

Investigating the possibility of iron recovery from water treatment plant sludge with planetary ball mill and acid digestion process

Sara Maleki Ganji¹, Mohsen Saadani^{1*} , Seyed Nadali Alavi Bakhtiarvand¹ 

1- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

Background and Aims: Both the number of water treatment plants and their sludge volume increases by population. Considering the presence of high amounts of valuable coagulants in water treatment plant sludge, its recovery and reuse is sought to be one of the practical and cost-effective solutions for sludge management in water treatment plants.

Materials and Methods: Iron sludge was collected from the sludge dryer bed of Jalaliyeh water treatment plant in Tehran. A planetary mill device was used to prepare samples and to investigate the effect of mechanochemical process on sludge recovery as an Iron based coagulant. XRD, XRF, TEM, MP-AES tests were performed on the sludge sample before and after the mechanochemical process. Ethical considerations were observed in all stages of the study.

Results: The results of this study showed that the use of a planetary mill leads to more recovery of iron, so that at 1 N acid concentration, iron recovery increases from 23.5% in the unmilled sludge sample to 60.5% in the milled sludge. Phase and chemical structure changes of sludge after planetary mill were clearly visible in XRD analysis.

Conclusion: The results showed that by combining mechanochemical and acid digestion, it is possible to significantly improve ferric chloride recovery in terms of acid consumption and final product quality; so that the iron based final product could be used for industrial wastewater treatment.

Keywords: Recovery, Sludge, Water treatment plant, Mechanochemical, Acid digestion

Please Cite this article as: Maleki Ganji S, Saremi M, Khodakarim S, Maleki-Ghahfarokhi A. Investigating the possibility of iron recovery from water treatment plant sludge with planetary ball mill and acid digestion process. Journal of Health in the Field 2023; 11(1):7-16.

Corresponding Author: Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Shahid Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

Email: m.sadani@sbmu.ac.ir

DOI: <https://doi.org/10.22037/jhf.v11i1.42424>

Received: 10 June 2023

Accepted: 23 July 2023

بررسی امکان بازیابی آهن از لجن تصفیه‌خانه آب با استفاده از آسیاب سیاره‌ای و فرایند هضم اسیدی

سارا ملکی گنجی^۱، محسن سعدانی^{۱*}، سید نادعلی علوی بختیاروند^۱

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

زمینه و اهداف: با افزایش جمعیت تعداد تصفیه‌خانه‌های آب و حجم لجن تولیدی حاصل از آن‌ها هم زیاد می‌شود. با توجه به وجود مقادیر بالایی از مواد منعقدکننده در آن، بازیابی و استفاده مجدد از لجن تصفیه‌خانه آب یکی از راهکارهای عملیاتی و مقرون به صرفه جهت مدیریت لجن تصفیه‌خانه آب است.

مواد و روش‌ها: لجن آهن از بستر لجن خشک‌کن تصفیه‌خانه آب جلالیه تهران جمع‌آوری شد. از دستگاه آسیاب سیاره‌ای به منظور بررسی تعیین اثر فرایند مکانوشیمیایی بر بازیابی آهن از لجن تصفیه‌خانه آب استفاده شد. تست‌های تکمیلی XRD، XRF، TEM، MP-AES از نمونه لجن تصفیه‌خانه آب قبل و بعد از فرایند مکانوشیمیایی گرفته شد. ملاحظات اخلاقی در تمام مراحل اجرای مطالعه رعایت شد. **یافته‌ها:** نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از آسیاب سیاره‌ای باعث بازیابی بیشتر آهن می‌شود. به طوری که با استفاده از اسید ۱ نرمال میزان بازیابی آهن از ۲۳/۵٪ در نمونه لجن آسیاب نشده به ۶۰/۵٪ در نمونه لجن آسیاب شده، می‌رسد. در نتایج XRD تغییر فاز و ساختار شیمیایی لجن بعد از آسیاب سیاره‌ای کاملاً مشهود بود.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از دو روش، مکانوشیمیایی و هضم اسیدی با هم می‌توان شرایط بازیابی کلروفریک را از نظر میزان اسید مصرفی و کیفیت محصول نهایی تا حد قابل توجهی بهبود داد و در صنعت تصفیه فاضلاب صنعتی استفاده کرد. **کلید واژه‌ها:** بازیابی، لجن، تصفیه‌خانه آب، مکانوشیمیایی، هضم اسیدی

* نویسنده مسئول: گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی، تهران، ایران.

Email: m.sadani@sbmu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۱

مقدمه

با توجه به توسعه تصفیه خانه‌های آب کشور و افزایش حجم لجن تولیدی به دنبال افزایش روز افزون جمعیت و تقاضای مردم برای دسترسی به آب آشامیدنی سالم و بهداشتی، مدیریت لجن به یکی از مسائل مهم زیست محیطی تبدیل شده است. بررسی‌های اخیر هم نشان می‌دهد که میزان لجن تولیدی در تمام تصفیه خانه‌های آب دنیا رو به افزایش است و مدیریت این حجم از لجن هزینه‌های زیادی از مدیریت لجن تصفیه خانه را به خود اختصاص می‌دهد. به طور مثال میزان لجن تصفیه‌خانه آب استرالیا به ۴۳۵۰۰ تن در سال رسیده است و صنعت تصفیه آب انگلستان هم هر ساله به تنهایی بیش از ۳۲۵۰۰۰ تن ماده‌ی منعقدکننده مصرف و بیش از ۱۸۲۰۰۰ تن لجن خشک تولید می‌نماید [۱]. بنابراین بازیابی و استفاده مجدد از مواد منعقدکننده لجن تصفیه خانه‌های آب علاوه بر کاهش ریسک‌های مربوط به دفع لجن، می‌تواند هزینه‌های تأمین منعقدکننده‌ی تازه در تصفیه خانه‌ی آب و یا فاضلاب نیز کاهش دهد [۲].

روش‌های مختلفی جهت بازیابی مواد منعقدکننده وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب خاص خود را دارند. Evuti و همکارانش در سال ۲۰۱۱ طی یک مطالعه مروری به بررسی اهمیت و ضرورت بازیابی مواد منعقدکننده از لجن تصفیه‌خانه آب و انواع روش‌های موجود جهت بازیابی این مواد پرداختند [۳]. آن‌ها از میان انواع روش‌های موجود بازیابی مثل هضم قلیایی، هضم اسیدی، رزین تبادل یونی و فرایند غشایی بازیابی و استفاده مجدد به روش هضم اسیدی را به عنوان بهترین گزینه جهت دفع لجن تصفیه‌خانه گزارش کردند [۴]. بازیابی و استفاده مجدد از مواد منعقدکننده لجن تصفیه‌خانه‌های آب می‌تواند باعث کاهش چشمگیر حجم لجن شود [۵، ۶]، همچنین طی مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۳ با عنوان بازیابی منعقدکننده آلومینیوم با راندمان بالا از لجن تصفیه‌خانه آب به روش هضم اسیدی با کمک اولترا سونیک انجام شد، استفاده از آن به عنوان یک روش عالی جهت به حداقل رساندن معایب روش استخراج اسیدی از نظر تعداد دفعات استخراج، راندمان کم بازیابی و غلظت بالای اسید مورد نیاز پیشنهاد شد [۷]. از این رو استفاده متوالی از دو تکنیک هضم اسیدی و آسیاب سیاره‌ای در کنار هم، معایب هر کدام از روش‌ها

به تنهایی را رفع می‌کند و درصد راندمان بازیابی را افزایش می‌دهد؛ می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که استفاده از یک روش کمکی در کنار هضم اسیدی می‌تواند راندمان بازیابی و انحلال مواد منعقدکننده را بالاتر ببرد. امروزه یکی از روش‌های نوین مورد استفاده برای مدیریت و بازیافت پسماندهای مختلف صنعتی استفاده از روش‌های مکانوشیمیایی بوده که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

فرایند مکانوشیمیایی به عنوان یک تکنیک جدید برای تولید مواد نانو ساختار تعریف می‌شود که برای تولید انواع مختلف نانو کامپوزیت‌ها، ترکیبات آلی و غیر آلی، اکسیدها و ترکیبات بین فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. به تغییرات به وجود آمده در ساختار و خواص شیمیایی مواد تحت تأثیر نیروهای مکانیکی، فعال سازی مکانیکی گویند.

مکانیسم فرایند مکانوشیمیایی به این صورت است که آسیاب گلوله‌ای با انرژی بالا باعث ایجاد تغییرات و واکنش‌های مختلفی در سطح مولکولی مانند بی‌نظمی و آمورفیزیشن (از جمله شکل‌گیری سطح)، بی‌نظمی مرز دانه‌ها و تبدیل شکل آن‌ها می‌شود [۹]. فرایند مکانوشیمیایی با تغییرات فیزیکی و شیمیایی جامدات که در اثر تأثیرات مکانیکی ایجاد می‌شوند، سر و کار دارد. "تأثیرات مکانیکی" اساساً نیروهای برشی و ضربه‌ای هستند که می‌توانند با انواع زیادی از اعمال مانند فشردن، سازی، اصطکاک، آسیاب و غیره اعمال شوند [۱۰]. موادهای گوناگونی با استفاده از پردازش مکانیکی تولید شده اند [۱۱]. Seyedi و همکارانش در سال ۲۰۱۵ در طی تحقیقی که انجام دادند، موفق به سنتز نانوذرات اکسید آهن (Fe_2O_3) در نتیجه واکنش‌های مکانوشیمیایی بین کربنات سدیم (Na_2CO_3) و کلرید آهن هگزاآهیدراته ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) شدند [۱۲]. Zhang و همکارانش در سال ۲۰۱۷ از فرایند آسیاب گلوله‌ای به عنوان یک روش سازگار با محیط زیست جهت بازیابی فلزات ارزشمند از پسماندهای الکترونیکی استفاده کردند [۱۳].

متأسفانه در حال حاضر در کشور ما هیچ قانون مدونی در مورد دفع لجن که دستورالعمل‌های مشخصی داشته باشد، تدوین نشده است. این لجن‌ها تنها به محیط زیست اطراف و یا آبهای سطحی تخلیه می‌شوند [۱۴]. همچنین بازیابی مواد منعقدکننده با

روش‌های معمول مانند اسیدشویی به دلیل مصرف بالای مواد شیمیایی از یک طرف مقرون به صرفه و اقتصادی نبوده و از طرف دیگر می‌تواند آلودگی مواد بازیابی شده به مواد آلی را به همراه داشته باشد [۵،۶]. مواد هیومیک (اسید هیومیک و اسید فولیک)، مهم ترین بخش از مواد آلی را در آب تشکیل می‌دهند [۱۵]. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد با توجه به ضرورت مدیریت لجن حاصل از تصفیه‌خانه آب و اهمیت روش مکانوشیمیایی در تثبیت مواد آلی و فلزات سنگین و مکانیسم‌های طبیعت دوستانه آن جهت سنتز و بازیابی مواد، هدف این مطالعه به عنوان یک روش نوین، سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه جهت بازیابی ماده منعقدکننده از تصفیه‌خانه آب و استفاده مجدد از آن در تصفیه فاضلاب می‌باشد.

استفاده از روش‌های موجود جهت بازیابی مواد منعقدکننده دارای معایب و کم و کاستی‌های خاص خود می‌باشند. از این رو مطالعه و تحقیق در مورد روش‌های نوین بازیابی آهن مثل آسیاب سیاره‌ای به منظور اصلاح نواقص تکنیک‌های پیشین و بالا بردن راندمان بازیابی آهن، ضرورت پیدا می‌کند، ازجمله اینکه امروزه مدیریت لجن حاصل از تصفیه‌خانه آب یک معضل زیست محیطی تلقی می‌شود. هدف از این مطالعه، در وهله نخست ارتقای عملکرد فرایند هضم اسیدی با اصلاح معایب آن از جمله کاهش حجم اسید مصرفی و مواد آلی ناشی از مصرف بالای اسید، با استفاده از روش تلفیقی و کمکی آسیاب گلوله‌ای بوده و در وهله دوم استفاده از روش نوین مکانوشیمیایی (آسیاب سیاره‌ای)، به منظور بازیافت و اصلاح خصوصیات فیزیکوشیمیایی لجن و استفاده مجدد از محصول نهایی به عنوان منعقدکننده در صنعت آب و فاضلاب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه از نوع کاربردی بنیادی- تجربی است و روی لجن تصفیه‌خانه آب فرایند هضم اسیدی قبل و بعد از آسیاب سیاره‌ای انجام شد. به منظور بررسی تاثیر فرایند آسیاب سیاره‌ای و غلظت اسید بر میزان بازیابی آهن از لجن، از اسید هیدروکلریک در غلظت‌های مختلف استفاده شد. به طور دقیق ۱ کیلوگرم لجن آهن

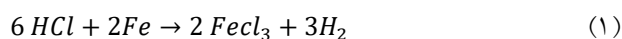
به صورت نیمه خشک از بستر لجن خشک کن تصفیه‌خانه آب جلالیه تهران در ظروف پلی اتیلنی جمع‌آوری شد. مشخصات لجن بر اساس اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی تعیین شد. اندازه‌گیری تمام پارامترهای فیزیکی (pH و درصد رطوبت) و شیمیایی (آنالیز عناصر) به کمک روش‌های استاندارد متد و با استفاده از دستگاه AES-MP ساخت کشور آلمان انجام شد [۱۶]. از دستگاه آسیاب سیاره‌ای مدل PM ۲۴۰۰ به منظور بررسی تعیین اثر فرایند مکانوشیمیایی بر بازیابی لجن تصفیه‌خانه آب استفاده شد. این دستگاه از دو قندانی یا همان محفظه به حجم ۱۰۰ سی‌سی با قطر داخلی ۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۵۱ میلیمتر تشکیل شده است. این دو محفظه بر روی یک دیسک که خلاف جهت آن می‌چرخند قرار گرفته‌اند. بنابراین هر کدام از این محفظه‌ها دارای دو حرکت، یکی ناشی از چرخش صفحه دیسک اصلی و دیگری حاصل از حرکت وضعی خود قندانی‌ها می‌باشند. به علت طراحی خاص این آسیاب‌ها که محفظه و دیسک در خلاف جهت هم می‌چرخند، دو نیروی گریز از مرکز متفاوت به گلوله‌ها اعمال می‌شود که بزرگی این نیرو می‌تواند ۲۰ برابر شتاب جاذبه زمین باشد. با توجه به هدف کار تعدادی گلوله از جنس استیل زنگ نزن با وزن‌های ۱ گرم و ۴ گرم و قطرهای ۸۰ و ۱۴۰ میلیمتر می‌تواند داخل هر محفظه قرار بگیرد. در این تحقیق با توجه به مطالعات قبلی نسبت جرم گلوله‌ها به لجن ۱:۲۰ انتخاب شد. به عبارتی جهت تنظیم این نسبت در داخل محفظه‌های آسیاب سیاره‌ای از ۸ گلوله ۴ گرمی و ۸ گلوله ۱ گرمی به همراه ۲ گرم نمونه لجن تصفیه‌خانه استفاده شد. دستگاه مجهز به سیستم کنترلی لمسی جهت تنظیم پارامترهای عملیاتی آسیاب مثل مدت زمان چرخش‌ها، تعداد سیکل کاری، زمان توقف بین هر سیکل کاری و جهت چرخش (ساعتگرد و پاد ساعتگرد) می‌باشد. مکانیسم کلی دستگاه به این صورت است که گلوله و نمونه به طور متناوب با جداره داخلی محفظه برخورد کرده و روی آن ساییده می‌شود و سپس با سرعت زیاد از جدار محفظه جدا شده و به دیوار روبه‌روی برخورد می‌کند. بنابراین در اثر این نیروی بالای ضربه ذرات پودر شده به صورت مداوم شکسته شده و جوش می‌خورند و مواد جدید به وجود می‌آیند [۸].

در گام نخست تاثیر آسیاب سیاره‌ای با (سرعت چرخش ۳۰۰ دور در دقیقه، زمان چرخش ۶ ساعت، نسبت جرمی گلوله به لجن ۱:۲۰) بر میزان بازیابی آهن از لجن تصفیه‌خانه آب مورد بررسی قرار گرفت. همچنین جهت بررسی تاثیر میزان غلظت اسید بر میزان راندمان لیچینگ و بازیابی آهن، اسید هیدروکلریک در ۷ غلظت مختلف (۲/۵، ۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵، ۰/۳، ۰/۱) برحسب نرمالیت در بالون ۱۰۰ سی‌سی تهیه شد. فرایند هضم اسیدی در غلظت‌های مختلف بر روی نمونه بالمیل شده (آسیاب سیاره ای شده) و بدون بالمیل انجام شد. نمونه فیلتر شد و آهن موجود در مایع رویی به کمک دستگاه اسپکتروفتومتری DR 5000 اندازه گیری شد. به منظور بررسی امکان تصفیه پساب‌های صنعتی (آبکاری و نساجی) و همچنین مقایسه کارایی این مواد با نمونه تجاری کلروفریک، از نمونه‌های لجن بالمیل شده و بدون بالمیل و تجاری محلول کلروفریک با غلظت ۱۵ درصد ساخته شد و تست جارتست انجام شد.

در میان روش های تصفیه فاضلاب صنایع نساجی، فرایند انعقاد و لخته سازی به دلیل راهبری ساده و سرمایه گذاری پایین، به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد [۱۷]. همچنین یکی از مراحل مهم تصفیه پساب آبکاری جهت شکستن مقدار COD فرایند انعقاد است که به دنبال آن، جهت رسیدن به استانداردهای تخلیه آب کشاورزی از فرایندهای بیولوژیکی و الکتروکواگولاسیون استفاده می‌کنند [۱۸]. بنابراین به علت اهمیت فرایند انعقاد در این دو صنعت و میزان خطرناک بودن پساب‌ها، این دو صنعت جهت انجام تست جارتست انتخاب شد.

میزان پسماند و اسید هیدروکلریک مورد نیاز جهت ساخت کلروفریک ۱۵ درصد و انجام تست جارتست از معادله (۱) به دست آمد. با توجه به رابطه (۱) به ازای هر ۲ مول آهن خالص ۶ مول اسیدکلریدریک باید مصرف شود. یعنی به ازای ۱۶/۵ گرم

آهن باید ۱۰ گرم اسید هیدروکلریدریک مصرف شود. بنابراین با توجه به چگالی اسید مصرفی (۱/۱۹ گرم بر سانتی مترمکعب)، ۲۲/۹ سی‌سی هیدروکلریک اسید غلیظ توسط پیپت به داخل ظرف‌های حاوی ۱۲۵ گرم نمونه اضافه شد (با توجه به نتایج XRF هر ۱۲/۵ گرم اکسید آهن ۵/۱۶ گرم آهن خالص دارد). نمونه‌ها به مدت یک ساعت داخل شیکر با سرعت ۳۰۰ RPM به هم‌خورد و در نهایت توسط کاغذ صافی فیلتر شد مراحل ساخت کلروفریک مایع همانند فرایند هضم اسیدی با مقادیر به دست آمده در رابطه شماره ۱ می‌باشد. محلول‌های ساخته شده بر اساس استاندارد "کلرید آهن (III) - ویژگی و روش‌های آزمون" مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹].



در نهایت به منظور شناسایی تغییر فاز، ساختار شیمیایی، اندازه ذرات از نمونه لجن تصفیه‌خانه آب قبل و بعد از فرایند مکانوشیمیایی آنالیز تکمیلی XRD، XRF و TEM گرفته شد.

یافته‌ها

pH و درصد رطوبت اندازه‌گیری شده در نمونه لجن آب به ترتیب برابر ۷/۱ و ۴۱٪ گزارش شد. داده‌های جداول شماره (۱) و (۲) به‌ترتیب نتایج آزمون XRF و آنالیز عناصر با MP-AES مشخصات شیمیایی لجن تصفیه‌خانه آب را نشان می‌دهند.

نتایج XRD نشان داد لجن بعد از عملیات آسیاب سیاره‌ای تغییرات شیمیایی محسوسی داشته است، بدین صورت که که فاز حاوی آهن موجود در نمونه بعد از آسیاب‌شدن از فرم FeO(OH) به CaFeO₆Si₂ تغییر یافته است.

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF لجن تصفیه خانه آب آشامیدنی

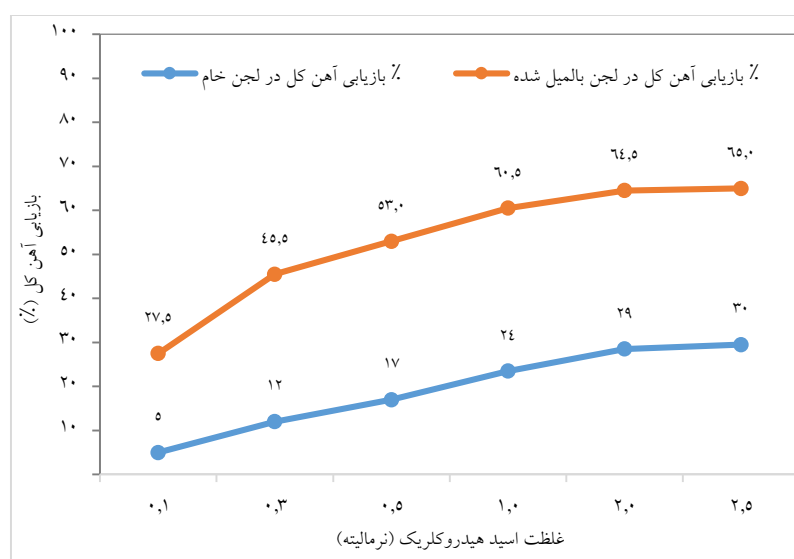
Table 1- Results of XRF analysis of drinking water treatment plant sludge

ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی
Na ₂ O	۰/۳۵	MgO	۰/۷۳	Al ₂ O ₃	۲/۴	SiO ₂	۱۲/۳
SO ₃	۰/۲۲	K ₂ O	۰/۵۴	CaO	۳/۴	TiO ₂	۰/۰۹
Fe ₂ O ₃	۵۹/۰۱	P ₂ O ₅	۰/۲۱	MnO	۰/۱۸		

جدول ۲- میزان عناصر و انواع فلزات سنگین موجود در لجن تصفیه خانه آب بر حسب میلی گرم بر گرم

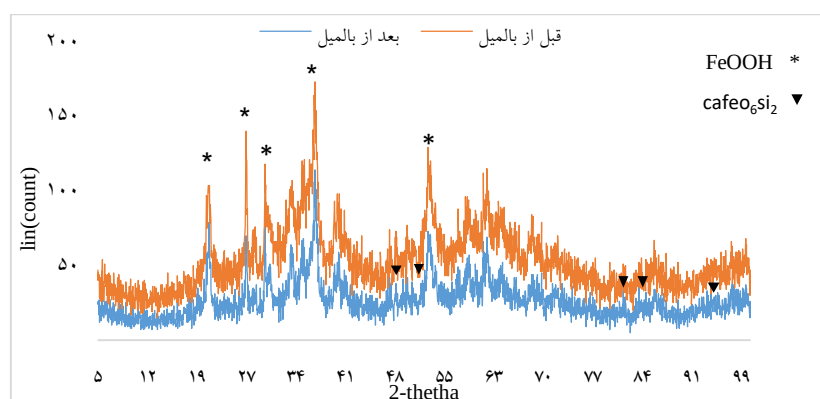
Table 2- Amount of elements and types of heavy metals in water treatment plant sludge in terms of mg/g

Ti	Sn	Cd	Cr	Pb	Mn	Al	Mo	Ni	Co	Cu	Zn	Fe ⁺²	Fe ⁺³	فلز
۰/۶۲	۰/۴۲	<LD	۰/۲۶	۰/۰۸	۴/۰۸	۲۴/۱	<LD	<LD	<LD	۰/۳۲	۹/۶۹	۷/۶۳	۵۹۸/۳	میزان



شکل ۱- تاثیر غلظت اسید بر نرخ بازیابی آهن (درصد)

Figure 1- Effect of acid concentration on iron recovery rate (percentage)

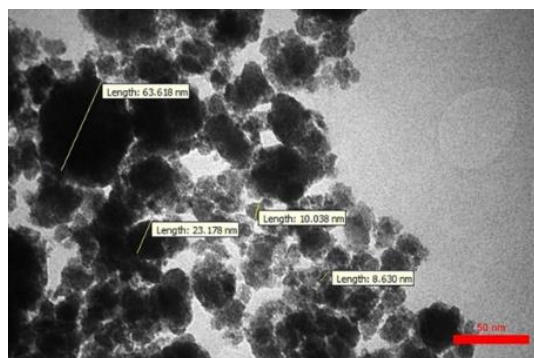


شکل ۲- طیف XRD نمونه لجن تصفیه خانه آب قبل و بعد از عملیات آسیاب سیاره ای

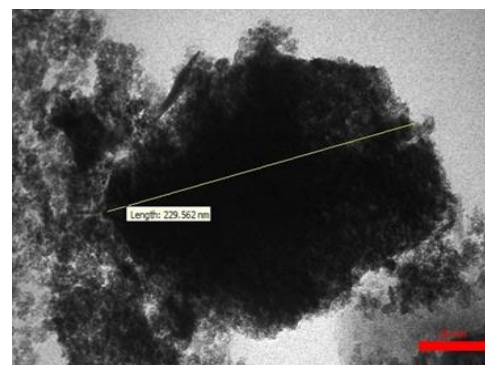
Figure 2- XRD spectrum of water treatment plant sludge sample before and after planetary mill operation

است. در هر دو تصویر بزرگترین ذره مد نظر قرار گرفته است. همان طور که از شکل شماره ۳ مشخص است، اندازه ذرات بعد از فرایند مکانوشیمیایی از ۲۲۹ نانومتر به ۶۳ نانومتر کاهش پیدا کرد.

همچنین به منظور شناسایی تغییرات به وجود آمده در اندازه ذرات نمونه، از آزمون TEM استفاده شد که در شکل شماره ۳ نمایش داده شده است. تصاویر نمایش داده شده در شکل مربوط به نمونه لجن تصفیه خانه آب قبل و بعد از فرایند آسیاب شدن



ب



الف

شکل ۳- تصاویر TEM الف) قبل از بالمیل ب) بعد از بالمیل

Figure 3- TEM images a) before balmil b) after balmil

مقدار این پارامترها برای پساب نساجی به ترتیب ۲۱۲۲ میلی گرم بر لیتر، ۳۳۵۰ میلی گرم بر لیتر، ۱۵۹۷۵ pt-co و ۷۴ NTU به دست آمد. با توجه به نتایج گزارش شده در جدول‌های شماره ۳ و ۴ می‌توان دریافت که منعقدکننده بازیافتی از لجن تصفیه‌خانه، باعث کاهش COD پساب‌های صنایع آبکاری و نساجی شده است.

در این مطالعه، به منظور بررسی امکان تصفیه فاضلاب صنعتی با مواد منعقدکننده بازیافتی تست جارتست بر روی فاضلاب‌های صنعتی آبکاری و نساجی انجام شد. بنابراین به علت اهمیت فرایند انعقاد در این دو صنعت و میزان خطرناک بودن پساب‌ها، این دو صنعت جهت انجام تست جارتست انتخاب شد. براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده میزان پارامترهای COD، TSS، رنگ و کدورت پساب آبکاری به ترتیب ۱۸۵۵ میلی گرم بر لیتر، ۱۶۸ میلی گرم بر لیتر، ۱۶۸۸ pt-co و ۱۳۲ NTU می‌باشد و همچنین

جدول ۳- نتایج جارتست پساب آبکاری (منعقدکننده مصرفی ۹ میلی لیتر)

Table 3- Jarrest results of electroplating effluent (consumable complexing agent 9 ml)

نام نمونه	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	کدورت (NTU)	میزان رنگ pt-co
تجاری	۲۸۶	۲۸	۳۶	۲۲۴
بالمیل	۳۸۷	۳۶	۴۹	۳۸۴
خام	۱۳۰۱	۹۹	۶۰	۶۸۹

جدول ۴- نتایج جارتست پساب نساجی (منعقدکننده مصرفی ۸ میلی لیتر)

Table 4- The results of retesting of textile wastewater (consumption complexant 8 ml)

نام نمونه	COD (mg/L)	TSS (mg/L)	کدورت (NTU)	میزان رنگ pt-co
تجاری	۱۳۷/۹	۳	۰	۵۴
بالمیل	۲۰۷/۹	۵	۲	۶۲
خام	۱۲۶۵	۸۹	۱۰	۲۵۶

بحث

اعداد بدست آمده درمورد رطوبت و pH لجن این پژوهش با نتایج کار پژوهشگران دیگر مطابقت داشت. مقدار pH در پژوهش انجام شده توسط واعظی بر روی لجن تصفیه‌خانه آب جلالیه به روش پتانسیومتری، برابر ۷/۵ بود [۲۰]. Babatunde و Zhao در سال ۲۰۰۷ مقدار pH لجن آهن تصفیه‌خانه آب را در تحقیق خود برابر ۷ گزارش کردند [۲۱]. در مورد درصد رطوبت برآورد شده در این پژوهش هم می‌توان اظهار کرد که تقریباً در محدوده رنج اعداد محاسبه شده در مقالات مروری پژوهشگران دیگر می‌باشد. مطالعه‌ی Barakwa و همکارانش نشان داد که درصد رطوبت در تصفیه‌خانه‌های مختلف آب آشامیدنی ۲۸/۶، ۵۰/۶ و ۹۹/۰۸ درصد می‌باشد [۲۲]. نتایج مطالعات قبلی گویای این مطلب است که لجن تصفیه‌خانه حاوی مقادیر بالایی از آهن است که این حجم از آهن ارزش بازیابی و استفاده مجدد را دارد. برای مثال در مطالعه Ahmad و همکارانش هم میزان اکسید آهن، حداقل و حداکثر حدود ۶۸ و ۲۱ درصد گزارش شده است که این اعداد با داده‌های XRF این پژوهش هم کاملاً مطابقت دارد. آزمون XRF گزارش شده در جدول (۱) نشان می‌دهد، لجن تصفیه‌خانه حاوی ۵۹ درصد آهن به شکل اکسید آهن است [۲۳]. مقایسه نتایج بازیابی آهن قبل و بعد از استفاده از آسیاب سیاره‌ای نشان داد که بعد از فرایند مکانوشیمیایی بر روی نمونه، غلظت اسید مصرفی از ۲/۵ نرمال به ۰/۱ نرمال جهت رسیدن به یک نرخ بازیابی ثابت یعنی ۲۹/۵ درصد، کاهش می‌یابد. این نتایج تقریباً در مطالعه Yang و همکارانش که در سال ۲۰۱۳ با عنوان بازیابی منعقدکننده آلومینیوم از لجن تصفیه‌خانه آب به روش هضم اسیدی با کمک اولترا سونیک انجام دادند، مشابهت داشت. در آن مطالعه هم با کمک دستگاه اولتراسوند میزان غلظت اسید مصرفی جهت استحصال آلومینیوم از لجن تصفیه‌خانه برای یک نرخ ثابت بازیابی مثلاً ۶۵/۸ درصد از ۳ مولار به ۰/۳ مولار کاهش یافت. بنابراین یک فرایند کمکی مثل اولتراسونیک یا آسیاب سیاره‌ای می‌تواند باعث افزایش راندمان فرایند هضم اسیدی بشود. علت این امر همان‌طور که در نتایج XRD هم مشهود است، این موضوع می‌باشد که بعد از آسیاب سیاره‌ای آهن از فرم نامحلول

خود یعنی هیدروکسید آهن خارج می‌شود. با مقایسه شکل (۱) و (۲) می‌توان فهمید که شدت پیک مربوط به هیدروکسید آهن در زاویه تابش ۳۳، ۳۶، ۵۴ درجه در محدوده ۲θ بعد از آسیاب سیاره‌ای به شدت کاهش یافته است. همچنین پیک مربوط به $\text{CaFeO}_6\text{Si}_2$ بعد از آسیاب سیاره‌ای در زوایای برجسته پراش در مقادیر ۱۳/۷۱، ۲۷/۵۰، ۳۰/۰۶، ۳۵/۰۲، ۳۵/۴۵، ۴۲/۴۰، ۵۱/۹۱، ۵۶/۴۰، ۹۰/۹۹ دیده شد که که با کارت استاندارد JCPDS مطابقت دارد. این امر بیانگر تغییر فاز آهن در لجن تصفیه‌خانه آب بعد از آسیاب سیاره‌ای است. تغییر شکل لاسستیک/پلاستیک در هنگام برخورد ذرات پودر گلوله رخ می‌دهد [۱۹]. به عبارتی علت افزایش بازیابی و انحلال آهن بعد از آسیاب سیاره‌ای همین فعل واکنش‌های شیمیایی و تغییر فازها است. با توجه به مطالعه‌ی انجام شده توسط Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۳، میزان انحلال‌پذیری $\text{CaFeO}_6\text{Si}_2$ با افزایش دما و کاهش pH، افزایش می‌یابد [۲۴]. رایج‌ترین گونه آهن در لجن تصفیه‌خانه آب، $\text{Fe}(\text{OH})_3$ است که در حالت تعادل یعنی محدوده pH ۵ تا ۸، این ترکیب تا حد زیادی در فاز جامد با حلالیت بسیار پایین قرار دارد. سوسپانسیون‌های نسبتاً پایداری از $\text{Fe}(\text{OH})_3$ در مقادیر بالا می‌توانند در این رنج از pH وجود داشته باشند. به طور کلی دلیل کاهش pH فرایند هضم اسیدی استفاده از اسید هیدروکلریک جهت بازیابی آهن از لجن تصفیه‌خانه آب است. بدین صورت که با افزودن اسید عمل یونیزه شدن اتفاق می‌افتد و میزان H^+ محلول بالا می‌رود و pH محیط کم می‌شود با خارج شدن آهن از شکل هیدروکسید توسط آسیاب سیاره‌ای میزان انحلال‌پذیری و یونیزه شدن هیدروکسید به صورت Fe^{++} ، FeO^+ ، $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$ و Fe^{+++} بیشتر می‌شود. بدون استفاده از آسیاب سیاره‌ای یونیزه شدن هیدروکسید آهن به شکل بالا و در نهایت تبدیل به Fe^{+3} نیازمند کاهش شدید pH است؛ به عبارتی اسید زیادی جهت اسیدی کردن محیط نیاز است [۲۵]. بنابراین آسیاب سیاره‌ای باعث شد که حلال اسیدی کمتری جهت استحصال آهن مصرف شد. استفاده از حلال کمتر علاوه بر صرفه جویی چشمگیر در هزینه‌ها، یک فرایند دوستدار محیط زیست هم محسوب

می‌شود. کیفیت و کارایی به دست آمده از فرایند تا حدودی قابل مقایسه با کلروفریک تجاری بود ولی کاملاً نتوانست به کیفیت آن برسد. میزان بازیابی آهن در تحقیق مشابهی که توسط واعظی بر روی نمونه لجن تصفیه‌خانه آب جلالیه تهران انجام شد تا مواد منعقدکننده را با روش هضم اسیدی بازیابی کند، ۴۵ درصد بود [۲۰]. با این حال میزان بازیابی در پژوهش حاضر به کمک فرایند مکانوشیمیایی ۶۰/۵ درصد برآورد شده است که این اختلاف را می‌توان نتیجه استفاده از آسیاب سیاره‌ای دانست. نتایج تست جارتست در جداول (۳) و (۴) نشان داد که ماده منعقدکننده بازیابی شده توانایی کاهش COD، TSS، رنگ و کدروت از هردو پساب صنعتی آبکاری و نساجی را داشت. درصد حذف COD برای پساب آبکاری تصفیه شده با نمونه تجاری کلروفریک، بازیابی شده فقط با هضم اسیدی و بازیابی شده با هضم اسیدی و آسیاب سیاره‌ای به ترتیب ۸۴/۵، ۳۱/۲ و ۷۹/۱ درصد و برای پساب نساجی ۹۳/۵، ۴۰/۴ و ۹۰/۲ درصد می‌باشد. این بدین معنی است که نمونه بالمیل شده کارایی تقریباً مشابهی با نمونه تجاری دارد همچنین دلیل دیگر افزایش انحلال‌پذیری آهن بعد از فرایند مکانوشیمیایی و استفاده از آسیاب سیاره‌ای، کوچک شدن اندازه ذرات است که نتایج TEM گویای این مطلب بود. به طور کلی بر اساس مقالات قبلی هم می‌توان گفت که بعد از فرایند مکانوشیمیایی اندازه ذرات به شدت کاهش پیدا می‌کند [۲۶]، بدین ترتیب نسبت سطح به حجم افزایش می‌یابد. با افزایش مساحت سطحی ذره نسبت به حجم آن، رفتارهای سطحی اتم به رفتارهای درونی غلبه می‌کند زیرا درصد بیشتری از اتم‌ها در سطح قرار می‌گیرد. این ویژگی سبب تغییر عمده در ساختار و خواص شیمیایی، مکانیکی و الکترونی این مواد می‌شود [۲۷، ۲۸].

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که روش مکانوشیمیایی به طور چشمگیری باعث ارتقای عملکرد فرایند هضم اسیدی از تصفیه‌خانه آب شد. پیش تصفیه لجن به کمک روش مکانوشیمیایی خصوصیات فیزیکوشیمیایی لجن تصفیه‌خانه را جهت بازیابی آهن بهبود بخشید. به عبارتی آهن از

فرم نا محلول خود یعنی FeO(OH) با ksp بسیار پایین خارج شد. به این ترتیب میزان حجم اسید مصرفی جهت بازیابی مواد منعقدکننده به طور چشمگیری کاهش پیدا کرد. به عبارتی می‌توان گفت که به کمک آسیاب سیاره‌ای غلظت اسید مصرفی از ۲/۵ نرمال به ۰/۱ نرمال جهت رسیدن به یک نرخ ثابت بازیابی (به طور مثال ۲۹/۵٪)، کاهش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان داد که با تلفیق روش مکانوشیمیایی با روش هضم اسیدی می‌توان شرایط بازیابی کلروفریک را از نظر میزان اسید مصرفی و کیفیت محصول نهایی تا حد قابل توجهی بهبود داد. و دلیل آن این است که بعد از استفاده از آسیاب سیاره‌ای همان طور که در نتایج XRD و TEM هم مشاهده گردید، تغییر به سزایی در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی لجن تصفیه‌خانه اتفاق افتاد. نتایج جارتست نشان داد که منعقد کننده بازیافتی قابلیت تصفیه کنندگی پساب های صنعتی آبکاری و نساجی را دارد.

تشکر و قدردانی

این مطالعه حاصل بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد بهداشت محیط با کد اخلاق IR.SBMU.PHNS.REC.1401.013 می‌باشد. نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاری شرکت تامین و تصفیه آب و فاضلاب تهران و همه افرادی که محققان را در انجام این پژوهش یاری دادند، تشکر و قدردانی نمایند.

تضاد منافع

در این مطالعه نویسندگان هیچگونه تضاد منافی ندارند.

References

- 1- Keeley J, Smith AD, Judd SJ, Jarvis P. Acidified and ultrafiltered recovered coagulants from water treatment works sludge for removal of phosphorus from wastewater. *Water Research* 2016; 88:380-88.
- 2- Mahdavian SL, Ostovar F, Mirbolooki H. Coagulants recovery from water treatment plant's sludge: A review. *Iranian Journal of Health and Environment* 2018; 11(3):403-18 (In Persian).
- 3- Evuti AM, Lawal M. Recovery of coagulants from water works sludge: A review. *Advances in Applied Science Research* 2011;2(6):410-17.
- 4- Gomes SDC, Zhou JL, Li W, Long G. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. *Resources, Conservation and Recycling* 2019; 145:148-59.
- 5- Babatunde AO, Zhao Y. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: An international review of beneficial reuses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 2007; 37(2):129-64.
- 6- Kazemi MJ, Badalians Gholikandi G. Feasibility study of using water treatment plant sludge to improve the efficiency of wastewater treatment plant sludge thickening process. *Journal of Environmental Studies* 2023; 48(4):481-96.
- 7- Yang L, Han YX, Wang DT. High efficiency aluminum coagulant recovery from drinking water treatment plant sludge by using ultrasound assisted acidification. *Advanced Materials Research* 2013; 777:60-64.
- 8- Sheibani S, Khakbiz M, Omid M. In situ preparation of Cu-MnO nanocomposite powder through mechanochemical synthesis. *Journal of Alloys and Compounds* 2009; 477(1-2):683-87.
- 9- Boldyrev V V, Tkáčová K. Mechanochemistry of solids: past, present, and prospects. *Journal of Materials Synthesis and Processing* 2000; 8:121-32.
- 10- Cagnetta G, Huang J, Yu G. A mini-review on mechanochemical treatment of contaminated soil: from laboratory to large-scale. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 2018; 48(7-9):723-71.
- 11- Frišić T, Mottillo C, Titi HM. Mechanochemistry for synthesis. *Angewandte Chemie* 2020; 132(3):1030-41.
- 12- Seyed M, Haratian S, Khaki JV. Mechanochemical synthesis of Fe₂O₃ nanoparticles. *Procedia Materials Science* 2015; 11:309-13.
- 13- Zhang ZY, Zhang FS, Yao T. An environmentally friendly ball milling process for recovery of valuable metals from e-waste scraps. *Waste Management* 2017; 68:490-97.
- 14- Pourmand H, Leili M, Shokouhi R, Asgari G. The assessment of water treatment plant sludge properties and the feasibility of its re-use according to environmental standards: Shahid Beheshti water treatment plant case study, Hamadan. *Avicenna Journal of Clinical Medicine* 2016; 23(1):57-64 (In Persian).
- 15- Yazdanbakhsh AR, Massoudinejad M, Mohammadi S. The efficacy of O₃, UV and UV/O₃ on the removal of humic acids from water in a plug flow reactor. *Journal of Health in the Field* 2015; 3(1):7-15 (In Persian).
- 16- Baird R, Eaton A, Rice E, Bridgewater L. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, DC: American Public Health Association, United State of America; 2017.
- 17- Amini M, Yazdanbakhsh AR, Eslami A, Aghayani E. Optimization of coagulation-flocculation process for dye and COD removal from real dyeing wastewater and evaluation of effluent biodegradability in a carpet factory. *Journal of Health in the Field* 2017; 5(3):24-33 (In Persian).
- 18- Fazli Z, Zendedel R, Panahi D, Omid M, Sajedifar J, Firouzeh N. Non-carcinogenic risk assessment of occupational exposure to hexavalent chromium in two selected types of chrome electroplating workshops in Tehran. *Journal of Health in the Field* 2017; 4(1):18-24 (In Persian).
- 19- AWWA. B407-98: Standard for Liquid Ferric Chloride. New York: American National Standards Institute (ANSI) 2018. Available from: <https://engage.awwa.org/PersonifyEbusiness/Bookstore/Product-Details/productId/18529>.
- 20- Vaezi F, Batebi F. Recovery of iron coagulants from Tehran water-treatment-plant sludge for reusing in textile wastewater treatment. *Iranian Journal of Public Health* 2001; 30(3-4):135-38.
- 21- Yang Y, Zhao Y, Babatunde A, Wang L, Ren Y, Han Y. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. *Separation and Purification Technology* 2006; 51(2):193-200.
- 22- Barakwan RA, Trihadiningrum Y, Bagastyo AY. Characterization of alum sludge from Surabaya water treatment plant, Indonesia. *Journal of Ecological Engineering* 2019; 20(5): 7-13.
- 23- Ahmad T, Ahmad K, Alam M. Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. *Journal of Cleaner Production* 2016; 124:1-13. Doi: doi. org/ 10. 1016/ j. jclepro. 2016. 02.073.
- 24- Zhang R, Zhang X, Guy B, Hu S, De Ligny D, Moutte J. Experimental study of dissolution rates of hedenbergitic clinopyroxene at high temperatures:

- dissolution in water from 25° C to 374° C. *European Journal of Mineralogy* 2013; 25(3):353-72.
- 25- Silver J. *Chemistry of iron*. New Delhi: Springer Dordrecht 1993.
- 26- Guzzo PL, Marinho de Barros FB, Soares BR, Santos JB. Evaluation of particle size reduction and agglomeration in dry grinding of natural quartz in a planetary ball mill. *Powder Technology* 2020; 368:149-59.
- 27- Takacs L. Self-sustaining reactions induced by ball milling. *Progress in Materials Science* 2002; 47(4):355-414.
- 28- Tsuzuki T, Ding J, McCormick P. Mechanochemical synthesis of ultrafine zinc sulfide particles. *Physica B: Condensed Matter* 1997; 239(3-4):378-87.