

## مروری بر فروشوی زیستی پسماندهای الکترونیکی

مهدخت ارشدی<sup>۱</sup>، سهیلا یغمایی<sup>۲\*</sup>، سید محمد موسوی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۳۱

پیام‌نگار: yaghmaei@sharif.edu

### چکیده

در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا و نیمه عمر کوتاه تجهیزات الکترونیکی به انباشت آن‌ها و ایجاد مشکلات زیست‌محیطی فراوانی انجامیده است. پسماندهای الکترونیکی شامل بسیاری از فلزات خطرناک‌اند که در صورت مدیریت نادرست در دفع آنها، به طور جدی جامعه انسانی را تهدید می‌کنند. از سوی دیگر، به طور میانگین، با بازیافت پسماندهای الکترونیکی می‌توان حدود ۴۰ میلیون تن از منابع را تأمین کرد. روش‌های سنتی برای بازیافت پسماندهای الکترونیکی به دلیل هزینه‌های گزاف و تولید محصولات جانبی خطرناک، ناکارآمدند. فروشوی زیستی با بهره‌گیری از ریزاندامگانها روشی مؤثر، دوستدار محیط‌زیست، و اقتصادی برای بازیافت پسماندهای الکترونیکی به‌شمار می‌آید. در این مقاله، پژوهش‌های انجام شده برای بازیافت فلزات پسماندهای الکترونیکی با بهره‌گیری از فروشوی زیستی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد فروشوی زیستی برای استخراج فلزات از پسماندهای الکترونیکی بسیار کارآمد است و می‌تواند تا صد درصد فلزات اساسی مانند نیکل، مس و روی، و حدود نیمی از فلز پایدار طلا را استخراج کند.

**کلیدواژه‌ها:** پسماندهای الکترونیکی، صفحه مدارهای چاپی، بازیافت، فروشوی زیستی

### ۱. مقدمه

تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی از یک سو، و عمر مفید کوتاه این تجهیزات از سوی دیگر، به ایجاد حجم بزرگی از پسماندهای الکترونیکی و الکترونیکی انجامیده است [۳]. پسماندهای الکترونیکی شامل تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی است که وسایلی چون صفحه‌های نمایشگر، تلویزیون‌ها، یخچال‌ها، فریزرها، تلفن‌های همراه، ماشین‌های ظرفشویی و رایانه‌ها را دربر می‌گیرند [۴]. بنابر مطالعات برترام<sup>۲</sup> و همکارانش (۲۰۰۲) پسماندهای ناشی از تجهیزات

امروزه، در میان پسماندهای جامد، بردهای الکترونیکی، پسماندهای پزشکی، کاتالیست‌های فرسوده پالایشگاهی، باتری‌های فرسوده، پُر خاکسترها<sup>۱</sup> و ... مهم‌ترین پسماندهای شناخته شده به‌شمار می‌آیند [۱]. اما پسماندهای الکترونیکی عمده‌ترین پسماند قرن بیست‌ویکم را تشکیل می‌دهند [۲]. رشد و توسعه تولید

\* تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، گروه بیوتکنولوژی

1. Fly Ash

2. Bertram et al.

پسماندها با مدیریت پسماندهای سنتی متفاوت است. هم اکنون، پسماندهای الکترونیکی به روش‌های نادرستی در دنیا دفن می‌شود که خطر نشت مواد مضر آن‌ها به آب‌های زیرزمینی و خاک وجود دارد [۱۱]. از سوی دیگر، از طریق بازیافت فلزات موجود در پسماندهای الکترونیکی، می‌توان معادن طبیعی را حفظ کرد. بنابراین، بازیافت پسماندهای الکترونیکی نه تنها از جنبه کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی اهمیت دارد، بلکه به عنوان یک منبع استخراج فلز نیز حائز اهمیت است و می‌توان از طریق حدود ۴۰ میلیون تن مواد را تأمین کرد [۹].

## ۲. بازیافت زباله‌های الکترونیکی

در طی چند سال گذشته، چگونگی بازیافت فلزات موجود در پسماندهای الکترونیکی به یک نگرانی جهانی تبدیل شده است، اما ساختار پیچیده و ناهمگن آن‌ها مهم‌ترین بازدارنده بازیافت به‌شمار می‌آید. برای بازیافت فلزات موجود در پسماندهای الکترونیکی، روش‌های جداسازی مکانیکی، پیرومتالورژی<sup>۲</sup>، هیدرومتالورژی<sup>۳</sup> و بیوهیدرومتالورژی<sup>۴</sup> استفاده شده است [۱۴].

### ۲.۱ روش‌های فیزیکی و شیمیایی

بهره‌برداری پدیده از معادن سبب کاهش عیار معادن شده است که روش‌های سنتی برای استخراج فلزات موجود در آن‌ها بدون توجه اقتصادی خواهد بود [۲]. برای پاک‌سازی پسماندهای صنعتی نیز فرایندهای سنتی به همراه روش‌های فیزیکی و شیمیایی محدودیت‌های اساسی دارند [۱۵]. سهم عمده هزینه‌های عملیاتی، به غلظت فلزات موجود در محلول، تجهیزات، خالص‌سازی نهایی و حذف پسماندهای نهایی، از جمله لجن، بستگی دارد؛ در نتیجه، صنعت به مبالغ هنگفتی سرمایه‌گذاری در این بخش‌ها نیاز دارد. بنابراین، هر نوع روش جدیدی که بتواند به طور معناداری از نظر اقتصادی و هماهنگی با محیط‌زیست رقابت کند، مهم تلقی می‌شود [۲].

### ۲.۱.۱ پیرومتالورژی (متالورژی حرارتی)

فرایندهای پیرومتالورژی شامل سوزاندن و تبدیل کردن به خاکستر،

الکترونیکی و الکترونیکی سریع‌ترین جریان تولید پسماند به‌شمار می‌آیند [۵]. بنابر آمار شورای حفاظت از محیط‌زیست آمریکا، مجموع وزن پسماندهای الکترونیکی که در هر سال تولید می‌شود، بین ۲۰ تا ۵۰ میلیون متریک تن است. پسماندهای الکترونیکی غالباً شامل نقره، آلومینیم، باریوم، منیزیم، نیکل، روی، تیتانیوم، طلا، سرب و مس هستند که می‌توانند سلامت انسان و محیط‌زیست را به خطر اندازند. امروزه، این زباله‌ها به شیوه‌های نادرستی در زمین دفن می‌شوند و امکان نفوذ فلزات سنگین به آب‌های زیرزمینی را پدید می‌آورند که سلامتی انسان را به مخاطره می‌اندازند. از سوی دیگر، وجود برخی فلزات گران‌بها مانند طلا، نقره و نیکل سبب می‌شود بازیافت از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر باشد، تا جایی که از پسماندهای الکترونیکی به دلیل محتوای غنی ترشان نسبت به معادن طبیعی، به عنوان معادن «ثانویه» یا «مصنوعی» یاد می‌شود [۶]. صفحه مدارهای چاپی<sup>۱</sup> بخشی از پسماندهای الکترونیکی، حامل اصلی فلزات گران‌بها و خطرناک‌اند [۷]. صفحه مدارهای چاپی، تنها حدود ۶ درصد از وزن کلی پسماندهای الکترونیکی را تشکیل می‌دهند، اما مهم‌ترین حامل مواد ارزشمندند [۸]. در بین صفحه مدارهای چاپی، صفحه مدار چاپی تلفن همراه و رایانه از مهم‌ترین صفحه مدارها به‌شمار می‌آیند. تلفن‌های همراه، به دلیل محتوای غنی فلزی و حجم زیاد تولید، با توجه به نیمه عمر کوتاه‌شان (حدود ۴ سال، شامل باز مصرف) مهم‌ترین پسماندهای الکترونیکی‌اند [۹]. گزارش شده است که حدود ۷۰ درصد بهای تلفن همراه مربوط به فلزات ارزشمند به‌کار رفته در آن است [۱۰]. رایانه‌ها، نسبت به سایر پسماندهای الکترونیکی چند بار سریع‌تر تولید می‌شوند. با توجه به این‌که نیمه عمر بر رایانه بین ۲ تا ۵ سال است، بنابر برآوردها، در هر سال حدود ۱۷ میلیون رایانه از رده خارج می‌شود [۱۱]. مقدار طلایی که در یک تن رایانه یافت می‌شود، بیشتر از مقدار طلای موجود در ۱۷ تن سنگ معدن است [۱۲]. به طور میانگین، یک تن تلفن همراه بدون باتری، شامل ۱۳۰ کیلوگرم مس، ۳/۵ کیلوگرم نقره، ۳۴۰ گرم طلا و ۱۴۰ گرم پالادیم است. با توجه به این‌که ۱/۲ میلیارد دستگاه تلفن همراه در سال ۲۰۰۷ فروخته شده است، می‌توان پی برد که چه حجم عظیمی از این فلزات برای تولید آنها مورد نیاز است [۱۳]. با توجه به حضور فلزات سمی و گران‌بها در پسماندهای الکترونیکی، مشی مدیریت این

1. Printed Circuit Boards

2. Pyrometallurgical  
3. Hydrometallurgical  
4. Biohydrometallurgical

## ۲.۱.۲. هیدرومتالورژی

فرایندهای هیدرومتالورژی در مقایسه با فرایندهای پیرومتالورژی بسیار دقیق تر و قابل پیش‌بینی‌ترند و کنترل آنها هم آسانتر است. مراحل اصلی در فرایندهای هیدرومتالورژی شامل شست‌وشوی مواد جامد با مجموعه‌ای از اسیدهاست. سپس، محلول حاصل در معرض جداسازی و خالص‌سازی از طریق فرایندهایی چون ته‌نشینی ناخالصی‌ها، استخراج حل‌شونده، جذب و تبادل یون برای تغلیظ و جداسازی فلزات مورد نظر قرار می‌گیرد. در نهایت، فلزات محلول از طریق فرایندهای خالص کردن الکتریکی، احیای شیمیایی یا بلوری شدن بازیافت می‌شود. فرایندهای هیدرومتالورژی با توجه به مصرف معرف‌های سمی و مقادیر زیادی محصولات جانبی تولید شده در طی آن، با خطرات زیست‌محیطی همراه‌اند. این فرایندها به دلیل تجهیزات زیاد و پیشرفته‌ای که نیاز دارند، پرهزینه هم هستند و از آنجا که مصرف انرژی بسیار بالایی دارند، به عنوان یک روش اقتصادی برای استخراج فلزات گرانبه‌ای پسماندهای الکترونیکی پیشنهاد نمی‌شود [۴].

## ۲.۲. بیوهیدرومتالورژی (زیست‌متالورژی)

بیوهیدرومتالورژی روشی نو، مؤثر، اقتصادی و دوست‌دار محیط‌زیست است [۴]. پیش‌تیمار میکروبی منابع ثانویه بسیار کم‌هزینه و بدون زیانی‌اند. با شرایط عملیاتی متعادل و سازوکار ساده، نیاز به نیروی متخصص ندارند [۱۶، ۱۷]. روش‌های میکروبی، نسبت به روش‌های فیزیکی و شیمیایی به انرژی کم‌تری نیاز دارند و پسماندهای زاینده‌جانبی کم‌تری تولید می‌کنند که سبب می‌شود روش‌های میکروبی بسیار پر بازده و اقتصادی‌تر باشند [۱]. فروشوی زیستی<sup>۲</sup> یکی از حوزه‌های مهم در بیوهیدرومتالورژی است [۱۸، ۱۹] و با توفیق زیادی برای بازیافت فلزات از پسماندهای الکترونیکی به‌کار گرفته شده است [۴]. به‌طور کلی، فروشوی زیستی به معنای «استفاده از ریزاندامگانها<sup>۳</sup> برای انتقال و استخراج عناصر» است [۲۰]. در ابتدا، فروشوی زیستی را برای جداسازی فلزات گرانبه‌ای معادن مانند کادمیم، کبالت، طلا، مس، منگنز، نیکل، پلاتین، نقره، اورانیم و روی استفاده شده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که پسماندهای مختلف منبع اقتصادی واقعی برای فروشوی زیستی

گداختن در کوره، کفروبی، بستن و سخت شدن، ذوب کردن و انجام واکنش در فاز گازی در دمای بالاست. این روش یکی از روش‌های سنتی برای بازیافت فلزات غیر از آهن، مانند فلزات گرانبه‌ها ارزشمند پسماندهای الکترونیکی در دو دهه گذشته بوده است. در این فرایند اوراق خرد شده برای جداسازی پلاستیک‌هایشان در یک کوره سوزانده می‌شوند. فناوری‌های سنتی پیرومتالورژی، سال‌ها برای بازیافت فلزات گرانبه‌ای موجود در پسماندهای الکترونیکی استفاده شده است، هرچند که اغلب روش‌های این فرایند در مورد پسماندهای الکترونیکی از محدودیت‌های زیر برخوردارند:

۱. در خلال گداختن، آهن و آلومینیم را نمی‌توان بازیافت کرد زیرا این فلزات به لجن انتقال می‌یابند. متأسفانه، آلومینیم تأثیرات ناخواسته‌ای بر لجن می‌گذارد.
۲. حضور شعله در خلال گداختن، می‌تواند به تشکیل دی‌اکسید منجر شود. کوره‌های ذوب<sup>۱</sup> قدیمی، برای معدن و یا صفحات ساده مس طراحی شده‌اند و در هنگام استفاده برای پسماندهای الکترونیکی مشکلاتی بروز می‌کند.
۳. حضور ترکیب‌های سرامیکی و شیشه در قطعات الکترونیکی میزان لجن را افزایش می‌دهد.
۴. تنها قسمتی از جداسازی فلزات از طریق پیرومتالورژی تحقق می‌یابد؛ بنابراین استفاده از فرایندهای هیدرومتالورژی و یا الکتروشیمی هم در این روند نیاز است.
۵. فلزات گرانبه‌ها، در انتهای‌ترین قسمت فرایند استخراج می‌شوند [۱۰].
۶. فناوری پیرومتالورژی را تعداد زیادی از شرکت‌های بازیافت سرب به کار گرفته‌اند. روش‌های پاک‌سازی این فرایند به علت احتمال تشکیل بروماید، دی‌بنزوفوران‌ها و دی‌اکسین‌ها در فرایند سوختن، به دلیل حضور هالوژن‌ها در قطعات پلاستیکی زباله‌ها، خطر ابتلا به سرطان را افزایش می‌دهد.
۷. از سوی دیگر، این فرایندها پرهزینه‌اند و برای رسیدن به بهره‌بالاتر سرمایه‌گذاری زیادی نیاز است. مصرف انرژی در این روش‌ها بسیار زیاد است و به عنوان یک روش اقتصادی برای استخراج فلزات گرانبه‌ها، پسماندهای الکترونیکی توصیه نمی‌شود [۴].

2. Bioleaching  
3. Microorganism

1. Smelter

### ۱.۳. سازوکار مستقیم

در سازوکار مستقیم، باکتری با برقراری تماس فیزیکی با سطوح جامد، به طور مستقیم به شبکه مواد معدنی حمله و آن‌ها را تخریب می‌کند [۲۴]. ریزاندامگانها می‌توانند فلزات سولفیدی را در سازوکار مستقیم اکسید کنند و الکترون‌ها به طور مستقیم از سنگ‌های معدنی احیاشده تولید می‌شوند. در این سازوکار، سلول‌ها باید به سطح ماده معدنی متصل شوند و یک تماس بسیار نزدیک نیاز است. جذب سلول‌ها روی اجزای ماده معدنی موجود در محلول در طول چند دقیقه یا چند ساعت اتفاق می‌افتد [۴].

### ۲.۳. سازوکار نامستقیم

سازوکار دیگر، سازوکار نامستقیم نامیده می‌شود. در سازوکار نامستقیم، باکتری با سطوح جامد مواد معدنی تماس فیزیکی ندارد و فقط از طریق ایجاد چرخه‌های اکسایش آهن و گوگرد به صورت نامستقیم مواد معدنی را حل می‌کند [۲۴]. در این سازوکار، اکسایش فلزات احیاشده از طریق یون فریک رخ می‌دهد. یون فریک، خود از طریق اکسایش میکروبی یون فروس موجود در مواد معدنی، تشکیل می‌شود. یون فریک به عنوان یک اکسیدکننده عمل می‌کند و می‌تواند فلزات سولفیدی را اکسید کند و خودش به یون فروس احیاشود و سپس دوباره از طریق میکروب‌ها اکسید شود. در اینجا آهن حامل الکترون است. در این سازوکار هیچ تماس فیزیکی مستقیمی برای اکسایش آهن نیاز نیست [۲۵].

### ۳.۳. سازوکار فروشویی زیستی مس و طلا در پسماندهای الکترونیکی

#### ۳.۱.۳. سازوکار انحلال زیستی مس از طریق یون فریک

سازوکار انحلال زیستی مس، جزء اصلی صفحه مدارهای چاپی، به کمک *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس* به انحلال فلزات سولفیدی بسیار شبیه است [۱۷]. این سازوکار به دو مرحله پیوسته تقسیم می‌شود. ابتدا یون‌های  $Fe^{+3}$ ، عامل اکسنده و انحلال فلزات، به سطح نمونه حمله می‌کنند و سبب می‌شوند برخی فلزات به حالت محلول درآیند. یون‌های فریک با فلزات واکنش می‌دهد و در نتیجه به یون‌های فروس کاهیده (احیا) می‌شوند. در مرحله دوم، یون‌های فروس تولید شده توسط باکتری به عنوان منبع انرژی مصرف و

به‌شمار می‌آیند. علاوه بر نقش فعال فروشویی زیستی در استخراج فلزات، بیان شده است که از این روش می‌توان برای دفع مسمومیت نیز بهره گرفت. بسیاری از پسماندهای صنعتی، شامل مقادیر چشمگیری فلزات سمی‌اند. امکان نفوذ و نسبت این فلزات به آب‌های زیرزمینی و محیط‌زیست می‌تواند خطرات جدی در پی داشته باشد [۲۱]. ریزاندامگانهای زیادی در فرایند فروشویی زیستی مؤثر شناخته شده‌اند [۲۰]. سه گروه از ریزاندامگانها شامل باکتری‌های اتوتروفیک<sup>۱</sup>، هتروتروفیک<sup>۲</sup> و قارچ‌ها برای استخراج زیستی به کار گرفته می‌شوند [۲]. فرایندهای زیستی در محیط‌های اسیدی و نیز در محیط‌های قلیایی با ریزاندامگانهای سیانوزن در فناوری فروشویی زیستی نقش اساسی دارند [۲۲]. ریزاندامگانهای اسیددوست نقش مهمی در بازیافت فلزات سنگین از پسماندهای صنعتی دارند. در این گروه، باکتری‌های *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس*<sup>۳</sup>، *اسیدوتیوباسیلوس تیواکسیدانس*<sup>۴</sup>، *تیوباسیلوس تیوپاروس*<sup>۵</sup> و در بین قارچ‌ها *پنی‌سیلیوم*<sup>۶</sup> و *آسپرژیلوس نایجر*<sup>۷</sup> بسیار شناخته شده‌اند [۲]. هم‌چنین گستره‌ای از ریزاندامگانها مانند *کروموباکتریوم وایلووسم*<sup>۸</sup>، *سودوموناس فلوئورسنس*<sup>۹</sup>، *سودوموناس آرژینوسا*<sup>۱۰</sup> و *باسیلوس مگاتریوم*<sup>۱۱</sup> ریزاندامگانهای سیانوزن‌اند که در حضور فلزات مختلف قادرند سیانید را به عنوان سوخت‌وسازگر ثانویه تشکیل دهند و در نهایت برخی فلزات پایدار مانند پلاتین و طلا را به حالت محلول در آورند [۴].

### ۳. سازوکار فروشویی زیستی

در فروشویی زیستی سنگ‌های معدن سولفیدی، واکنش اکسایش از طریق فعالیت ریزاندامگانها شتاب می‌گیرد. اکسایش یک فلز سولفیدی از طریق فعالیت باکتری‌ها در حضور یون‌های فریک و سولفات می‌تواند طی دو سازوکار مستقیم و نامستقیم انجام شود [۲۳].

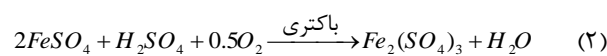
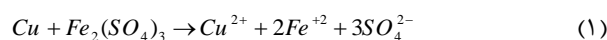
1. Autotrophic
2. Heterotrophic
3. Acidithiobacillus Ferrooxidans
4. Acidithiobacillus Thiooxidans
5. Thiobacillus Thioparus
6. Penicillium
7. Aspergillus Niger
8. Chromobacterium Violaceum
9. Pseudomonas Fluorescens
10. Pseudomonas Aeruginosa
11. Bacillus Megaterium

یک درصد وزنی مس به بیشینه مقدار خود می‌رسد. هم‌چنین، حضور فلزات دیگر سبب می‌شود سیانید با آن‌ها با سرعت بسیار بیشتری ترکیب تشکیل دهد و برای رسیدن به مقدار بازیابی معین، به مقادیر بالاتری از سیانید نیاز خواهد بود. مثلاً، آهن، نیکل، روی و نقره به ترتیب با سیانید، ترکیب‌های  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ ،  $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ ،  $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$  و  $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$  را تشکیل می‌دهند [۲۷].

#### ۴. پیشینه پژوهش

پیش از آنکه پیشینه پژوهش‌های انجام شده در حوزه بازیابی فلز پسماندهای الکترونیکی بیان شود لازم است غلظت بالای فلزات موجود در پسماندهای الکترونیکی نسبت به سنگ‌های معدنی یادآوری شود. پسماندهای الکترونیکی مجموعه‌ای مترکام از فلزات است که چند ده تا چند صد برابر غلظت بیشتری از برخی فلزات را نسبت به سنگ‌های معدنی و حتی بسیاری از پسماندهای جامد در خود جا داده‌اند. به همین ترتیب باید اشاره کرد که در بسیاری از پسماندهای جامد شناخته شده، تعداد عناصری که غلظت نامتعارف دارند، محدود است. مثلاً، در کاتالیست‌های فرسوده آزمایشگاهی با توجه به نوع کاتالیست، یک یا دو فلز از فلزات پلاتین، آلومینیم، رنیم، نیکل، وانادیم، کبالت و مولیبدن مهم و شاخص است [۲۸-۳۱] و [۶]. همچنین، در باتری‌های فرسوده نیکل-کادمیم دو فلز نیکل و کادمیم [۳۲] بیشتر از مقدار متعارف یافت می‌شود؛ در لجن‌های آبکاری نیز با توجه به نوع آبکاری انجام شده می‌تواند کروم و نیکل [۱۶] و یا فلزات آبکاری مورد نظر، نیاز به بازیافت داشته باشند. این درحالی است که پسماندهای الکترونیکی مجموعه‌ای از انواع و اقسام فلزات و مواد مختلف با غلظت‌های بالاست. بنابراین، منطقی است در غالب موارد روشی زیستی سنگ‌های معدنی و یا سایر پسماندهای جامد که به طور تقریبی روش مشابهی برای بازیافت دارند، نسبت به پسماندهای الکترونیکی تا حدی مؤثرتر واقع شود. مثلاً، عوامل مؤثر در روشی زیستی طلا از سنگ‌های معدنی با بهره‌گیری از باکتری کروموباکتریوم و ایلوسم توسط شین و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۳) مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط بهینه، با استفاده از روش تغییر یک عامل در زمان، اسیدیته ۹ و غلظت ۵ گرم بر لیتر از گلیسین تعیین شد. اثر روشی زیستی بر سه نوع

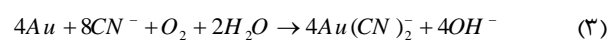
اکسید می‌شوند و مجدداً یون‌های فریک تولید می‌شوند. این عمل به معنای ساختن یک چرخه بین یون‌های فریک و فروس است که طی آن فلزات استخراج می‌شوند. این چرخه نشان می‌دهد که روشی زیستی بر پایه سازوکار نامستقیم بنا شده است. مثلاً، روشی مس با واکنش اکسایش توسط  $\text{Fe}^{+3}$  تشکیل شده توسط باکتری‌ها انجام می‌شود و مس فلزی را بنابر واکنش زیر به حالت مسی تبدیل می‌کند که از نظر ترمودینامیکی مطلوب است [۱].



بنابراین، حضور یون‌های  $\text{Fe}^{+2}$  و اکسایش آن توسط باکتری‌های میان‌دمادوست و گرمادوست، در روشی فلزات نقش اساسی دارند [۱۷].

#### ۳.۲، ۳ سازوکار انحلال زیستی طلا

با توجه به پتانسیل اکسایش یون‌های فریک و پایداری زیاد عنصر طلا، باکتری‌های میان‌دمادوست قادر به استخراج طلا نیستند؛ اما باکتری‌های سیانوزن با تولید سیانید و تشکیل ترکیب طلا-سیانید به انحلال فلز طلا منجر می‌شوند. سازوکار حل شدن طلا در معادن و معادن مصنوعی در محلول سیانیدی یک فرایند الکتروشیمیایی است. واکنش کلی از این قرار است [۱۵]:



در این سازوکار، ریزاندامگانهای سیانوزن، تولید یون‌های سیانید را بر عهده دارند. با توجه به  $\text{pK}_a = 9.3$  در pHهای کم‌تر از ۹/۳، وجود سیانید در حالت  $\text{HCN}$  گازی غالب است و تنفس آن در این حالت بسیار سمی و کشنده خواهد بود. تشکیل ترکیب‌های سیانیدی سبب کاهش میزان تبخیرپذیری سیانید می‌شود [۲۶].

فلز مس عمده‌ترین فلز با‌دارنده در بازیابی طلاست. به دلیل گزینش‌پذیری کم‌تر سیانید برای تشکیل ترکیب با طلا در قیاس با مس، حضور مس سبب کاهش بازیابی طلا می‌شود. تصور می‌شود بازیابی طلای سنگ‌های سولفیدی طلا-مس، در سنگ‌های حاوی

1. Shin et al.

بالا به معنای اقتصادی تر شدن فرایند صنعتی است [۳۶]. در ادامه، ارشدی و موسوی (۲۰۱۵) استخراج طلا از صفحه مدار چاپی رایانه را بررسی کرده‌اند. برای تولید سیانید به عنوان عامل اکساینده، از کشت خالص باکتری *باسیلوس مگاتریوم*، یک باکتری سیانوزن استفاده شده است. برای بیشینه‌سازی استخراج طلا با استفاده از نرم‌افزار سطح پاسخ چهار عامل pH اولیه، چگالی توده، اندازه ذره، و غلظت گلایسین بهینه شده‌اند و شرایط بهینه برای هر یک از عوامل، به ترتیب، ۱۰ گرم بر لیتر، ۲ گرم بر لیتر، مش ۱۰۰، و ۰/۵ گرم بر لیتر به دست آمده است. در شرایط بهینه، ۱۳/۲۶٪ طلا استخراج شده است. برای کاهش اثر بازدارندگی مس در بازیافت طلا، از نمونه‌ای که مس آن با استفاده از روش فروشویی زیستی استفاده کرده‌اند (رسوب مانده در شرایط بهینه پژوهش قبلی [۳۴] به طور کامل استخراج شده است). در این صورت، در شرایط بهینه پیش گفته طلا به میزان ۶۳/۸٪ استخراج شده است [۳۷].

ناتارجان<sup>۲</sup> و تینگ<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۴ بازیابی طلا از پسماندهای الکترونیکی حاوی ۲۸۰ ppm طلا را با استفاده از کروموباکتریوم *وایلووم* آزمایش کرده‌اند. تأثیر انجام پیش تیمار و جهش باکتری برای تحمل شرایط قلیایی بررسی شده است. برای جهش، باکتری وحشی در ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول جهش‌دهنده<sup>۴</sup> ENU در اسیدیتته ۹، ۹/۵ و ۱۰ در فشاری معین قرار داده می‌شود. نتیجه این جهش می‌تواند تحمل pHهای بالاتر، رشد بیشتر و تغییر مؤثر فعالیت‌های سلولی باشد. این روش تنها برای شرایط قلیایی می‌تواند به کار گرفته شود. پیش تیمار با نیتریک اسید سبب حل شدن بسیاری از فلزات اساسی و به دنبال آن کاهش رقابت فلزات مختلف در تشکیل ترکیب با سیانید می‌شود. شرایط قلیایی به افزایش غلظت یون‌های سیانید در دسترس فروشویی زیستی می‌انجامد. به همین دلیل، با جهش باکتری، رشد آن در اسیدیتته ۹، ۹/۵ و ۱۰ بررسی شده است. نتایج حاکی از آن‌اند که در چگالی توده ۰/۵٪ نمونه پیش تیمار شده، باکتری جهش یافته منجر به بازیابی ۱۸، ۲۲/۵ و ۱۹ درصد طلا، به ترتیب، در اسیدیتته‌های ۹، ۹/۵ و ۱۰ شده است در حالی که در اسیدیتته ۷ فقط ۱۱٪ طلا، بازیابی شده است. افزایش چگالی توده، به کاهش بازیابی طلا منجر می‌شود چرا که غلظت‌های بالای فلز سبب کاهش رشد باکتری و تولید سیانید خواهد شد [۳۸].

2. Natarjan

3. Ting

4. N-Nitroso-N-ethyl Urea

سنگ معدنی، به ترتیب، با محتوای طلای ۱/۱۴۹، ۱/۳۴۳ و ۲۱/۲۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مطالعه شده است. بازیابی طلا بدون انجام هیچ‌گونه پیش تیمار بر سنگ‌های معدنی، به ترتیب، صفر، ۵۰ و ۵ درصد گزارش شده و با کوبیدن سنگ‌های معدنی و پیش‌رشد<sup>۱</sup> باکتری، بازیابی، به ترتیب، به ۶۰، ۱۰۰ و ۴۰ درصد ارتقا یافته است [۳۳]. همانطور که در این پژوهش ارائه شد، فروشویی زیستی سنگ‌های معدنی با غلظت طلای ناچیز نسبت به صفحه مدارهای چاپی بدون پیش تیمار کم‌تر از ۵۰ درصد است و حتی در برخی موارد می‌تواند صفر باشد؛ از این رو، حتی با بهبود شرایط، بازیابی کامل طلا از صفحه مدارهای چاپی محتمل به نظر نمی‌رسد. در زیر، پژوهش‌های انجام گرفته روی فروشویی زیستی پسماندهای الکترونیکی ارزیابی شده است.

ارشدی و موسوی (۲۰۱۴) از کشت خالص باکتری اسیددوست *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس* برای بازیافت مس و نیکل از صفحات مدار چاپی رایانه استفاده کردند. هدف این مقاله بیان راههای افزایش استخراج هم‌زمان مس و نیکل با بهینه‌سازی عوامل pH، غلظت اولیه یون‌های فریک، چگالی توده و اندازه ذره بوده است. مرحله خودسازی با غلظت اولیه ۱ گرم بر لیتر آغاز و بعد از ۸۰ روز به غلظت نهایی ۲۰ گرم بر لیتر رسیده است. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار 'Design Expert' مقادیر بهینه pH اولیه، غلظت یون‌های فریک، چگالی توده و اندازه ذره، به ترتیب، ۳، ۸/۴، ۳ گرم بر لیتر، ۲۰ گرم بر لیتر و ۹۵ میکرون برای استخراج بیشینه هم‌زمان مس و نیکل به دست آمده است [۳۴]. همچنین، تحقیق مشابهی روی صفحات مدار چاپی تلفن همراه انجام شد. در این پژوهش، تمامی شرایط آزمایش با آزمایش قبلی مشابه بوده است و تنها تفاوت آنها در نوع نمونه اولیه است. نمونه رایانه به دلیل حضور پلاستیک‌های بیشتر خاصیت قلیایی دارد، در حالی که نمونه تلفن همراه خاصیت خنثی دارد. این تفاوت به ظاهر کوچک، نتایج متفاوتی را به بار آورده است [۳۵]. در نمونه رایانه، نتایج اثبات می‌کنند که برای رسیدن به مقادیر گسترده بازیابی مس، مقادیر زیاد چگالی توده و pH، در حالی که در نمونه تلفن همراه مقادیر کم‌تر چگالی توده و pH مؤثر است. زیرا خاصیت قلیایی نمونه رایانه به این معناست که در اسیدیتته‌های بالاتر امکان حل شدن نمونه و سطح تماس مشترک باکتری‌ها بیشتر می‌شود. pH و چگالی توده

1. Pre-Grown

این روش در مقیاس صنعتی در محیط قلیایی می‌تواند گسترش یابد. غلظت زباله‌های الکترونیکی استفاده شده، به نوع باکتری استفاده شده و فلز مورد نظر بستگی دارد؛ مثلاً، کروموباکتریوم و ایلوسم در غلظت‌های کم‌تر زباله الکترونیکی استفاده شده در استخراج طلا، مس و روی بازدهی بالاتری دارد اما برای استخراج آهن در غلظت‌های بالاتر، بازدهی بیشتری خواهد داشت. فروشوی زیستی طلا و مس از صفحات مدار چاپی تلفن همراه که شامل ۳۴/۵ درصد مس و ۰/۰۲۵ درصد طلا بوده است، با استفاده از کروموباکتریوم و ایلوسم توسط چی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۱) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در چگالی توده ۱۵ گرم بر لیتر، با افزایش اسیدیته از ۱۰ به ۱۱، بازیابی طلا از ۱۰/۸ به ۷/۷۸ و بازیابی مس ۱۱/۴ به ۴/۹ درصد کاهش یافته است. در اسیدیته ۱۰، اکسیژن‌دهی باعث افزایش بازدهی مس به ۲۴/۶ درصد شده است در حالی که بر بازیابی طلا تأثیر چندانی نداشته است [۳۹]. هودک و همکاران<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹، فروشوی فلزات مس، روی و نیکل را با استفاده از /سیدوفیلوم/سیدوفیلوم<sup>۳</sup> برای استخراج فلزهای صفحه مدارهای چاپی رایانه آزموده‌اند. آن‌ها این آزمایش را برای دو غلظت ۸ و ۱۶ گرم بر لیتر صفحات مدار چاپی تکرار کرده‌اند. در جدول‌های (۱) و (۲)، درصد فلزهای فروشوی شده درج شده است. نتایج نشان می‌دهد که باکتری میان‌دمادوست/سیدوفیلوم قادر است مس و روی را فروشوی کند اما در فروشوی نیکل ناتوان است. محیط اسیدی و غلظت‌های کم صفحات مدار چاپی برای رشد باکتری مناسب‌تر است [۴۰].

ویلنر در سال ۲۰۱۳ از کشت خالص باکتری اسیددوست /سیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس برای بازیافت مس از صفحات مدار چاپی استفاده کرد. هدف این مقاله، بررسی برخی عوامل فیزیکی و شیمیایی بر آهنگ فروشوی بوده است. نتایج مطالعه حاکی از این بود که محدوده pH بین ۱/۵ تا ۲ می‌تواند بازیافت مس را بهبود بخشد و اکسایش آهن توسط باکتری در pH بالاتر از ۲/۵ به سرعت کاهش می‌یابد. همچنین، دما عامل مهمی در رشد باکتری است و بیش‌ترین فعالیت این باکتری در محدوده دمایی بین ۲۸ تا ۳۷ درجه سلسیوس است. همچنین، مشاهده شد که در غلظت‌های بالاتری از مایه تلقیح، آهنگ فروشوی مس شتاب می‌گیرد. این مطالعه نشان می‌دهد که در طول مدت ۱۹ روز با استفاده از ۵۰، ۲۰ و ۹۰ درصد از مایه تلقیح می‌توان مس را بیش از ۹۰ درصد بازیافت کرد و این امر حاکی از آن است که فروشوی زیستی از فروشوی شیمیایی مؤثرتر است [۲۲].

پرادهان و کومار در سال ۲۰۱۲، فروشوی فلزات موجود در زباله‌های الکترونیکی را با استفاده از سه باکتری سیانوژن و مخلوطی از آن‌ها آزموده‌اند. باکتری‌های سیانوژن، هم به تنهایی و هم در کشت مخلوط، قادرند با بهره‌های متفاوت، فلزات موجود در پسماندهای الکترونیکی را منتقل کنند. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط محیط قلیایی استفاده از باکتری‌های سیانوژن و مخلوط آن‌ها می‌تواند فلزاتی مانند طلا، آهن، مس، روی و نقره را از پسماندهای الکترونیکی استخراج کند. درصد‌های بالاتری از استخراج فلزات با استفاده از مخلوط باکتری‌ها حاصل شد. فلزات گران‌بهایی چون طلا توسط باکتری‌های سیانوژن می‌تواند به حالت محلول درآید [۴].

جدول ۱. آهنگ فروشوی زیستی فلزات از زباله‌های الکترونیکی با استفاده از انواع متفاوتی از باکتری‌ها در شرایط آزمایشگاهی یکسان [۴].

بیش‌ترین آهنگ فروشوی فلزات (میلی‌گرم / لیتر / روز)				نوع باکتری
طلا	مس	روی	آهن	
۰/۲۵	۱۹/۳۳۶	۰/۰۵۴	۰/۴۷۶	سودوموناس فلئورسنس
۰/۵۳۹	۷۴/۶۵	۰/۰۵۳	۰/۲۵۹	سودوموناس آرژینوسا
۰/۷۱۶	۱۱۰/۷۹	۰/۰۶۴	۰/۲۶۸	کروموباکتریوم و ایلوسم
۰/۵۱۳	۸۸/۹۴	۰/۰۸	۰/۶	سودوموناس فلئورسنس + سودوموناس آرژینوسا
۰/۷۲	۱۱۴/۴۴۹	۰/۰۶۵	۰/۳۶۸	سودوموناس فلئورسنس + کروموباکتریوم و ایلوسم
۰/۶۵۱	۱۰۳/۹۵۶	۰/۰۴۶	۰/۴۲۱	سودوموناس آرژینوسا + کروموباکتریوم و ایلوسم

1. Chi et al.
2. Hudec et al.
3. Acidophilium Acidophilium

جدول ۲. درصد فروشویی فلزها [۴۰].

۸ گرم بر لیتر صفحه مدارهای چاپی		۱۶ گرم بر لیتر صفحه مدارهای چاپی		چگالی توده
عدم حضور باکتری	حضور باکتری	عدم حضور باکتری	حضور باکتری	تأثیر فروشویی زیستی
۰/۹	۹/۱	۰/۲	۳/۶	مس
۷۸/۸	۸۰/۸	۸۵/۹	۸۶/۰	نیکل
۱۰/۶	۳۰/۶	۶/۴	۴۰/۸	روی

اسیددوست، و برای بازیافت طلا از ریزاندامگانه‌های سیانوژن استفاده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، با توجه به غلظت فلزات موجود در زباله‌های الکترونیکی، مهم‌ترین فلزات که در غالب پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند، عبارتند از مس، نیکل، روی، آلومینیم، آهن و طلا. در غالب موارد، بازیافت فلزات اساسی بیش از ۸۰ درصد و بسیاری اوقات حدود ۱۰۰ درصد گزارش شده است. باکتری *اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس* به بازیابی کامل دو فلز مس و نیکل منجر شده است. برای فلز طلا، فروشویی زیستی در هیچ موردی به بازیافت کامل منجر نشده است و بیشینه بازیابی گزارش شده در صورت پیش‌تیمار نمونه حدود ۶۰ درصد است. غلظت فلزات موجود در انواع پسماندهای الکترونیکی بسیار متفاوت است. مثلاً، میزان طلای موجود در صفحه مدارهای چاپی رایانه کمتر از ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و در صفحه مدارهای چاپی تلفن همراه ۱۸۰۰ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است. فلز مس موجود در صفحه مدارهای چاپی رایانه حدود ۴۰ درصد و برای تلفن همراه کمتر از ۷ درصد گزارش شده است. بازیابی طلا در صفحه مدارهای چاپی رایانه نسبت به تلفن همراه بیشتر گزارش شده است. باکتری‌های سیانوژن هر یک به میزان معینی توانایی تولید سیانید و استخراج طلا دارند [۳۶] بنابراین، منطقی است که با افزایش مقدار طلا درصد بازیابی کاهش می‌یابد. هم‌چنین، وجود سایر فلزات از جمله بازیابی طلا را کاهش می‌دهد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای افزایش بازیابی و اقتصادی‌تر شدن بازیافت با انتخاب مخلوط مناسبی از پسماندهای الکترونیکی میزان بازیافت طلا را به بیشینه مقدار و اثر مزاحمت سایر فلزات را به حداقل رساند.

استخراج فلزات طلا، نقره و پلاتین از زباله‌های جامد با استفاده از ریزاندامگانه‌های سیانوژن توسط برنسدل و همکاران (۲۰۰۸) مورد مطالعه قرار گرفته است. آنان گزارش داده‌اند که پنج درصد نقره پسماند پودر جواهرات بعد از یک روز به صورت زیستی استخراج شده است؛ اگرچه فروشویی شیمیایی با بهره‌گیری از سیانید منجر به استخراج کامل نقره شد. ۶۸/۵ درصد از طلای موجود در پسماندهای صفحات مدار چاپی و تنها ۰/۲ درصد از فلز پلاتین موجود در مبدل‌های کاتالیتیکی ماشین‌های متحرک فرسوده به روش زیستی استخراج شد [۴۱].

الیاس و همکاران<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۷، در پژوهشی امکان فروشویی زیستی فلزات پسماندهای الکترونیکی را بررسی کرده‌اند. آنان از مخلوط باکتری‌های گرمادوست معتدل *سولفوباسیلوس ترموسولفیدواکسیدانس* و یک باکتری نامشخص از خانواده اسیددوست دگرپرورد برای حل کردن فلزات صفحات مدار چاپی استفاده کرده‌اند. مس ۸/۵ درصد، آهن ۸/۳، روی ۸/۱، سرب ۳/۱۵ و نیکل ۲ درصد ماده اولیه را تشکیل می‌دهد که در مجموع حدود ۳۰ درصد فلزات کل را شامل می‌شود. استفاده از مخلوط این دو ریزاندامگان بیش‌ترین نرخ بهره‌وری را دارد. نتایج نشان می‌دهند که در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر از اوراق، کشت مخلوط باکتری‌های یادشده سازگار شده، می‌توانند نیکل، مس، آلومینیم و روی را به ترتیب ۸۱، ۸۹، ۷۹، ۸۳ درصد به حالت محلول درآورند [۴۲].

خلاصه نتایج فعالیت‌های صورت گرفته برای بازیافت زباله‌های الکترونیکی در جدول (۳) درج شده است. برای بازیافت فلزات اساسی موجود در پسماندهای الکترونیکی از باکتری‌های

1. Ilyas et al.



جدول ۳. خلاصه فعالیت‌های صورت گرفته در فروشویی فلزات پسماندهای الکترونیکی.

منبع	غلظت فلز بازیابی شده	میزان فلز بازیابی شده	ریزاندامگان	زباله الکترونیکی
[۳۴]	۶۳۸۲ میلی‌گرم بر لیتر نیکل، ۳۹۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر	<i>pH</i> اولیه ۳، غلظت اولیه یون‌های فریک ۸/۴ گرم بر لیتر، چگالی توده ۲۰ گرم بر لیتر، اندازه ذره ۹۵ میکرون ۱۰۰٪ مس، ۱۰۰٪ نیکل	اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس	صفحه مدارهای چاپی رایانه
[۳۵]	۱۳۹۲۴ میلی‌گرم بر لیتر نیکل، ۶۶۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مس	<i>pH</i> اولیه ۱، غلظت اولیه یون‌های فریک ۴/۱۸ گرم بر لیتر، چگالی توده ۸/۵ گرم بر لیتر، مش ۱۰۰ ۱۰۰٪ مس و ۱۰۰٪ نیکل	اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس	صفحه مدارهای چاپی تلفن همراه
[۳۷]	۲۰۴ میلی‌گرم بر لیتر طلا	<i>pH</i> اولیه ۱۰، چگالی توده ۲ گرم بر لیتر، مش ۱۰۰، غلظت اولیه گلاسیسین ۰/۵ گرم بر لیتر ۳۶/۸٪ طلا، ۶۳/۸٪ طلا با پیش‌تیمار میکروبی اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس	باسیلوس مگاتریوم	صفحه مدارهای چاپی رایانه
[۳۸]	۲۸۰ میلی‌گرم بر لیتر طلا	<i>pH</i> اولیه ۹/۵، چگالی توده ۰/۵٪، اندازه ذره کم- تر از ۱۰۰ میکرون ۲۲/۵٪ طلا	کروموباکتریوم وایلوسم	اوراق قطعات الکترونیکی
[۲۲]	۳۵۹۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر مس	۹۶/۷٪ مس <i>pH</i> اولیه ۱/۵ تا ۲، اندازه ذره کم‌تر از ۰/۵ میلی- متر	اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس	صفحه مدارهای چاپی
[۴]	۸۴۰، ۱۲۰۰۰۰، ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر طلا، مس و آهن	۰/۲۵، ۱۹/۳، ۰/۴۸ میلی‌گرم بر لیتر بر روز به ترتیب طلا، مس، و آهن	سودوموناس فلئورسنس	صفحه مدارهای چاپی رایانه‌های شخصی
		۰/۵۳، ۷۴/۷، ۰/۴۸ میلی‌گرم بر لیتر بر روز به ترتیب طلا، مس، و آهن	سودوموناس آرژینوس	
		۰/۷۱، ۱۱۰/۸، ۰/۲۷ میلی‌گرم بر لیتر بر روز به ترتیب طلا، مس، و آهن	کروموباکتریوم وایلوسم	
[۳۹]	۲۵۰ و ۳۴۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب مس و طلا	چگالی توده ۱۵ گرم بر لیتر، <i>pH</i> اولیه ۱۰ بازیابی ۱۰/۸ و ۱۱/۴ درصد به ترتیب طلا و مس	کروموباکتریوم وایلوسم	صفحه مدارهای چاپی تلفن همراه
[۴۰]	ذکر نشده است	<i>pH</i> اولیه ۳/۵، ۸ گرم بر لیتر بازیابی ۹/۱، ۸۰/۸ و ۳۰/۶ درصد به ترتیب مس، نیکل و روی	اسیدوفیلوم اسیدوفیلوم	صفحه مدار چاپی رایانه
[۴۲]	مس، آهن، روی، سرب و نیکل به ترتیب ۸/۵، ۸/۱، ۳/۱۵ و ۲ درصد	چگالی توده ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر نیکل، مس، آلومینیم و روی به ترتیب ۸۱، ۸۹، ۷۹ و ۸۳ درصد	سولفوباسیلوس ترموسولفیدواکسیدانس و یک باکتری نامشخص از خانواده اسیددوست دگرپرورد	اوراق قطعات الکترونیکی

زیستی، دوستدار محیط زیست، مؤثر و نوین‌اند و در بسیاری موارد در استخراج فلزات بسیار توانا ارزیابی شده‌اند. برای استخراج فلزاتی مانند مس و نیکل، باکتری گونه اسیددوست به خصوص اسیدوتیوباسیلوس فرواکسیدانس، و برای استخراج فلزات نجیب، مانند طلا باکتری‌های گونه سیانوژن، به ویژه باسیلوس مگاتریوم بسیار مؤثر و توانمند شناخته شد. گزارش‌ها نشان می‌دهند این روش قادر است فلزاتی چون مس، نیکل و روی و سایر فلزات مشابه را به طور کامل استخراج کند. به دلیل خاصیت ذاتی طلا، بیشینه استخراج طلا در روش‌های زیستی حدود ۶۰ درصد گزارش شده است. در ایران نیز به نظر می‌رسد تا چند سال آینده مخاطرات انباشت پسماندهای الکترونیکی در کنار فقدان مجرای مناسبی برای بازیافت، گریبان‌گیر کشور شود. از این رو شناخت بیشتر روش‌های زیستی و تلفیق آن با سایر روش‌های بازیافت می‌تواند راه‌حلی برای این معضل باشد.

### مراجع

- [1] Jadhav, U., Hocheng, H., "Extraction of silver from spent silver oxide-zinc button cells by using Acidithiobacillus ferrooxidans culture supernatant", *J. Clean. Prod.* 44, 39-44, (2013).
- [2] Mishra, D., Rhee, Y., "Current research trends of microbiological leaching for metal recovery from industrial wastes", *Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology A. Mendez-Vilas (Ed.)*. 1289-1296, (2010).
- [۳] دارایی، حامد، یغمایی، سهیلا، زباله‌های تجهیزات الکترونیکی و الکترونیکی یک منبع با ارزش جهت بازیافت. دوماهنامه مهندسی شیمی ایران، سال یازدهم، شماره ۶۲، (۱۳۹۱).
- [4] Pradhan, J. K., Kumar, S., "Metals bioleaching from electronic waste by *Chromobacterium violaceum* and *Pseudomonas sp.*", *Waste. Manage. Res.* 30, 1151-1159, (2012).
- [5] Bertram, M., Graedel, T. E., Rechberger, H., Spataro, S., "The contemporary European copper cycle: waste management subsystem", *Ecol. Econ.* 42, 43-57, (2002).
- [6] Pradhan, D., Patra, A. K., Kim, D. J., Chung, H. S., Lee, S.W., "A novel sequential process of bioleaching and chemical leaching for dissolving Ni, V, and Mo from spent petroleum refinery catalyst", *hydrometallurgy*. 131-132, 114-119, (2013).

### ۵. بازیافت پسماندهای الکترونیکی در ایران

کشورهای بزرگ و توسعه یافته اروپایی و آمریکایی این زباله‌ها را به صورت غیر قانونی به کشورهای جهان سوم می‌فرستند و جهنم واقعی پسماندهای الکترونیکی و تأثیر ویرانگر آنها، نه در چین یا قاره آسیا که جایی در غرب قاره آفریقا و در قلب کشور غناست. حاشیه پایتخت غنا تبدیل به یکی از بزرگ‌ترین گورستانهای پسماند الکترونیکی و مسموم‌ترین محیط‌زیست جهان شده است [۴۳]. در ایران، ۴۸ میلیون گوشی تلفن همراه فعال است و در هر سال ۳ تا ۴ میلیون دستگاه از آنها از رده خارج می‌شود و به طور کلی وزن دستگاه‌های الکترونیکی خارج از رده، ۴ میلیون تن در سال است. بنابر برآوردها طی چند سال اخیر هر ساله یک میلیون و ۲۰۰ هزار تا یک میلیون و ۵۰۰ هزار رایانه در ایران مونتاژ شده است [۴۳] و از حدود ۴/۵ میلیون رایانه، هر سال حدود ۸۰۰ هزار دستگاه از رده خارج می‌شود [۴۴].

در ایران، غالب این پسماندها در مرکزی در محله شوش تهران جمع‌آوری و به کشورهای دیگری چون مالزی و ترکیه صادر می‌شود. در واقع کشورهای مقصد سود واقعی از این زباله‌ها را به دست می‌آورند و بعد از تبدیل فلزات گرانبه‌ای آن دوباره به کشور مبدأ صادر می‌کنند. البته، تنها یک مجرای رسمی بازیافت برای این پسماندها یعنی شهرداری مشهد وجود دارد که روزانه ۸۰۰ کیلو یا سالانه ۳۰۰ تن را بازیافت می‌کند [۴۴]. اگرچه این بازیافت به معنای استخراج فلزات و بهره‌برداری مجدد از آنها نیست، بلکه تنها مقداری این پسماندها تغلیظ می‌شود.

### ۶. نتیجه‌گیری کلی

پسماندهای الکترونیکی از مهم‌ترین پسماندهای قرن بیست و یکم به شمار می‌آیند و باید روشی مؤثر برای مدیریت این زباله‌های خطرناک یافت. یکی از روش‌های مهم مدیریتی، بازیافت این زباله‌ها است. صفحه مدارهای چاپی (به ویژه صفحه مدار چاپی تلفن همراه و رایانه)، حامل اصلی فلزات گرانبه‌ها و خطرناک در میان پسماندها هستند. برای بازیافت فلزات موجود در این پسماند، روش‌های سنتی پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی، به دلیل انرژی‌خواهی بالا، پرهزینه بودن و تولید بسیار زیاد مواد ویرانگر محیط زیست توسعه یافته نیستند. روش‌های زیست‌هیدرومتالورژی شامل روش‌های

- [7] Willner, J., Fornalczyk, A., "Extraction of metals from electronic waste by bacterial leaching", *Environ. Prot. Eng.* 39, 197-208, (2013).
- [8] Behnam Fard, A., Salarirad, M. M., Veglio, F., "Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation", *Waste. Manage.* 33, 2354-2363, (2013).
- [9] Schlupe, M., Hagelueken, C., Kuehr, R., Magalini, F., Maurer, C., Meskers, C., Mueller, E., Wang, F., "Recycling from e-waste to resource, solving the e-waste problem (StEP)", report commissioned by the United nation environment problem (UNEP). (2009).
- [10] Cui, J., Zhang, L., "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review", *J. Hazard. Mater.* 158, 228-256, (2008).
- [11] Askari, A., Ghadimzadeh, A., Gomes, C., Bakri Ishak, M. D., "E-waste management: towards and appropriate policy", *European journal of business and management.* 6, 37-46, (2014).
- [12] Yamane, L. H., Moraes, V. T., Espinosa, D. C. R., Tenorio, J. A. S., "Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers", *Waste. Manage.* 31, 2553-2558, (2011).
- [13] Hagelueken, C., Meskers, C. E. M., "Mining our computers-opportunities and challenges to recover scarce and valuable metals from End-of-life electronic device", *Electronics goes green conference.* 585-590, (2008).
- [14] Fogarasi, S., Imre-Lucaci, F., Imre-Lucaci, A., Ilea, P., "Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation", *J. Hazard. Mater.* 273, 215-221, (2014).
- [15] Syed, S., "Recovery of gold from secondary sources-A review", *Hydrometallurgy.* 115-116, 30-51, (2012).
- [16] Rastegar, S. O., Mousavi, S. M., Shojaosadati, S. A., "Cr and Ni recovery during bioleaching of dewatered metal-plating sludge using *Acidithiobacillus ferrooxidans*", *Bioresource. Technol.* 167, 61-68, (2014).
- [17] Lee, J. C., Pandey, B. D., Bioprocessing of solid wastes and secondary resources for metal extraction - A review, *Waste. Manage.* 32, 3-18, (2012).
- [18] Huang, K., Guo, J., Xu, Z., "Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in china", *Hazard. Mater.* 164, 399-408, (2009).
- [19] میر، ف.، یغمایی، س.، موسوی، س. م.، استفاده از روش فروشویی زیستی در سمیت‌زدایی و بازیابی فلزات ارزشمند از کاتالیزگرهای مستعمل. دومانه مهندسی شیمی ایران، سال نهم، شماره ۵۰، (۱۳۸۹).
- [20] Brandle, H., "Microbial leaching of metals", *Biotechnology.* 10, 191-224, (2001).
- [21] Simsek, O., Arisoy, M., "A new approach for evaluating wastes: Bioleaching", *Hacettepe Journal of Biology and Chemistry,* 35(1), 17-24, (2007).
- [22] Willner, J., Influence of physical and chemical factors on biological leaching process of copper from printed circuit boards, *Metalurgia.* 52, 189-192, (2013).
- [23] Veit, H. M., Bernardes, A. M., "Electronic wastes recycling techniques", 1th edition. 5th chapter. Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London. 50-51, (2015).
- [۲۴] موسوی، س. م. بررسی تجربی و مدلسازی ریاضی فرایند استخراج بیولوژیکی (فروشویی زیستی) فلزات از کانیهای کم عیار به روش توده ای. پایان نامه دکتری. دانشگاه صنعتی شریف، تهران. (۱۳۸۶).
- [25] Mishra, D., Kim, D., Ahn, J., Rhee, Y., "Bioleaching: A microbial process of metal recovery; A review", *Metals and Materials International,* 11(3), 249-256, (2005).
- [26] Faramarzi, M. A., Brandl, H., "Formation of water-soluble metal cyanide complexes from solid minerals by *Pseudomonas plecoglossicida*", *FEMS Microbiol Lett.* 259, 47-52, (2006).
- [27] Rees, K. L., Deventer, J. S. J. V., "The role of metal-cyanide species in leaching gold from a copper concentrate", *Miner. Eng.* 12, 877-892, (1999).
- [28] Mafi Gholami, R., Borghei, S. M., Mousavi, S. M., "Bacterial leaching of a spent Mo-Co-Ni refinery catalyst using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*", *Hydrometallurgy.* 106, 26-31, (2011).
- [29] Motaghd, M., Mousavi, S. M., Rastegar, S. O., Shojaosadati, S. A., "Platinum and rhenium extraction from a spent refinery catalyst using *Bacillus megaterium* as a cyanogenic bacterium: statistical modeling and process optimization", *Bioresource. Technol.* 171, 401-409, (2014).
- [30] Asghari, I., Mousavi, S. M., Amiri, F., Tavassoli, S., "Bioleaching of spent refinery catalysts: A review", *J. Indust. Eng. Chem.* 19, 1069-1081, (2013).
- [31] Gerayeli, F., Ghojavand, F., Mousavi, S. M., Yaghmaei, S., Amiri, F., "Screening and optimization of effective parameters in biological extraction of heavy metals from refinery spent catalysts using a thermophilic bacterium", *Sep. Purif. Technol.* 118, 151-161, (2013).
- [32] Ijadi Bajestani, M., Mousavi, S. M., Shojaosadati, S. A., "Bioleaching of heavy metals from spent household batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*: statistical evaluation and optimization". *Sep. Purif. Technol.* 132, 309-316, (2014).
- [33] Shin, D., Jeong, J., Lee, S., Pandey, B. D., Lee, J., "Evaluation of bioleaching factors on gold recovery from ore by cyanide-producing bacteria", *Miner. Eng.* 48, 20-24, (2013).
- [34] Arshadi, M., Mousavi, S. M., "Simultaneous recovery of Ni and Cu from computer-printed circuit boards using bioleaching: Statistical evaluation and optimization", *Bioresource. Technol.* 174, 233-242, (2014).
- [35] Arshadi, M., Mousavi, S. M., "Multi-objective optimization of heavy metals bioleaching from

- discarded mobile phone PCBs: Simultaneous Cu and Ni recovery using *Acidithiobacillus ferrooxidans*". Sep. Purif. Technol. 147, 210-219, (2015).
- [36] Arshadi, M., Mousavi, S. M., "Statistical evaluation of bioleaching of mobile phone and computer waste PCBs: A comparative study". AMR.1104, 87-92, (2015).
- [37] Arshadi, M., Mousavi, S. M., "Enhancement of simultaneous gold and copper extraction from computer printed circuit boards waste using *Bacillus megaterium*", Bioresource. Technol. 175, 315-324, (2015).
- [38] Natarajan, G., Ting, Y., "Pretreatment of e-waste and mutation of alkali-tolerant cyanogenic bacteria promote gold biorecovery", Bioresource. Technol. 152, 80-85, (2014).
- [39] Chi, T. D., Lee, J., Pandey, B. D., Yoo, K., Jeong, J., "Bioleaching of gold and copper from waste mobile phone PCBs by using a cyanogenic bacterium" Miner. Eng. 24, 1219-1222, (2011).
- [40] Hudec, M. A. R., Sodhi, M., Goglia-Arora, D., "Biorecovery of metals from electronic waste", 7th latin American and Caribbean conference for engineering and technology. (2009).
- [41] Brandle, H., Lehmann, S., Faramarzi, M. A. Martinelli, D., "Biomobilization of silver, gold, and platinum from solid waste materials by HCN-forming microorganisms", Hydrometallurgy. 94, 14-17, (2008).
- [42] Ilyas, S., Anwar, M. A., Niazi, S. B., Ghauri, M. A., "Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria", Hydrometallurgy. 88, 180-188, (2007).
- [۴۳] فراهانی‌جم، ف.، «دغدغه جهان برای رهایی از زباله‌های الکترونیکی» (www.aftabir.com). (۱۳۸۹).
- [۴۴] معلمی، س. م.، «فقط ۳۰۰ تن از ۴ میلیون تن پسماند الکترونیکی خطرناک در کشور بازیافت می‌شود.» خراسان روزنامه صبح ایران. (۱۳۹۱).