنابراین راندمان کاهش پیدا کند.

کارایی روش‌های مختلف در حذف فلزات سنگین به شکل (فرم) شیمیایی فلزاتی که در لجن وجود دارند، وابسته است. معمولاً فلزاتی که در لجن حضور دارند در شکل‌های سولفیدی، اکسیدی، هیدروکسیدی، سیلیکاتی و همچنین متصل به مواد آلی هستند (۸). فلزات سنگین در بخش‌های قابل تبادل، متصل به کربنات‌ها و اکسیدهای آهن و منگنز متحرک و در دسترس بیولوژیک هستند، در حالی که فلزات موجود در بخش‌های باقی‌مانده (سیلیکاته)، متصل به مواد آلی و سولفیدی نسبتاً پایدار بوده و در دسترس بیولوژیک قرار ندارند (۱۹). شستشوی بیولوژیکی اثر کمی بر فلزات موجود در بخش‌های باقی مانده دارد، زیرا که فلزات در شکل باقی مانده عمدتاً به ساختارهای مشبک پایدار متصل هستند و شرایط اسیدی تولیدشده فرصت کافی برای واکنش با آن‌ها

را ندارد (۷). از آنجایی که Zn یکی از ناپایدارترین فلزات است، راندمان بالای حذف در طی شستشوی بیولوژیکی برای آن قابل انتظار است. قبل از شستشوی بیولوژیکی Zn عمدتاً در اشکال متصل به مواد آلی و رسوب کربناته حضور دارد که باعث می‌شود این فلز پتانسیل تحرک زیادی داشته باشد (۷). اگرچه در پایان آزمایش، اغلب Zn در شکل باقی مانده حضور دارد که این موضوع را نشان می‌دهد که یون‌های تفکیک پذیر Zn از بخش‌های آلی سولفیدی و متصل به کربنات‌ها به خارج از لجن منتقل شده‌اند (۲۰). نتایج نشان داد که بیش از ۶۸ درصد Zn موجود در لجن بعد از ۲٤ ساعت شستشوی بیولوژیکی با غلظت آهن mg/l ۲ حل شد و به کارایی حذف تقریباً ۹۰ درصد در نهمین روز شستشوی بیولوژیکی رسید، اگرچه تنها ۲۳ درصد از کل Zn در پایان آزمایش از نمونه کنترل حذف شد. حذف Zn به pH محیط شستشوی بیولوژیکی وابستگی زیادی دارد، زیرا انتشار زیاد Zn همراه با کاهش pH در روزهای اولیه شستشوی بیولوژیکی مشاهده شد. در مقایسه با سایر فلزات، بیشترین انحلال برای روی به دست آمد.

مس عمدتاً در بخش قابل اکسید شدن حضور دارد و تمایل زیادی به اتصال با مواد آلی و سولفیدهای فلزی دارد (۲۱،۲۲). نتایج بررسی‌ها نشان داد که افزایش شدید در انحلال Cu در ۲ روز اول شستشوی بیولوژیکی مشاهده شد و سپس تا پایان دوره شستشوی بیولوژیکی به تدریج میزان انحلال افزایش داشت. میزان انحلال Cu در روز دوم شستشوی بیولوژیکی تقریباً ۶۰ درصد و در روز ۹، میزان انحلال به ۷۱ درصد رسید. مطالعات ویلار و همکاران نیز نشان داده که pH انحلال آستانه برای مس ۳-۲ است و آن‌ها نیز فاز تاخیری ۲ روز را برای مس گزارش کرده اند (۲۳). آزمایش کنترل فقط ۳۰ درصد انحلال Cu در پایان آزمایش را نشان داد. حذف Cu می‌تواند به علت هضم مواد آلی تحت شرایط اسیدی تولیدشده در طی شستشوی بیولوژیکی باشد. انحلال Cu، مخصوصاً رسوب سولفیدی Cu، به فعالیت اکسیداسیون اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس نیز وابسته است (۷). کاهش در کارایی حذف Cu با زمان ناشی از جذب دوباره Cu محلول توسط لجن جامد و یا ترکیب بین Cu محلول و ترکیبات آلی در لجن است (۲٤).

سرب در لجن عمدتاً در بخش باقی مانده حضور دارد (۲۵). نتایج این بررسی نشان داد که در غلظت mg/l ۲ آهن، میزان حذف Pb در روز اول ۱۲درصد بود که نسبت به سه فلز دیگر با شرایط مشابه، کمترین مقدار را داشت. با افزایش زمان میزان انحلال Pb افزایش پیدا کرد و در روز آخر شستشوی بیولوژیکی به ۹۱ درصد رسید. در مقایسه با سایر فلزات سنگین، کادمیوم و ترکیبات آن، نسبتاً قابل حل‌شدن هستند و بنابراین متحرک‌تر بوده و بیشتر در دسترس بیولوژیکی قرار می‌گیرند (۲۶)، بنابراین حذف آن از لجن اهمیت زیادی دارد. بررسی‌ها نشان داد که در غلظت آهن ۲mg/l در روز اول شستشوی بیولوژیکی ۲۰ درصد و در روز سوم ۵۹/۲ درصد کادمیوم از لجن حذف شد و در روز آخر شستشوی بیولوژیکی، میزان حذف به ۹۳ درصد رسید. آزمایش کنترل فقط ۳۳ درصد انحلال Cd در پایان آزمایش را نشان داد. مطالعات ژانگ و همکاران نشان داد که در فرایند شستشوی بیولوژیکی، وقتی به طور همزمان پودر گوگرد g/L ۵ و سولفات فرو g/L ۱۵ به عنوان سوبسترا در محیط حضور دارند، کارایی حذف Cd ۸۸/۶ درصد می‌باشد (۱۱).

یکی از کاربردهای لجن شهری، استفاده از آن به عنوان اصلاح‌کننده خاک می‌باشد که به دلیل داشتن مواد مغذی، منبع مناسبی برای خاک می‌باشد. در جدول ۱ مقدار مجاز فلزات سنگین در لجن نشان داده شده است. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بعد از شستشوی بیولوژیکی تحت شرایط بهینه، غلظت باقی‌مانده فلزات روی، کادمیوم، سرب و مس در لجن به ترتیب ۷۸۳، ۱، ۱۸ و ۶۰۷ میلی گرم بر

کیلوگرم می‌باشد که در محدوده استانداردهای EPA برای استفاده در زمین کشاورزی می‌باشد (۶).

نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر روش شستشوی بیولوژیکی در جداسازی و انحلال فلزات سنگین از لجن فاضلاب شهری بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش غلظت آهن در لجن، مقدار pH با کاهش محسوسی مواجه می‌شود و شرایط لازم برای رشد بیشتر باکتری تیوباسیلوس را فراهم نموده و باعث انحلال و جداسازی فلزات از بافت آلی لجن می‌شود. در روش شستشوی بیولوژیکی با استفاده از باکتری اسیددوست تیوباسیلوس فرواکسیدانس با استفاده از آهن به عنوان منبع انرژی و زمان ۵ روز، حدود ۸۷-۷۰ درصد فلزات سنگین از لجن جدا شد و استانداردهای لازم برای کاربرد لجن برای کود کشاورزی تامین گردید.

تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان نامه کارشناسی ارشد به شماره طرح ۷۴۱۳-۹۵ با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی شیراز مستخرج شده است. نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی و پشتیبانی این دانشگاه تشکر نمایند.

References

1- Xu Y, Zhang C, Zhao M, Rong H, Zhang K, Chen Q. Comparison of bioleaching and electrokinetic remediation processes for removal of heavy metals from wastewater treatment sludge. Chemosphere 2017; 168: 1152-1157.
2- Pathak A, Dastidar MG, Sreekrishnan TR .Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review. Journal of Environmental Management. 2009;90 2343-2353.
3- Tang J, He J, Liu T, Xin X, Hu H. Removal of heavy metal from sludge by the combined 0treatment. Chemosphere 2017;189 599-608.
4- Yuan X, Leng L, Huang H, Chen X, Wang H, Xiao Z, Zhai Y, Chen H, Zeng G. Speciation and environmental risk assessment of heavy metal in bio-oil from liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. Chemosphere 2015;120:645-652.
5- Suanon F, Sun Q, Dimon B, Mamad D, Chang-PingYu. Heavy metal removal from sludge with organic chelators: Comparative study of N, N-bis(carboxymethyl) glutamic acid and citric acid. Journal of Environmental Management. 2016;166:341-347.
6- Azhdarpoor A, Hoseini R, Dehghani M. Leaching Zn, Cd, Pb, and Cu from Wastewater Sludge Using Fenton Process. J Health Sci Surveillance Sys. 2015;3(4):153-159.
7- Chen Y-X, Hua Y-M, Zhang S-H, Tian G-M. Transformation of heavy metal forms during sewage sludge bioleaching. Journal of hazardous materials. 2005;123(1):196-202.
8- Pathak A, Dastidar M, Sreekrishnan T. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge: A review. Journal of environmental management. 2009;90(8): 2343-2353
9- Peng G, Tian G, Liu J, Bao Q, Zang L. Removal of heavy metals from sewage sludge with a combination of bioleaching and electrokinetic remediation technology. Desalination. 2011;271: 100–104.
10- Chen Z, Hu M, Cui B, Liu S, Guo D, Xiao B. The effect of bioleaching on sewage sludge pyrolysis. Waste Management. 2016;48: 383–388.
11- Zhang Z, Wu Y, Liu Y-y, Liu Y. Effects of bioleaching on removal rate of cadmium and dewatering property from dredged sludge [J]. China Environmental Science. 2013;4: 1-6
12- Fontmorin J-M, Sillanpää M. Bioleaching and combined bioleaching/Fenton-like processes for the treatment of urban anaerobically digested sludge: Removal of heavy metals and improvement of the sludge dewaterability. Separation and Purification Technology. 2015; 156: 655-664.

13- Bajestani MI, Mousavi SM, Shojaosadati SA. Bioleaching of heavy metals from spent household batteries using Acidithiobacillus ferrooxidans: Statistical evaluation and optimization. Separation and Purification Technology 2014;132:309–316.
14- Babel S, Dacera DdM. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review. Waste Management 2006;26:988–1004.
15- Wonga JWC, Zhou J, Kurade MB, Murugesan K. Influence of ferrous ions on extracellular polymeric substances content and sludge dewaterability during bioleaching. Bioresource Technology 2015;179 78–83.
16- Liu F, Zhou L, Zhou J, Song X, Wang D. Improvement of sludge dewaterability and removal of sludge-borne metals by bioleaching at optimum pH. Journal of Hazardous Materials 2012;221-222:170-177.
17- Basciano LC. Crystal chemistry of the jarosite group of minerals-solid solution and atomic structures. Queen's Unive, Kingston, Ontario, Canada: 2008.
18- Mandal T, Dasgupta D, Mandal S, Datta S. Treatment of leather industry wastewater by aerobic biological and Fenton oxidation process. Journal of hazardous materials. 2010;180(1):204-211.
19- Chen S-Y, Lin J-G. Bioleaching of heavy metals from livestock sludge by indigenous sulfur-oxidizing bacteria: effects of sludge solids concentration .Chemosphere. 2004;54(3):283-289.
20- Peng G, Tian G, Liu J, Bao Q, Zang L. Removal of heavy metals from sewage sludge with a combination of bioleaching and electrokinetic remediation technology. Desalination. 2011;271(1):100-104.
21- Wang C, Hu X, Chen M-L, Wu Y-H. Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants. Journal of Hazardous Materials. 2005;119(1):245-249.
22- Pathak A, Kothari R, Dastidar M, Sreekrishnan T, Kim DJ. Comparison of bioleaching of heavy metals from municipal sludge using indigenous sulfur and iron-oxidizing microorganisms: Continuous stirred tank reactor studies. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2014;49(1):93-100.
23- Villar LD, Garcia Jr O. Solubilization profiles of metal ions from bioleaching of sewage sludge as a function of pH. Biotechnology letters. 2002;24(8):611-614.
24- Xiang L, Chan LC, Wong JWC. Removal of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge by isolated indigenous iron-oxidizing bacteria. Chemosphere 2000;41:283-287.
25- Liu J-y, Sun S-y. Total concentrations and different fractions of heavy metals in sewage sludge from Guangzhou, China. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2013;23(8): 2397-2407.
26- Ottosen LM, Pedersen AJ, Hansen HK, Ribeiro AB. Screening the possibility for removing cadmium and other heavy metals from wastewater sludge and bio-ashes by an electrodialytic method. Electrochimica acta. 2007;52(10):3420-3426.