

# مروری بر روش‌های بازیابی فلزها از زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی با تأکید بر روش فروشویی زیستی

محمد صادقی صادق‌آباد، نازنین بهاء‌لو هوره، سیما نیکفر، سید محمد موسوی\*<sup>+</sup>

گروه بیوتکنولوژی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

**چکیده:** با پیشرفت و صنعتی شدن جامعه‌ها، تقاضا برای فلزهای سنگین رو به افزایش است، این در حالی است که معدن‌های سنگ معدن غنی از این فلزها رو به کاهش گذاشته‌اند. امروزه منبع‌های ثانویه دیگری که دارای عیار بالاتری از این فلزها هستند مورد توجه قرار گرفته‌اند، از جمله کاتالیزورهای فرسوده، خاکسترهای بادی، لجن آبکاری و مهم‌ترین آن‌ها زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی. بازیابی فلزهای سنگین از این منبع‌های ثانویه به کمک روش‌های متداول مانند پیرومتالورژی و هیدرومتالورژی با محدودیت‌هایی از جمله مصرف بالای انرژی، هزینه‌های بالا، خطر آلودگی محیط‌زیست و تهدید سلامت عمومی همراه است. با توجه به سخت‌گیرتر شدن قانون‌های مربوط به حفاظت محیط‌زیست، به ویژه در دفع زباله‌های سمی و هزینه‌ی مربوط به اعمال این قانون‌ها نیاز به فناوری و روش‌های نوین، زیست‌سازگار و مؤثرتری به منظور بازیابی با بهره‌ی بالا بیش‌ازپیش احساس می‌شود. در این مطالعه به روش‌های بازیافت زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی که شامل روش‌های پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی و بیوهیدرومتالورژی است، پرداخته شده و از این میان روش فروشویی زیستی به عنوان روشی مؤثر، ارزان و همگام با محیط‌زیست معرفی و بررسی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** منابع ثانویه؛ زباله‌های الکتریکی؛ فلزهای سنگین؛ فروشویی زیستی.

**Keywords:** Secondary sources; Electrical wastes; Heavy metals; Bioleaching.

## مقدمه

طلا هستند. فلزهای سنگین اثرهای مخربی بر محیط‌زیست و سلامت انسان می‌گذارند. این فلزها نمی‌توانند به صورت زیستی به فرآورده‌های بی‌خطر تبدیل شوند و اغلب وارد آب‌های زیرزمینی می‌شوند. بعضی از آن‌ها به دلیل نیمه‌عمر طولانی تا مدت‌ها در طبیعت باقی می‌مانند. به همین دلیل بازیافت ترکیب‌های سمی و یا بارزش از این زباله‌ها به یک نیاز مطلق تبدیل شده است [۲-۴]. جدول ۱ انواع گوناگون زباله‌های صنعتی و فلزهای جامد موجود در آن‌ها را نشان می‌دهد.

با توسعه‌ی تدریجی جوامع صنعتی، کاهش منابع طبیعی و تغییرهای آب و هوایی، محافظت و پایداری محیط‌زیست اهمیتی دوچندان یافته است. تمرکز در مدیریت و حفاظت از منابع طبیعی محیط‌زیست، مدیریت زباله، پیشگیری و برطرف کردن آلودگی و حفظ تنوع زیستی از مهم‌ترین عامل‌ها در دست یافتن به این امر مهم است [۱]. امروزه آلودگی ناشی از زباله‌های جامد از مهم‌ترین مسایل مربوط به حوزه‌ی زیست‌محیطی است. برخی از این زباله‌ها دارای فلزهای سنگین مانند کروم، کبالت، کادمیم، مولیبدن، نقره و

\*عهده دار مکاتبات

+E-mail: mousavi\_m@modares.ac.ir

جدول ۱- انواع زباله‌های صنعتی خطرناک و فلزهای موجود در آن‌ها [۵].

نوع زباله	فلزهای موجود در زباله
باتری‌های مستعمل	نیکل، کادمیم، نقره
زباله‌های الکترونیکی	مس، سلنیوم، طلا، نقره، نیکل، روی، آلومینیوم
زباله‌ی فیلم‌های اشعه ایکس	نقره
خاکسترهای بادی	مس، روی، نیکل، آلومینیوم، کروم، سرب
کاتالیست‌های مستعمل نفت خام	نیکل، کبالت، مولیبدن

صنعت الکترونیک یکی از صنایع مهم در جهان است. این صنعت به‌طور پیوسته در دهه‌های اخیر رشد کرده و باعث توسعه فناوری شده است؛ این درحالی است که تقاضا برای مواد خام کمیاب یا نادر (برای نمونه فلزهای گران‌بها و عنصرهای خاکی کمیاب) که در این وسیله‌ها استفاده می‌شوند نیز افزایش یافته است. این پیشرفت، محیط‌زیست را به دو طریق تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ اول با حجم عظیم تجهیزهایی که هر ساله دور ریخته می‌شوند و دوم با استخراج مواد خام طبیعی به‌منظور تأمین تقاضای تجهیزهای جدید صنعت که هر دو مورد را می‌توان با میزان تجهیزهایی که هر ساله بسیاری از کشورها تولید و دور می‌اندازند، اندازه‌گیری کرد [۱۱].

عمر کوتاه تجهیزها و وسیله‌های الکترونیکی از یک سو و تنوع‌طلبی مردم به استفاده از تجهیزهای الکترونیکی نوین، بحث زباله‌های الکترونیکی را به مشکلی بزرگ در دنیا تبدیل کرده است. به‌طور کلی باید گفت اگرچه در سال‌های اخیر فناوری‌های نوین در عرصه الکترونیک سبب بهبود وضعیت زندگی انسان شده‌اند، ولی با مشکل‌های تازه ناشی از تولید زباله‌های الکترونیکی روبرو شده‌ایم که نه تنها در مقایسه با پسماندهای خانگی با سرعت بیشتری رو به افزایش‌اند بلکه دارای مواد خطرناک‌تر و سمی‌تر نیز هستند. وجود برخی از آن‌ها در محیط می‌تواند باعث شیوع بیماری‌های گوناگون مانند کمبود آهن، آسیب‌های مغزی و انواع سرطان در سطح جامعه بشود؛ این در حالی است که زباله‌های الکترونیکی تنها شامل ۷ درصد از حجم کل زباله‌های جمع‌آوری شده در کشورهای بزرگ می‌شوند، اما ۷۰ درصد زباله‌های دارای مواد سمی را تشکیل می‌دهند. طرفداران محیط‌زیست معتقدند کشورهای صنعتی با صدور زباله‌های الکترونیکی خود به کشورهای در حال توسعه، افزون بر این که هزینه‌های بعدی بازیافت

به دلیل استفاده گسترده از وسیله‌های الکترونیکی، زباله‌های الکترونیکی و الکتریکی<sup>(۱)</sup> از جمله تلفن‌های همراه، صفحه‌های نمایشگر، تلویزیون، یخچال و باتری‌ها به یکی از مهم‌ترین زباله‌های قرن حاضر تبدیل شده‌اند [۶]. بر اساس یک پژوهش انجام‌شده توسط دانشگاه ملل متحد<sup>(۲)</sup>، مقدار کل زباله‌های الکترونیکی<sup>(۳)</sup> در سال ۲۰۱۵ میلادی به ۴۱/۸ میلیون تن رسیده است و پیش‌بینی شده با افزایش ۲۱ درصدی به ۵۰ میلیون تن در سال ۲۰۱۸ میلادی می‌رسد. دفع نامناسب زباله‌های الکترونیکی می‌تواند منجر به افزایش زیاد آلودگی‌های فلزهای سمی و ترکیب‌های آلی شود. همچنین این پژوهش نشان داد که ۱/۹ میلیون تن فلزهای باارزش قابل بازیافت ترکیب عمده زباله‌های الکترونیکی موجود را تشکیل داده است؛ به‌عبارت‌دیگر می‌توان به این زباله‌ها به‌عنوان یک معدن ساخته‌شده توسط انسان برای تبدیل زباله به ثروت نگاه کرد [۷]. زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی دارای مقدار فلزهای بیش‌تری نسبت به سنگ‌های معدن مربوطه هستند که همین امر باعث ترغیب بازیابی آن‌ها می‌شود. بزرگ‌ترین محرک در بازیابی زباله‌های الکتریکی، استخراج فلزهای ارزشمندی از جمله طلا، نقره، مس و روی است. جدول ۲ نشان‌دهنده‌ی یک مقایسه بین میزان مس و طلا در سنگ معدن طبیعی آن‌ها و مدارهای چاپی به‌عنوان منبع ثانویه است [۸، ۹].

## زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی

زباله‌ی وسیله‌های الکتریکی و الکترونیکی تعریف وسیله‌های است که از الکتریسیته استفاده می‌کنند ولی عمر آن‌ها پایان یافته است و به زباله و مواد دورریختنی تبدیل شده‌اند. زباله‌ی وسیله‌های الکتریکی و الکترونیکی به طور معمول با نام زباله‌ی الکترونیکی یاد می‌شوند [۱۰].

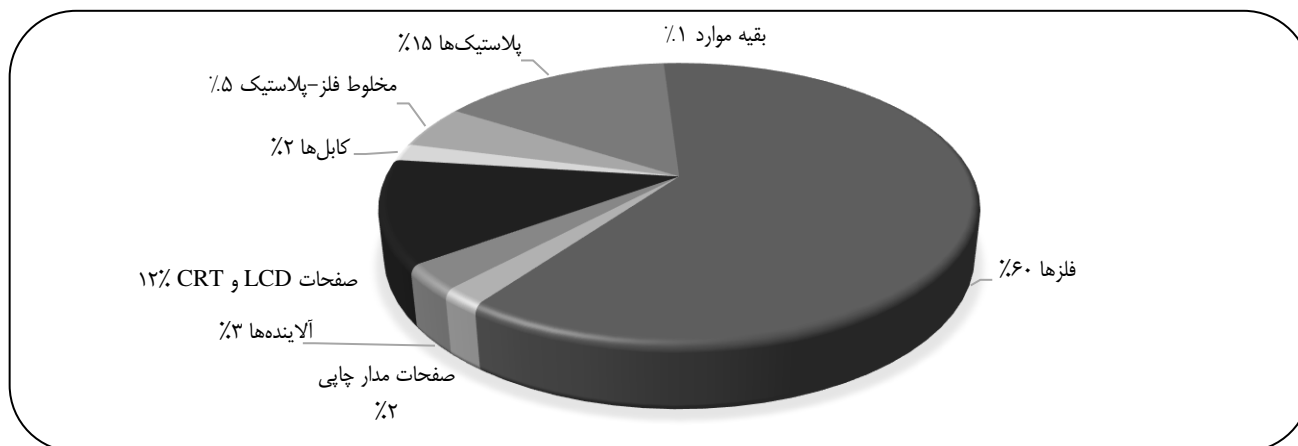
(۱) Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

(۳) E-Wastes

(۲) United Nations University

جدول ۲- میزان مس و طلا در سنگ‌های معدن و مدارهای چاپی [۹].

غلظت در مدار چاپی	غلظت در سنگ معدن طبیعی	فلز
۲۰۰ کیلوگرم بر تن (۲۰٪)	۵-۱۰ کیلوگرم بر تن (۰/۵-۱٪)	مس
۲۵۰ گرم بر تن (۰/۰۲۵٪)	۱-۱۰ گرم بر تن (۰/۰۰۱-۰/۰۰۱٪)	طلا



شکل ۱- تقسیم‌بندی مواد متداول موجود در زباله‌های الکترونیکی [۱۳].

شکل ۱ تقسیم‌بندی مواد متداول موجود در زباله‌های الکترونیکی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل می‌توان دید، بیش‌ترین مواد موجود در زباله‌های الکترونیکی را فلزها (۶۰٪) تشکیل می‌دهند و پلاستیک‌ها (۱۵٪)، صفحه‌های نمایشگر کریستال مایع (LCD) (۳) و لوله پرتو کاتدی (CRT) (۴) (۱۲٪)، مخلوط فلز و پلاستیک (۵٪)، آلاینده‌ها (۳٪)، کابل‌ها (۲٪)، صفحه‌های مدار چاپی (۲٪) و دیگر موردها (۱٪) سایر مواد تشکیل دهنده زباله‌های الکترونیکی هستند [۱۳].

### خطرهای سلامتی ناشی از اجزای زباله‌های الکترونیکی

سازمان‌های گوناگون حفاظت از محیط‌زیست در سراسر جهان زباله‌های الکترونیکی را خطرناک خوانده‌اند، چراکه دارای ترکیب‌های شیمیایی سمی بوده و برای سلامت انسان و محیط‌زیست مضر هستند. زباله‌های الکترونیکی به این دلیل برای انسان و محیط‌زیست سمی در نظر گرفته شده‌اند که دارای ترکیب‌های معدنی مانند جیوه، سرب، کادمیم، نیکل، آنتیموان، آرسنیک و کروم و همچنین ترکیب‌های آلی مانند بی‌فنیل‌های چندکلره (۴)،

زباله‌ها را به کشورهای در حال توسعه تحمیل می‌کنند، به محیط‌زیست و ساکنان این کشورها نیز صدمه وارد می‌کنند [۱۲].

ترکیب شیمیایی زباله‌های الکترونیکی بسته به نوع هر وسیله متفاوت است. برای نمونه تلویزیون‌های ال‌ای‌دی مقدار زیادی پلیمر در خود دارند درحالی‌که اجاق گاز و مایکروفرها مقدار زیادی فلز را در خود جای داده‌اند. به‌طور کل مجموعه‌ای از فلزها را می‌توان در زباله‌های الکترونیکی یافت، مانند مس، آهن، آلومینیوم و حتی فلزهای گران‌بها مانند طلا، نقره و پالادیم که در کنار مخلوطی از پلیمرها مانند پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌اورتان و دیگر مواد قرار دارند. زباله‌های الکترونیکی ممکن است دارای مواد سرامیکی، شیشه و دیگر مواد معدنی، آلی و حتی رادیواکتیو نیز باشند. غلظت ترکیب‌های موجود در زباله‌های الکترونیکی بسته به نوع وسیله، سال ساخت و تولیدکننده‌ی آن متفاوت است. به عنوان نمونه، یخزن‌های قدیمی که دارای مبرد کلروفلئوروکربن بودند، با تنظیم و تصویب پروتکل مونترال (۱) در سال ۱۹۸۹ میلادی و پذیرفتن آن توسط کشورهای عضو، تولیدکنندگان یخزن این گاز سمی را با گاز بی‌اثر دیگری در دستگاه‌های جدید جایگزین کردند [۱۱].

(۱) Montreal Protocol

(۲) Liquid Crystal Display

(۳) Cathode Ray Tube

(۴) Polychlorinated Biphenyls (PCBs)

جدول ۳- فلزهای خطرناک موجود در زباله‌های الکترونیکی [۱۴].

عنصر	نوع زباله‌های الکترونیکی	محیط‌های آلوده‌کننده	راه‌های تماس با انسان
سرب	صفحه‌های مدار چاپی، لوله پرتو کاتدی، لامپ، تلویزیون، باتری	هوا، گردوغبار، آب‌وخاک	استنشاق، بلعیدن و تماس پوستی
کروم	نوار داده، فلاپی دیسک	هوا، گردوغبار، آب‌وخاک	استنشاق و بلعیدن
کادمیم	سوئیچ، رباط‌ها، صفحه‌های مدار چاپی، باتری، آشکارساز فرسوخ، تراشه‌ها، تلفن همراه، لوله پرتو کاتدی	هوا، گردوغبار، خاک، آب و غذا (برنج و سبزیجات)	استنشاق و بلعیدن
جیوه	دماپا <sup>(۱)</sup> ، حسگر، نمایشگر، صفحه‌های مدار چاپی، لامپ فلورسنت، نمایشگر کریستال مایع	هوا، بخار آب، آب، خاک و غذا (ماهی)	استنشاق، بلعیدن و تماس پوستی
روی	لوله پرتو کاتدی، پوشش‌دهنده فلزی <sup>(۲)</sup>	هوا، آب‌وخاک	بلعیدن و استنشاق
نیکل	باتری، صفحه‌نمایش تلفن همراه	هوا، خاک، آب و غذا (گیاهی)	استنشاق، بلعیدن و تماس پوستی
لیتیوم	باتری	هوا، خاک، آب و غذا (گیاهی)	استنشاق، بلعیدن و تماس پوستی
باریم	لامپ فلورسنت لوله پرتو کاتدی	هوا، خاک، آب و غذا	استنشاق، بلعیدن و تماس پوستی
بریلیم	منبع تغذیه، رایانه، ماشین پرتوایکس	هوا، غذا و آب	استنشاق و بلعیدن

(1) Thermostats

(2) Metal Coatings

جدول ۵ طبقه‌بندی کالاها و زباله‌های الکترونیکی را نشان می‌دهد.

### آمار و اطلاعات جهان و ایران

سازندگان و تولیدکنندگان اصلی زباله‌های الکترونیکی، کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه در نظر گرفته شده‌اند. بیشترین میزان زباله‌های الکترونیکی در اروپا و آمریکا تولید می‌شود. با این حال چین، کشورهای اروپای شرقی و آمریکای لاتین در حال تبدیل شدن به تولیدکنندگان بزرگ زباله‌های الکترونیکی هستند. برآوردها نشان می‌دهند که حدود ۴۰ میلیون تن از این زباله هر ساله تولید می‌شود که در حدود ۵ درصد از کل زباله‌ی جامد تولیدشده جهانی است. برآورد شده است که ۲۰ تا ۵۰ میلیون تن از زباله‌های الکترونیکی هر ساله دور ریخته می‌شود که سهم کشورهای آسیایی تا ۱۲ میلیون تن است. تخمین زده شده است که تلویزیون‌های خانگی، رایانه‌ها، و تلفن‌های همراه سهم ۵/۵ میلیون تنی در زباله‌های الکترونیکی تولیدشده در مقیاس جهانی در سال ۲۰۱۰ میلادی داشته‌اند.

کلروفلوروکربن‌ها و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای<sup>(۱)</sup> هستند. وجود ۶۰ عنصر زیان‌آور در زباله‌های الکترونیکی می‌تواند هوا، آب، خاک و فعالیت‌های کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد و مقدمه‌های آلودگی این منابع را فراهم کند [۱۴]. در جدول ۳ برخی از فلزهای موجود در انواع زباله الکترونیکی، محیط‌های در معرض آلودگی با این فلزها و راه‌های تماس آن‌ها با انسان آورده شده است. فلزهای سنگین می‌توانند مشکل‌های فراوانی برای انسان‌ها ایجاد کرده و سلامتی آن‌ها را تهدید کنند. در جدول ۴ به برخی از فلزهای سمی در زباله‌های الکترونیکی و تأثیر آن بر سلامت انسان اشاره شده است.

### تمایز بین زباله‌های الکترونیکی

ایجاد تمایز بین انواع زباله‌های الکترونیکی بسیار ضروری است و طبق دستورالعمل فنی پیمان‌نامه‌ی بازل<sup>(۲)</sup>، عملکرد و پتانسیل تعمیر این زباله‌ها بر حمل‌ونقل و صادرات آن‌ها تأثیر دارد [۱۴].

(1) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

(2) Basel Convention

جدول ۴- تأثیرهای فلزهای سمی موجود در وسیله‌های الکترونیکی بر سلامت انسان [۱۱].

فلز	وسیله‌ی الکترونیکی دارای فلز	اثر سمی
سرب	لوله‌ی اشعه‌ی کاتدی، باتری‌ها، صفحه‌سیم‌بندی چاپی <sup>(۱)</sup>	اختلال و آسیب مغزی در کودکان و آسیب عصبی، خون و سامانه تولیدمثل
کادمیم	باتری‌های قابل شارژ رایانه، لوله‌های اشعه‌ی کاتدی قدیمی	مشکل‌های دستگاه تنفسی، کلیه و استخوان و سرطان‌زایی
جیوه	قطعه‌های نورپردازی برای صفحه‌های تخت	تأثیر بر مغز و سیستم عصب مرکزی، ایجاد لرزش، افسردگی و اختلال‌های رفتاری
کروم	تولید فلزهای بدنه، نوار داده‌ها، فلاپی دیسک	نارسایی ارگان‌های بدن و سرطان‌زایی
سلنیوم	دستگاه‌های تکثیر قدیمی	اختلال دستگاه گوارش، ریزش مو، خستگی، تحریک‌پذیری، آسیب عصبی
لیتیوم	باتری‌های لیتیومی	تأثیر دستگاه گوارش و سیستم عصبی

(1) Printed Wiring Boards

جدول ۵ - طبقه‌بندی کالاهای الکترونیکی و زباله‌های به دست آمده از آن‌ها [۱۴].

نوع	شرح و توصیف	طبقه‌بندی
کالای الکترونیکی نو و در حال استفاده	کالایی که نو است و بین کشورهای گوناگون جابه‌جا می‌شود.	این دسته به‌عنوان غیر زباله <sup>(۱)</sup> شناخته می‌شوند.
کالای الکترونیکی استفاده‌شده، مناسب برای استفاده‌ی دوباره مستقیم	کالایی که نیاز به تعمیر و نوسازی قطعه‌های سخت‌افزاری ندارد.	این دسته هم به‌عنوان غیر زباله شناخته می‌شود ولی در برخی کشورها محدودیت واردات و صادرات برای آن‌ها وجود دارد.
کالای الکترونیکی غیرفعال ولی قابل تعمیر	کالاهایی که نیاز به تعمیر برای استفاده‌ی دوباره دارند و می‌توان آن‌ها را بهبود داده تا عملکرد طبیعی آن‌ها بازگردد و با آزمون آن این شرایط تأیید می‌شود.	طبقه‌بندی این کالاها دارای بحث است؛ چون ممکن است برخی قطعه‌ها در کشوری جدا شود و به‌عنوان زباله منتقل شود بنابراین برخی آن را غیر زباله و برخی زباله می‌نامند.
کالای الکترونیکی غیرفعال و غیرقابل تعمیر	رایج‌ترین نوع زباله‌ی الکترونیکی	باید به‌عنوان زباله در نظر گرفته شود.
زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی	شامل مواد موجود در کالا و قطعه‌های آن می‌شود.	باید به‌عنوان زباله در نظر گرفته شود.

(1) Non-waste

نسبتی از رایانه‌های در حال استفاده در جهان با میزان دورریز آن یافت. بر اساس تقویم سالیانه صنعت رایانه، تعداد رایانه‌های در حال استفاده در جهان در دهه ۸۰ میلادی حدود ۴/۸ میلیون تن بوده است و در سال ۲۰۰۰ میلادی این عدد به ۵۵۳ میلیون تن و در سال ۲۰۱۵ به ۲۰۲۰ تا ۲۰۷۰ میلیون تن افزایش پیدا کرده است. ۵ کشور عمده استفاده‌کننده از رایانه‌ها تا پایان سال ۲۰۱۱، آمریکا (۳۱۰/۶ میلیون)، چین (۱۹۵/۱ میلیون)، ژاپن (۹۸/۱ میلیون)، آلمان (۷۱/۵ میلیون) و هند (۵۷ میلیون) بوده‌اند. آمار و ارقام درباره زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی در ایران

هم‌چنین برآورد شده است که این میزان تا سال ۲۰۱۵ میلادی به ۹/۸ میلیون تن افزایش پیدا خواهد کرد. حجم زباله‌های الکترونیکی نیز تا حدود ۸ درصد از تمام زباله‌های شهری تولیدشده را در برمی‌گیرد.

از جمله زباله‌های الکترونیکی، صفحه‌های نمایش دستگاه‌های گوناگون است. برای صفحه‌های نمایش عدد مشخصی از میزان دورریز سالیانه وجود ندارد. با این حال در برخی از کشورها مانند آمریکا، چین و تایوان این مقدار حدود ۳/۲ میلیون تن برآورد شده است. در ارتباط با رایانه‌ها نیز عدد مشخصی وجود ندارد، ولی می‌توان

هستند، می‌توان بازیابی فلزهای ارزشمند موجود در این پسماند را به لحاظ اقتصادی ضروری دانست. همچنین به دلیل این که برخی از معادن فلزی رو به پایان است و یا کمیاب می‌باشد، انگیزه بیش‌تری برای بازیافت این نوع پسماندها ایجاد می‌شود. طبق گزارش‌ها مقدار فلزهایی که در زباله‌های الکترونیکی وجود دارد ۴۰ تا ۵۰ برابر بیش از مقدار آن‌ها در سنگ معادن می‌باشد. در سال ۲۰۱۴ میلادی ارزش زباله‌های الکترونیکی موجود در جهان حدود ۴۸ میلیارد یورو تخمین زده شد که این رقم پیوسته در حال افزایش است. همچنین در سال ۲۰۱۴ میلادی تخمین زده شده که حدود ۳۰۰ تن طلا (برابر ۱۱ درصد تولید طلا در سال ۲۰۱۳ میلادی) و ۱۰۰۰ تن نقره به ارزش ۴۰۰ میلیون یورو و ۱۶ مگاتن فولاد در این زباله‌ها وجود داشته است. آمار جالب توجه دیگر این است که در ۱ میلیون تلفن همراه دور انداخته شده می‌توان ۲۴ کیلوگرم طلا، ۹ کیلوگرم پالادیوم، ۲۵۰ کیلوگرم نقره و ۹ تن مس به‌دست آورد. در نتیجه با توجه به این آمار خیره‌کننده می‌توان گفت با بازیابی این فلزها هم می‌توان از کاهش منابع طبیعی جلوگیری کرد و هم به نفع محیط‌زیست گام برداشت [۱۷].

### روش‌های بازیافت فلزها از زباله‌های الکترونیکی

اگرچه فناوری‌های بازیافت شکل تقریباً خالص فلزهایی مانند آلومینیوم، مس، روی، سرب و نیکل به‌خوبی تثبیت شده‌اند، بازیافت فلزها از زباله‌های الکترونیکی بسیار چالش‌برانگیز بوده است. اغلب کارخانه‌های ذوب فلز و خریداران فلزهای قراضه نسبت به بازیافت زباله‌های الکترونیکی بی‌میل هستند. دلیل این امر می‌تواند به پیچیده بودن ترکیب‌ها و حضور مواد سمی در زباله نسبت داد. تعداد بسیار محدودی از فرایندهای گرمایی به‌عنوان فرایندهای رسمی برای ترکیب‌های فلزی زباله‌های الکترونیکی در جهان وجود دارد [۱۸]. چندین فناوری گوناگون برای بازیافت فلزها از زباله‌های صنعتی وجود دارند که عبارت‌اند از پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی و بیوهیدرومتالورژی [۱۹].

### پیرومتالورژی

فرایند پیرومتالورژی می‌تواند یک راه‌حل کلی برای بازیافت عنصرهای ارزشمند از زباله‌های صنعتی باشد. در این روش از گرما برای ایجاد تغییرهای فیزیکی و شیمیایی در مواد به‌منظور بازیافت فلزهای ارزشمند استفاده می‌شود. خرد کردن، ذوب کردن، سوزاندن و پالایش از روش‌های معمول این فرایند به‌منظور بازیافت است. این روش برای بازیافت فلزهایی همچون تیتانیوم، زیرکونیوم، نیوبیم و مولیبدن کارآمد است.

مقاومت می‌باشد؛ عمر مفید این وسیله‌های در جهان ۲ تا ۳ سال و در ایران ۵ سال است. کشورهای توسعه‌یافته از جمله آمریکا بزرگ‌ترین تولیدکننده این تجهیزات هستند و گاهی نیز این دستگاه‌ها را پس از مصرف به کشورهای جهان سوم ارسال می‌کنند.

همان‌گونه که می‌دانیم، از سال ۱۳۷۱ رایانه وارد ایران شد و اولین محموله به تقریب شامل ۱۰ هزار رایانه بوده است. بر اساس برآوردها طی چند سال اخیر هر ساله یک‌میلیون و دویست هزار تا یک‌میلیون و پانصد هزار رایانه در ایران مونتاژ شده است و هم‌اکنون بیش از ۴ میلیون رایانه از دور خارج شده در ایران وجود دارد. زباله‌های الکترونیکی، سومین منبع بزرگ تولید سرب در زباله‌های جامد شهری هستند. اگرچه زباله‌های الکترونیکی تنها ۲ درصد از حجم کل زباله‌های جهان را تشکیل می‌دهند ولی این حجم ناچیز شامل ۷۰ درصد زباله‌های دارای مواد سمی است.

بر اساس اعلام وزیر ارتباطات ۷۱ میلیون نفر در ایران از تلفن همراه استفاده می‌کنند که از این تعداد حدود ۲۷ میلیون و پانصد هزار نفر از گوشی‌های هوشمند بهره می‌برند. با توجه به این آمار و با نظر به خرید گسترده‌ی به‌روزترین گوشی‌ها توسط ایرانی‌ها پی به این موضوع می‌بریم که حجم زباله‌های الکترونیکی مربوط به موبایل در ایران بسیار بالا است. بر اساس آمار ایران اعلام کرده است چیزی حدود ده و نیم میلیون ایرانی از رایانه شخصی استفاده می‌کنند. به‌راحتی می‌توان حدس زد که این تعداد در طول سال‌های گذشته دست کم یک‌بار رایانه‌ی خود را عوض کرده‌اند بنابراین می‌بایست دست کم ۱۰ میلیون زباله رایانه‌ای از بدنه و نمایشگر گرفته تا صفحه‌کلید و موسواره در کشور تولید شده که میزان بسیار چشمگیری است [۱۵].

### بازیافت فلزها از زباله‌های الکترونیکی

زباله‌های الکترونیکی، در حین و یا پس از فرایندهای صنعتی به وجود می‌آیند که باعث به وجود آمدن آلودگی آلی و غیرآلی می‌شود. در مجموع می‌توان دلیل‌های بازیافت فلزها از منبع‌های ثانویه را در چند مورد به‌صورت زیر بیان کرد [۱۶]:

- ۱- کاهش منابع اولیه‌ی سنگ معدن‌های طبیعی دارای این فلزها؛
  - ۲- افزایش نیاز به فلزها با گسترش صنعتی شدن؛
  - ۳- افزایش قیمت فلزها؛
  - ۴- افزایش مشکل‌های زیست‌محیطی و همچنین تهدید سلامت انسان با انباشت زباله‌های دارای فلزهای سنگین.
- با توجه به اینکه فلزهایی همچون آهن، مس، آلومینیوم و نیز نقره، طلا، پلاتین و پالادیوم که دارای ارزش اقتصادی بالایی

جدول ۶ - روش‌های فلزهای ارزشمند از زباله‌های گوناگون به کمک روش پیرومتالورژی.

روش بازیابی فلز	زباله	فلز بازیافت شده	درصد بازیافت	شرایط بازیابی	مرجع
پیرومتالورژی	لجن گالوانیک <sup>(۱)</sup>	مس	۵۰٪	۹۰ دقیقه گرما در دمای ۵۵۰ درجه‌ی سلسیوس با حضور سولفید آهن	[۲۳]
		نیکل	۴۳٪		
		روی	۶۰٪		
	باتری‌ها	کادمیوم	۹۹/۹۹٪	دمای ۱۰۷۳ درجه‌ی کلونین و زمان گرمادهی ۲/۵ ساعت	[۲۴]
زباله‌ی الکترونیکی		پلاتین	۸۰/۳٪	گرما به کمک کوره پلاسمایی تا دمای ۱۴۰۰ درجه‌ی سلسیوس	[۲۵]
		پالادیم	۹۴/۲٪		

(1) Galvanic Sludge

زیست‌محیطی هستند و بعضی از حلال‌های استفاده‌شده بسیار گران هستند و در نتیجه هنگام افزایش مقیاس فرایند در صنعت هزینه‌ی هنگفتی را سبب خواهند شد، بنابراین برای استفاده از این فرایند یافتن یک حلال ارزان نیاز است [۲۸]. افزون بر این بازیافت به روش هیدرومتالورژی نیازمند غلظت بالای اسید در دمای بالا (۷۰-۸۰ درجه‌ی سلسیوس) است [۲۹]. در جدول ۷ می‌توان نمونه‌هایی از مطالعه‌های انجام‌شده به کمک روش هیدرومتالورژی را دید.

#### بیوهیدرومتالورژی

فرایندهای هیدرومتالورژی و پیرومتالورژی روش‌های سنتی بوده که برای بازیافت زباله‌های الکترونیکی استفاده می‌شوند [۳۷، ۳۸]. استفاده از این روش‌ها برای بازیافت زباله‌های الکترونیکی به دلیل انتشار دیوکسین‌ها<sup>(۱)</sup> و فوران<sup>(۲)</sup> موجب آلودگی هوا می‌شوند و همچنین حجم عظیمی از پساب را به وجود می‌آورند. افزون بر این، به دلیل مصرف بالای انرژی، از این روش‌ها به‌عنوان روش‌های مقرون‌به‌صرفه نام برده نمی‌شود [۳۹-۴۲]. مفهوم «سبز کردن زباله»<sup>(۳)</sup> مربوط به تغییر روش‌های بازیافت کم‌تر ترجیح داده‌شده (فروشویی اسیدی / بازی، روش‌های پیرومتالورژیکی) و روش‌های دفع (سوزاندن، دفن در زمین) به سمت فناوری‌های سبزتر است که چهار اصل را دنبال می‌کند: کاهش (Reduce)، استفاده‌ی دوباره (Reuse)، بازیافت (Recycle) و بازیابی (Recovery). سبز کردن زباله راهکاری برای حرکت به بالادست در سلسله مراتب مدیریت زباله است. این راهکار بر اساس روش‌های شناخته‌شده بین‌المللی از مدیریت زباله‌های جامد<sup>(۴)</sup> (ISWM) پیشنهاد شده است.

این روش سریع است، چراکه شکل فیزیکی زباله در برابر فرایندهای شیمیایی چندان مهم نیست، اما بیش‌تر روش‌هایی که با فرایند گرمایی روبه‌رو هستند، به دلیل مصرف بالای انرژی به‌صرفه نیستند. فرایند گرمایی به طور معمول به تولید گازهای آلاینده منجر شده و باعث از دست رفتن فلزها از ضایعات در طول فرایند می‌شود؛ در نتیجه استفاده از آن با دشواری‌هایی روبه‌رو است [۲۲-۲۰]. در جدول ۶ برخی مطالعه‌های انجام‌شده به کمک روش پیرومتالورژی نشان داده شده است.

#### هیدرومتالورژی

هیدرومتالورژی فرایندی است که در آن واکنش‌های شیمیایی در محلول‌های آبی و آلی برای بازیافت فلزها انجام می‌شود. به طور معمول سه مرحله حین فرایند هیدرومتالورژی برای بازیافت فلز انجام می‌شود که شامل فرایند فروشویی، تغلیظ محلول و خالص‌سازی است. معرف‌های گوناگونی در فروشویی شیمیایی استفاده شده‌اند مانند نیتریک اسید، مخلوط اسیدهای نیتریک، هیدروکلریک و سولفوریک، پتاسیم یدید و پتاسیم ایزوسیانید. در مرحله‌ی تغلیظ محلول و خالص‌سازی، محلول‌ها وارد فرایندهای جداسازی می‌شوند، از جمله استخراج با حلال، ته‌نشین‌سازی، انعقاد، تعویض یونی، غربال کردن و تقطیر برای جداسازی و تغلیظ فلزها. بازیافت فلز، مرحله‌ی نهایی در فرایند هیدرومتالورژی است. الکترولیز، کاهش گاز و ته‌نشین‌سازی از فرایندهای بازیافت فلز هستند [۲۶، ۲۷]. فرایندهای هیدرومتالورژی با توجه به استفاده از معرف‌های سمی و مقدار زیاد فراورده‌های جانبی تولیدشده در آن، همراه با خطرهای

(1) Dioxins

(2) Furan

(3) Greening the Waste

(4) Integrated Solid Waste Management

جدول ۷- فروشویی فلزهای ارزشمند از زباله‌های گوناگون به کمک روش هیدرومتالورژی.

مرجع	عامل فروشویی	درصد بازیافت	فلز بازیافت شده	زباله	روش بازیابی فلز
[۲۱]	فروشویی با استفاده از هیدروکلریک اسید با پیش تیمار گرمایی	%۹۸	مس	صفحه‌ی مدار چاپی	هیدرومتالورژی
[۳۰]	فروشویی با استفاده از نیتریک اسید	%۹۰	نیکل		
[۳۱]	فروشویی به کمک تری ان بوتیل فسفات <sup>(۱)</sup>	%۹۹	روی		
[۳۲]	فروشویی به کمک هیدروکلریک اسید و نیتریک اسید	%۸۵/۵	سلنیوم		
[۳۳]	فروشویی به کمک هیدروژن پراکسید و سولفوریک اسید	%۹۸	مس	صفحه‌ی نمایشگر	
[۳۴]	فروشویی به کمک هیدروکلریک اسید	%۹۶	ایندیوم		
[۳۵]	فروشویی به کمک سولفوریک اسید و هیدروژن پراکسید	%۹۹/۱	لیتیوم	باتری	
		%۷۰	کبالت		
[۳۶]	فروشویی به کمک سولفوریک اسید و آب اکسیژنه	%۱	مس		
		%۸۵	آلمینیوم		
		%۳۷	کبالت		
		%۵۵	لیتیوم		

(۱) Tri-n-butyl Phosphate (TBP)

به‌عنوان یک روش جایگزین سبز با هدف کمینه کردن آلودگی محیط‌زیست تثبیت شده است، اما زمان فروشویی طولانی‌تر، احتمال آلودگی و محدودیت پذیرش ریزاندامگان در دماهای بالاتر همچنان استفاده از روش‌های زیستی را با چالش‌هایی روبه‌رو می‌کند. [۴۵، ۴۶]. در جدول ۸ می‌توان مقایسه‌ی این روش را با روش‌های گفته شده در قسمت‌های پیش مشاهده کرد.

### ریزاندامگان مورد استفاده در فروشویی زیستی

گروه‌های گوناگون ریزاندامگان اسیددوست<sup>(۲)</sup> و قلیادوست<sup>(۳)</sup> و فراورده‌های متابولیکی آن‌ها در بازیافت فلزها از زباله‌های الکترونیکی استفاده شده است [۴۸]. سه گروه کلی میکروبی که در فرایندهای فروشویی زیستی شرکت می‌کنند عبارت‌اند از باکتری اتوتروف<sup>(۴)</sup> (مانند تیوباسیلی<sup>(۵)</sup>)، باکتری هتروتروف<sup>(۶)</sup> (مانند سودوموناس<sup>(۷)</sup> و باسیلوس<sup>(۸)</sup>) و قارچ هتروتروف (مانند آسپرژیلوس<sup>(۹)</sup>) و

مفهوم سبز کردن زباله شامل حفاظت از منابع و بهینه‌سازی، استفاده‌ی دوباره از زباله و بازیافت، بازیافت انرژی، اجتناب از دفن در زمین و پیدا کردن راهکارهای سبز و جدید در مدیریت زباله است [۲۵]. فروشویی زیستی از جمله روش‌های جایگزین سبز برای استخراج فلز از زباله‌های الکترونیکی و صنعتی است که پژوهشگران گوناگونی، استخراج‌های چشمگیری با استفاده از روش فروشویی زیستی به دست آورده‌اند. تا به امروز چندین فناوری زیستی به‌صورت تجاری در سامانه‌های مهندسی مکانیزه شده، استفاده شده است که می‌توان آن‌ها را در زمره فرایندهای بیوهیدرومتالورژی جای داد. در فرایندهای زیستی، حلالیت فلزها بر اساس برهم‌کنش بین فلز و ریزاندامگان است. این روش، بازیافت فلز را به‌واسطه شباهتش با چرخه‌های زیست‌زمین‌شیمیایی<sup>(۱)</sup> امکان‌پذیر می‌سازد، در نتیجه دوستدار محیط‌زیست بوده و مصرف انرژی و هزینه‌های مربوط به آن پایین است [۴۲-۴۴]. اگرچه روش فروشویی زیستی

(۱) Biogeochemical Cycle

(۲) Acidophilic

(۳) Alkalophilic

(۴) Autotrophic Bacteria

(۵) Thiobacilli

(۶) Heterotrophic

(۷) Pseudomonas

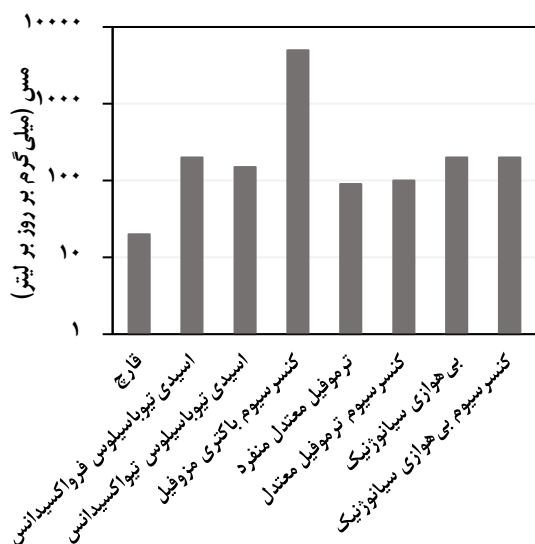
(۸) Bacillus

(۹) Aspergillus



جدول ۸ - مقایسه بین روش‌های فروشویی زیستی و سایر روش‌ها [۴۷].

روش بازیابی	مزیت‌ها	معایب
فروشویی شیمیایی، عملیات گرمایی و دیگر روش‌های سنتی برای استخراج فلزها	• کوتاه‌ترین زمان انجام فرایند	• نیازمند فرایندهای پیچیده • هزینه‌ی نگهداری و عملیاتی بالا • نیازمند مقادیر زیادی اسید و مصرف بسیار بالای انرژی • تولید مواد خطرناک در حین انجام فرایند • نیازمند غلظت بالای فلزها در سنگ معدن
فروشویی زیستی، باکتریایی و قارچی	• دوستدار محیط‌زیست (فناوری سبز) • ارزان‌قیمت و مصرف کم انرژی • ساده و ارزان بودن هزینه‌های عملیاتی و نگهداری • شرایط عملیاتی در فشار و به‌طور تقریبی دمای محیط • بالاترین بازدهی برای حلالیت فلزهای سنگین • بهره‌ی بالاتر برای جداسازی فلزهای سنگین • کارایی برای سنگ معدن کم‌عیار، حتی کم‌تر از ۰/۵ درصد وزنی • قابل استفاده برای فلزهایی با آلودگی بسیار بالا • تجهیزهای ساده و مرحله‌های عملیاتی ایمن	• دوره‌ی عملیات طولانی‌تر در مقایسه با فروشویی شیمیایی • وابستگی به شرایط محیطی



شکل ۲ - مقایسه عملکرد گروه‌های گوناگون ریزاندامگان در فروشویی مس از زباله‌های الکترونیکی [۵۳].

ریزاندامگان در فروشویی زباله اخیراً توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. مخلوط باکتری‌های اسیددوست که به‌طور مستقیم

پنی‌سیلیوم<sup>(۱)</sup>، کمولیتروف‌های<sup>(۲)</sup> اکسیدکننده‌ی آهن و مس (که به‌صورت اتوتروف با تثبیت CO<sub>2</sub> از اتمسفر رشد می‌کنند)، مهم‌ترین ریزاندامگان تجزیه‌کننده‌ی مواد معدنی هستند. تولید اسیدهای آلی و غیرآلی<sup>(۳)</sup>، خروج عامل‌های کمپلکس شونده<sup>(۴)</sup>، واکنش‌های اکسایش و کاهش<sup>(۵)</sup> و تجمع زیستی<sup>(۶)</sup> سازوکارهای رایج استفاده از آن‌ها در این فرایند می‌باشند [۴۸-۵۲]. شکل ۲ نمایی کلی از عملکرد گروه‌های گوناگون ریزاندامگان در فروشویی مس از زباله‌های الکترونیکی را نشان می‌دهد. از آنجاکه بیش‌تر مطالعه‌های انجام‌شده در شرایط متفاوتی از آزمایش بوده‌اند، مقایسه‌ی انجام‌شده در مقدارهای رسم شده بیش‌ترین نرخ‌های گزارش‌شده در مطالعه‌های گوناگون است.

شکل ۲ نشان می‌دهد که باکتری‌های اکسیدکننده‌ی گوگرد - آهن، چه مزوفیل<sup>(۷)</sup> و چه ترموفیل معتدل<sup>(۸)</sup> عملکرد بهتری در مقایسه با قارچ دارند. هم‌چنین روشن است که برتری چشمگیری در استفاده از کسرسسیوم ریزاندامگان وجود دارد که مثال آن در همکاری اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانسیس<sup>(۹)</sup>، اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانسیس و لیتوسپیریولوم فرواکسیدانسیس<sup>(۱۰)</sup> است. استفاده از کسرسسیوم

(۱) *Penicillium*

(۲) *Chemolithroph*

(۳) *Acidolysis*

(۴) *Complexolysis*

(۵) *Redoxolysis*

(۶) *Heterotrophic*

(۷) *Mesophile*

(۸) *Moderate Thermophiles*

(۹) *Acidithiobacillus thiooxidans*

(۱۰) *Leptospirillum ferrooxidans*

جدول ۹- متالورژی فلزهای موجود در زباله‌های الکترونیکی [۵۲].

فلز	ریزاندامگان به کار گرفته شده
آلمینیوم	باسیلوس سیرکولانس <sup>(۱)</sup> و باسیلوس موسیلاژینوس <sup>(۲)</sup> برای فروشوی سلیکون از سنگ معدن کم‌عیار بوکسیت دارای ناخالصی آلومینوسیلیکات استفاده شد. عملکرد باکتریایی مرتبط با تشکیل کپسول‌های دارای اگزوپلی ساکارید <sup>(۳)</sup> بود.
مس	تیوباسیلوس فرواکسیدانس (باکتری اکسیدکننده آهن)، اسیدی‌تیوباسیلوس تیواکسیدانس (باکتری اکسیدکننده سولفور) و باکتری‌های مشابه که برای فروشوی باکتریایی مس از سولفید مس شناخته شده‌اند.
سرب	سویه F3-02 باکتری اسیدی‌تیوباسیلوس فرواکسیدانس با فعالیت بالا در فرایند اکسیداسیون آهن (II)
نیکل	تیوباسیلوس فرواکسیدانس (۳۰ درجه سانتی‌گراد، pH برابر ۲/۲)
طلا و نقره	استفاده از باکتری‌هایی مانند اسیدی‌تیوباسیلوس، لپتوسپیریلام، فرومیکروبیوم <sup>(۴)</sup> و اسیدیفیلیوم <sup>(۵)</sup>

*Expolysaccharides* (۳)

*Bacillus mucilaginosus* (۲)

*Bacillus circulans* (۱)

*Acidiphilium* (۵)

*Ferromicrobium* (۴)

انتقال الکترون و جابه‌جایی یون هیدروژن است. بازه pH مورد استفاده در فرایندهای اکسایش باکتری به عامل‌هایی مانند مواد سولفیدی و نوع کشت باکتری بستگی دارد. حد بالا و پایین pH به ترتیب بر اساس میزان اسیدی بودن مورد نیاز برای نگه‌داشتن نمک‌های آن در حالت محلول و قابلیت تحمل باکتری مشخص می‌شود [۶۹]. در مطالعه‌ای که هونگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی به منظور بازیافت فلز مس از زباله‌های الکترونیکی به کمک باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس انجام دادند، اثر pH را نیز بررسی کردند. با توجه به این که تیوباسیلوس فرواکسیدانس یک باکتری اسیددوست است، می‌توان پیش‌بینی کرد که با کاهش pH به حدود ۱، بازیابی فروشوی زیستی افزایش می‌یابد که آزمایش‌های انجام‌شده همین نتیجه را نشان داده است [۱۸].

در سال ۲۰۱۴ میلادی آزمایشی با استفاده از کروموباکتریوم وایلوسم<sup>(۱)</sup> به منظور بازیابی زباله‌های الکترونیکی که محتوی ppm ۲۸۰ طلا بود، انجام شد. در این آزمایش تأثیر انجام پیش‌تیمار و جهش باکتری برای تحمل شرایط بازی مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌تیمار با اسید نیتریک موجب افزایش انحلال‌پذیری بیش‌تر فلزهای مهم شده و در ادامه موجب کاهش رقابت فلزهای گوناگون در تشکیل با سیانید می‌شود. شرایط قلیایی سبب افزایش غلظت یون‌های سیانید در دسترس فروشوی می‌شود. رشد باکتری در این آزمایش در pH برابر ۹، ۹/۵ و ۱۰ بررسی شد. نتیجه‌های به‌دست‌آمده بیان می‌کند که در چگالی توده ۰/۵٪ به ترتیب ۱۸،

از زهاب اسیدی معدن‌ها جدا شده، ثابت کرده است که کنسرسیوم آن بازده استخراج فلز بالاتری در مقایسه با باکتری تنها در فروشوی زباله‌های الکترونیکی دارد [۵۳]. جدول ۹ به‌کارگیری باکتری‌های گوناگون برای استخراج فلزها از زباله‌های الکترونیکی را نشان می‌دهد. برخی از کارهای انجام‌شده به روش فروشوی زیستی در بازیافت زباله‌های الکترونیکی نیز در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

### عامل‌های مؤثر بر فرایند فروشوی زیستی

مؤثر بودن فرایند فروشوی زیستی تا حد زیادی بستگی به بهره‌وری ریزاندامگان و ترکیب‌های شیمیایی و معدنی مواد دارد. زمانی می‌توان به بیش‌ترین مقدار بازده استخراج فلز دست یافت که شرایط فرایند فروشوی مطابق با شرایط رشد دلخواه ریزاندامگان باشد [۶۷]. عامل‌ها و متغیرهای گوناگونی از جمله متغیرهای فیزیکی و شیمیایی، مشخصه ماده جامد و متغیرهای میکروبی می‌توانند عملکرد فروشوی زیستی زباله‌های دارای فلز را تحت تأثیر قرار بدهند [۶۸]؛ فهرستی از این متغیرها که در ۴ دسته جای می‌گیرند، در جدول ۱۱ نشان داده شده‌اند. در ادامه تأثیر برخی از متغیرهای مؤثر بر فرایند فروشوی زیستی به همراه نمونه‌هایی از مطالعه‌های انجام شده، ارائه شده است.

### pH

یون هیدروژن تأثیر به‌سزایی در تأمین انرژی باکتری دارد. همچنین اکسایش میکروبی یون  $Fe^{2+}$  و مواد سولفیدی، شامل

(۱) *Chromobacterium violaceum*

جدول ۱۰ - فروشویی زیستی زباله‌های الکترونیکی و میزان استخراج فلز در مطالعه‌های گوناگون.

مرجع	بازیابی و شرایط آن	ریزاندامگان مورد استفاده	زباله
[۵۴]	آلومینیوم، مس، نیکل، روی ۹۰ درصد با چگالی توده‌ی ۰/۵ تا ۱۰ گرم بر لیتر و در مدت ۷ تا ۱۰ روز	اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس و اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس	صفحه مدار چاپی
[۵۴]	بازیابی آلومینیوم، نیکل، سرب، روی ۱۰۰ درصد با چگالی توده‌ی ۱۰۰ گرم بر لیتر به وسیله گلوکونیک اسید	آسپرژیلوس نایجر و پنی سیلیوم سیمپلیسیسیموم	
[۵۵]	مس ۳۷ درصد، با مقدار ۷ گرم بر لیتر آهن (II) و ۸۰ درصد بازیابی با سیتریک اسید	اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس	
[۵۶]	طلا ۱۴/۹ درصد، در مدت ۷ روز با چگالی توده‌ی کم	کروموباکتریوم وایلوسم	
[۵۷]	بازیابی طلا و سرب بالای ۹۵ درصد، در pH برابر ۵	دی سولفوویبریو دسولفوریکانس <sup>(۱)</sup>	
[۵۸]	طلا ۶۸/۵ درصد در مدت ۷ روز	کروموباکتریوم وایلوسم و سودوموناس فلورسنس <sup>(۲)</sup>	
[۵۹]	مس ۹۹/۵ درصد در pH برابر با ۲/۵ و ارتفاع بستر ۲۰۰ میلی‌متر و سرعت جریان ۲ میلی‌لیتر بر دقیقه و در مدت ۹ روز	تیوباسیلوس فرواکسیدانس و تیوباسیلوس تیواکسیدانس	
[۶۰]	مس و نیکل ۱۰۰ درصد، در مدت ۴۲ روز و چگالی توده‌ی ۱۰ گرم بر لیتر، pH برابر با ۱/۵، ۴/۵، ۱/۵ و (II) و ۱۰ گرم بر لیتر سولفور	اسیدی تیوباسیلوس و لیتوسپیریلیوم	
[۶۱]	مس ۸۶ درصد، نیکل ۷۴ درصد، روی ۸۰ درصد و آلومینیوم ۶۴ درصد، با پیش تیمار اسیدی ۲۷ روز، ۲۸۰ روز در واکنشگاه ستونی	سولفوباسیلوس ترموسولفیدواکسیدانس <sup>(۳)</sup> و ترموپلاسما اسیدوفیلیوم <sup>(۴)</sup>	
[۶۲]	مس ۹۵ درصد در مدت ۵ روز، pH اولیه برابر با ۱/۵ آهن فرو اولیه ۹ گرم بر لیتر و چگالی توده‌ی ۲۰ گرم بر لیتر	اسیدی تیوباسیلوس و گالیونلا <sup>(۵)</sup> و لیتوسپیریلیوم	
[۶۳]	مس ۶۳ درصد، گرمخانه‌ی لرزان با شرایط ثابت ۱۸۵ دور بر دقیقه و دمای ۳۰ درجه‌ی سلسیوس	اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس	صفحه مدار چاپی
[۶۴]	مس ۹۶/۸ درصد، در مدت ۴۵ ساعت و آلومینیوم ۸۸/۲ درصد و روی ۹۱/۶ درصد در مدت ۱۸ ساعت، pH برابر با ۲، آهن (II) اولیه ۱۲ گرم بر لیتر	ترکیبی از باکتری‌های اسیددوست	
[۲۶]	مس بیش از ۸۳ درصد، طلا ۷۳ درصد، روی ۴۹ درصد، آهن ۱۳ درصد و نقره ۸ درصد در pH برابر ۷/۵ (گرمخانه‌ی لرزان با ۱۵۰ دور در دقیقه و دمای ۳۰ درجه‌ی سلسیوس)	کروموباکتریوم وایلوسم و سودوموناس آرژینوزا و سودوموناس فلورسنس	زباله‌ی الکترونیکی
[۶۵]	مس ۹۹-۹۹/۹۹ درصد با محیط کشت ترکیبی با چگالی توده‌ی ۷/۸ گرم بر لیتر در ۹ روز؛ مس، سرب و روی ۸۸/۹ درصد در ۵ روز	کشت ترکیبی اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس و اسیدی تیوباسیلوس تیواکسیدانس	صفحه سیم‌بندی چاپی
[۶۶]	مس ۹۶/۳۶ درصد در مدت ۴۸ ساعت	اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس	صفحه مدار چاپی
[۵۸]	طلا ۱۱/۳۱ درصد، pH برابر با ۱۰؛ مس ۲۴/۹۱ درصد در pH برابر با ۱۱، در مدت ۸ روز	کروموباکتریوم وایلوسم	تلفن همراه
[۳]	کبالت ۶۵ درصد و لیتیوم ۱۰ درصد در مدت ۱۸ روز	اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس	باتری

(۱) *Desulfovibrio desulphuricans* (۲) *Pseudomonas fluorescens* (۳) *Sulfobacillus thermosulfido-oxidans* (۴) *Thermoplasma acidophilum* (۵) *Gallionella*

جدول ۱۱- فاکتورهای مؤثر در فروشویی زیستی [۶۹].

عامل	فیزیکی و شیمیایی	میکروبی	ماده جامد	فرایند
پارامترهای مؤثر	<ul style="list-style-type: none"> <li>• دما</li> <li>• pH</li> <li>• پتانسیل کاهش</li> <li>• غلظت اکسیژن</li> <li>• غلظت کربن دی‌اکسید</li> <li>• انتقال جرم</li> <li>• دسترس بودن مواد مغذی</li> <li>• غلظت آهن</li> <li>• نور</li> <li>• فشار</li> <li>• حضور بازدارنده‌ها</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع ریزاندامگان</li> <li>• چگالی جمعیت</li> <li>• فعالیت میکروبی</li> <li>• توزیع جمعیت ریزاندامگان</li> <li>• میزان تحمل فلزها</li> <li>• توانایی خوسازی ریزاندامگان</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• نوع ماده جامد</li> <li>• ترکیب ماده جامد</li> <li>• توزیع ماده جامد</li> <li>• اندازه ذره‌ها</li> <li>• سطح تماس</li> <li>• تخلخل</li> <li>• آب‌دوستی</li> <li>• برهمکنش‌های گالوانیکی</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• حالت فروشویی (درجا<sup>(۱)</sup>، توده‌ای<sup>(۲)</sup>) یا تانک<sup>(۳)</sup></li> <li>• چگالی توده</li> <li>• نرخ همزدگی (در حالت تانک)</li> <li>• ژئومتری توده (در حالت توده)</li> </ul>

Heap Leaching (۲)

In Situ Leaching (۱)

در فرایندهای هیدرومتالورژی به‌طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این روش به مقدارهای زیادی از آن نیاز است که به‌صرفه نبوده و آلودگی زیست‌محیطی زیادی ایجاد می‌کند. جادهاو و همکاران<sup>(۲)</sup> [۶] در سال ۲۰۱۳ به مطالعه استخراج فلز نقره از باتری‌های نقره اکسید دکمه‌ای به کمک باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس پرداختند. از پارامترهای مهم بررسی شده، غلظت یون  $Fe^{3+}$  بود که نتیجه‌ها نشان داد که غلظت فلز نقره بازیافت شده رابطه مستقیم با غلظت یون  $Fe^{3+}$  داشته است.

### اکسیژن

بیش‌تر باکتری‌ها هوازی هستند؛ بر این اساس هوادهی و انتقال اکسیژن کافی پیش‌نیاز یک فروشویی مؤثر است. در مقیاس آزمایشگاهی به‌وسیله هوادهی، هم زدن و یا تکان دادن می‌توان اکسیژن لازم را برای رشد تأمین کرد [۷۱].

چی و همکاران<sup>(۳)</sup> [۷۲] در سال ۲۰۱۱ فروشویی زیستی طلا و مس از صفحه‌های مدار چاپی موبایل به کمک باکتری‌های سیانوژنیک را مطالعه کردند. در بررسی‌هایی که انجام دادند، اکسیژن حل‌شده را اندازه‌گیری کردند و نیاز باکتری به اکسیژن را نشان دادند و بیان کردند که با مصرف اکسیژن توسط باکتری و کاهش غلظت اکسیژن، فعالیت آن کاهش یافته و سرعت بازیابی به طرز چشمگیری کاهش یافته است.

۲۲/۵ و ۱۹ درصد طلا در pH برابر ۹، ۹/۵ و ۱۰ بازیابی می‌کند؛ درحالی‌که در pH برابر ۷ تنها قادر به بازیابی ۱۱٪ طلا می‌شود. این کاهش بازیابی با افزایش چگالی توده به این دلیل است که غلظت‌های بالا سبب کاهش رشد باکتری و تولید سیانید می‌شود [۷۰].

### دما

ریزاندامگان گوناگون بازه‌ی دمای گوناگونی برای زنده ماندن و همچنین رشد و تولید دارند. دو متغیر رقابتی بر فرایند فروشویی زیستی مؤثرند: ۱- افزایش سرعت واکنش با افزایش دما و ۲- کاهش فعالیت زیستی با افزایش دما. هونگ و همکاران<sup>(۱)</sup> [۱۸]، بازیافت مس را به کمک باکتری تیوباسیلوس فرواکسیدانس مورد مطالعه قرار دادند و تأثیر پارامتر دما را بررسی کردند. نشان داده شد که دما نقش مهمی در بازیابی مس دارد؛ با افزایش دما تا یک میزان مشخص، بازیابی مس افزایش چشمگیری داشته است و در نتیجه با کاهش دما، بازیابی مس نیز کاهش یافته است.

### اکسیدکننده

در محیط‌های اسیدی یون فریک نقش اکسیدکننده دارد و تولید این یون از مهم‌ترین برتری‌های فروشویی زیستی است. می‌توان با افزودن فیزیکی این یون، آن را جایگزین فروشویی زیستی کرد که البته بسیار هزینه‌بر است. در محیط‌های بازی، سیانید با ایجاد پیوند با فلزها سبب انحلال آن‌ها می‌شود. افزودن فیزیکی سیانید

(۱) Hong, et al.

(۳) Chi et al.

(۲) Jadhav, et al.

**چگالی توده ماده جامد**

فلزهای سنگین از صفحه‌های مدار چاپی تلفن همراه را مورد مطالعه قرار دادند. ابتدا مراحل خوشسازی باکتری /اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس با پودر نمونه انجام شد. در این پژوهش درصد تلقیح باکتری ۱۰ درصد حجمی - حجمی و از مقدار ۱ گرم پودر در ۱ لیتر محیط کشت آزمایش انجام شده تا پس از ۵۵ روز به مقدار ۲۰ گرم در لیتر رسید. پارامترهایی که در این آزمایش دارای اهمیت بودند عبارت هستند از pH اولیه، غلظت آهن ( $Fe^{3+}$ ) اولیه، چگالی توده و اندازه ذره‌ها. برای بیشینه کردن استخراج دو فلز مس و نیکل به‌طور همزمان این پارامترها به‌وسیله طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ بهینه‌سازی شده که این شرایط عبارت‌اند از: pH اولیه برابر با ۱، غلظت آهن ( $Fe^{3+}$ ) اولیه ۴/۱۸ گرم بر لیتر، چگالی توده ۸/۵ گرم بر لیتر و اندازه ذره ۱۱۴/۰۲ میکرومتر که سرانجام با این شرایط ۱۰۰ درصد مس و نیکل بازیابی شد.

**نوع ریزاندامگان مورد استفاده**

می‌توان گفت مهم‌ترین عامل در انجام فروشویی زیستی مناسب، انتخاب ریزاندامگان مناسب است که این انتخاب با توجه به توانایی متفاوت باکتری‌ها و قارچ‌ها در میزان تحمل فلزهای سنگین، استخراج فلزها و منبع غذایی آن‌ها است. در بررسی صورت گرفته بر فروشویی زیستی باتری‌های نیکل - کادمیم و نیکل - متال هیدرید دیده شد که توانایی سویه /اسیدی تیوباسیلوس فرواکسیدانس در سازگار شدن با فلزهای سنگین نیکل، کادمیم و کبالت موجود در باتری‌ها به‌مراتب بیش‌تر از سویه /اسیدیانوس بریرلی<sup>(۲)</sup> است [۷۶].

چی و همکاران [۵۸] در سال ۲۰۱۲ میلادی استخراج فلزهای مس و طلا از صفحه‌های مدار چاپی تلفن همراه را به کمک روش فروشویی زیستی بررسی کردند. باکتری مورد استفاده کروموباکتریوم وایلوسوم و محیط کشت ترکیبی عصاره مخمر، پلی‌پپتون و گلاسیسین مورد استفاده قرار گرفت که سیانید مورد نظر به کمک آن تولید شد. فروشویی با دور ۱۵۰ دور بر دقیقه، دمای ۳۰ درجه سلسیوس، چگالی توده ۱۵ گرم بر لیتر و بازه‌ی pH برابر ۱۱-۸ انجام شد. در شرایط مذکور حلالیت طلا از ۷/۷۸٪ به ۱۰/۸٪ و برای مس از ۴/۹٪ به ۱۱/۴٪ در طی مدت ۸ روز افزایش یافت.

**حضور یون‌های فلزی**

بسیاری از ریزاندامگان‌ها دارای یک حد تحمل مشخص از یون‌های فلزی با حفظ فعالیت اکسایش خود هستند. برای نمونه

بسیاری از مواد حاضر در زباله‌های جامد برای ریزاندامگان اثر سمی دارند که با افزایش نسبت ماده جامد به محیط فروشویی، قدرت رشد ریزاندامگان کاهش می‌یابد. در بررسی صورت گرفته برای فروشویی زیستی باتری‌های لیتیوم یون با کشت ترکیبی باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد و اکسیدکننده آهن دیده شد که با افزایش نسبت ماده جامد به محیط فروشویی از ۱ درصد به ۴ درصد، بازده فروشویی زیستی برای کبالت از ۵۲ درصد به ۱۰ درصد و برای لیتیوم از ۸۰ درصد به ۳۷ درصد کاهش می‌یابد که البته با کنترل‌هایی از قبیل تنظیم اسید، تنظیم دما و تنظیم میزان سوبسترا می‌توان تأثیر افزایش نسبت ماده جامد به محیط فروشویی را جبران کرد [۷۳].

ارشدی و همکاران [۳۷] در سال ۲۰۱۶ بازیابی فلز طلا به روش فروشویی زیستی از صفحه‌های مدار چاپی تلفن همراه به‌وسیله باکتری باسیلوس مگاتریوم<sup>(۱)</sup> (باکتری سیانوژنیک) را بررسی کردند. برای بیشینه کردن استخراج طلا پارامترهایی همچون pH اولیه، چگالی توده و غلظت گلاسیسین با کمک طراحی آزمایش و روش سطح پاسخ بهینه شده است. شرایط بهینه عبارت‌اند از pH اولیه ۱۰، چگالی توده ۸/۱۳ گرم بر لیتر و غلظت گلاسیسین ۱۰ گرم بر لیتر که نتیجه به دست آمده از این شرایط، بازیابی ۷۲ درصدی مس و ۶۵ گرم بر تن طلا گزارش شده که این عدد ۷ برابر بیش‌تر از استخراج طلا از معدن می‌باشد.

**اندازه ذره و سطح تماس**

فروشویی زیستی فرایندی است که به‌وسیله انجام واکنش‌های شیمیایی روی سطح ذره صورت می‌گیرد؛ پس انتظار می‌رود سرعت فروشویی زیستی با کاهش اندازه ذره‌ها، به‌واسطه افزایش سطح تماس بر واحد وزن، بیش‌تر شود.

اصیری و همکاران [۷۴] در سال ۲۰۱۲ میلادی سینتیک فروشویی فلزهایی همچون نیکل و مولیبدن از کاتالیزگرهای هیدروکراکینگ به کمک قارچ *آسپرژیلوس نایجر* را بررسی کردند و عامل‌های مؤثر بر این فرایند را بهینه کردند. از مهم‌ترین آن‌ها، اثر اندازه ذره‌ها است که به کمک نرم‌افزار طراحی آزمایش بهینه شده و نشان داده شد که کاهش اندازه ذره‌ها تا یک اندازه بهینه موجب افزایش بازده بازیابی فلز تا میزان چشمگیری شده است.

ارشدی و همکاران [۷۵] در سال ۲۰۱۵ میلادی فروشویی زیستی

(۱) *Bacillus megaterium*(۲) *Acidianus brierley*

از زباله‌های الکترونیکی دارند.

فناوری‌های فروشویی زیستی به سرعت در حال توسعه هستند و تلاش‌ها به طور عمده در مقیاس آزمایشگاهی همراه با برخی مطالعه‌ها در مقیاس‌های صنعتی متمرکز شده‌اند. به روشنی مشخص است که افزایش مقیاس روش فروشویی زیستی به سطح صنعتی برای بازیافت زباله‌های الکترونیکی به دلیل تفاوت‌های زیاد در عامل‌های مؤثر بر فرایند، علی‌رغم کارهای مهم انجام‌شده در این زمینه، با چالش‌های زیادی روبه‌رو است. از جمله چالش‌های عمده‌ای که در فرایندهای تجاری‌سازی فروشویی زیستی وجود دارند می‌توان به سینتیک آهسته و پایین بودن چگالی توده مورد استفاده در فرایند (نسبت جامد به مایع) اشاره کرد. برای افزایش بازدهی فرایند فروشویی زیستی می‌توان راهکارهای زیر را در پیش گرفت: استفاده از رویکردهای جدید برای بهبود سوپه میکروبی و افزایش تولید متابولیت‌ها، طراحی زیست‌واکنش‌گاه‌های ساده برای کشت میکروبی، یافتن منبع تغذیه ارزان برای میکروب‌ها و استفاده از کاتالیست‌ها. افزون بر این، برای افزایش بازیابی فلزها، سوپه‌های میکروبی جدید با توانایی بالاتری برای تحمل فلزها سمی باید شناسایی شوند. در ضمن، تاکنون پیشرفت‌های فناوری به طور عمده در زمینه‌ی برهمکنش‌های مواد معدنی سولفیدی با میکروب‌ها انجام شده است و باید پژوهش‌ها بر روی فروشویی زیستی پسماندهای سیلیکاتی، کربناتی و اکسیدی متمرکز شوند. همچنین پژوهش‌هایی برای توسعه کاربردهای فروشویی زیستی با استفاده از آنزیم‌های خاص در حال انجام است؛ با این حال اطلاعات زیادی در این زمینه منتشر نشده است و انتظار می‌رود که تکامل فناوری در این زمینه در کوتاه‌مدت انجام شود. به طور کلی، چالش‌های پیش‌روی فرایندهای بیولوژیکی نیازمند همکاری نزدیک بین مهندسين، میکروپ‌شناسان و شیمی‌دانان است و نیاز است تا با پژوهش‌ها و تلاش‌هایی که در آینده انجام می‌شود، شکاف‌های موجود پر شده و بتوان برای استخراج زیستی فلز در مقیاس صنعتی، هرچه بیشتر و مؤثرتر به بازیافت زباله‌های الکترونیکی پرداخت.

مشاهده‌شده است که قارچ *آسپرژیلوس نایجر* توانایی رشد در غلظت‌های بالاتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیکل [۷۷] و ۷۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آهن را ندارد [۷۸]، این در حالی است که قارچ *پنی‌سیلیوم سیمپلیسیسیموم* در غلظت‌های ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نیکل و ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آهن قادر به رشد است [۴۰].

### چگالی جمعیت ریزاندامگان

درصد حجمی مایه تلقیح و میزان رشد ریزاندامگان، چگالی جمعیت ریزاندامگان را تعیین می‌کند. *بهاء‌لو هوره* و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۱۶ میلادی بازیابی فلزهایی همچون نیکل و کبالت را از باتری‌های فرسوده لیتیوم یونی به کمک قارچ *آسپرژیلوس نایجر* بررسی کرده و پارامترهای مؤثر بر فروشویی را بهینه کردند. چگالی سلولی از موارد مهم بهینه‌شده در این فرایند بوده است که در غلظت‌های بالای ساکارز و اندازه بالای مایه تلقیح، میزان سیتریک اسید بیش‌تری تولیدشده است که در نتیجه میزان بازیابی فلزها هم به خاطر بالاتر ترشح شدن سیتریک اسید، بالا رفته است.

### نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده بیوهیدرومتالورژی

نوآوری‌های جدید و پیشرفت‌های سریع در اختراع تجهیزهای الکترونیکی و به دنبال آن، مصرف روزافزون آن‌ها منجر به افزایش بیش‌ازپیش زباله‌های الکترونیکی در سطح جهان شده است. به دلیل محتوای غنی فلزی و همچنین حضور فلزهای سمی، بازیافت زباله‌های الکترونیکی تبدیل به یک نیاز شده است. روش‌های سنتی بازیافت زباله‌های الکترونیکی از جمله روش‌های پیرومتالورژیکی و هیدرومتالورژیکی، غیراقتصادی و مصرف‌کننده‌ی بالای انرژی بوده و سازگار با محیط‌زیست نیستند. چالش‌های روبه‌رو شده در استفاده از این روش‌ها مسیر را به سمت استفاده از روش‌های زیستی در فرایندهای استخراج فلز از زباله‌های الکترونیکی به طریقی که دوستدار محیط‌زیست باشند، معطوف کرده است. بر اساس ارزیابی‌های روش‌های گوناگون استخراج فلز از دیدگاه‌های گوناگون، به ویژه سازگاری با محیط‌زیست و اقتصادی بودن، می‌توان استنباط کرد که فروشویی زیستی امیدبخش‌ترین فناوری نوظهور است که عامل‌های زنده و غیرزنده‌ی مؤثر بر فرایند به‌سادگی قابل بهینه‌سازی هستند. با این حال بررسی دقیق مقاله‌های موجود، وجود اختلاف در عامل‌های حاکم بر فرایند انحلال زیستی در طی فروشویی زیستی زباله‌های الکترونیکی را نشان می‌دهد. همچنین ریزاندامگان مشابه نشان داده‌اند که نیازهای متفاوتی در بازیافت یک فلز خاص

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۰

## مراجع

- [1] Mishra D., Rhee Y.H., [Microbial leaching of Metals from Solid Industrial Wastes](#), *J. Microbiol.*, **52**(1):1-7 (2014).
- [2] Nawaz H., Asif M., [Biosorption of Pb \(II\) and Co \(II\) on Red Rose Waste Biomass](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **30**(4): 81-88 (2011).
- [3] Priya A., Hait S., [Extraction of Metals from High-Grade Waste Printed Circuit Board by Conventional and Hybrid Bioleaching Using Acidithiobacillus ferrooxidans](#), *Hydrometallurgy.*, **177**: 132-139 (2018).
- [۴] احمدی اسبجین، سلمان؛ پوربابایی، احمدعلی؛ آندره، ایو، بررسی فرایند جذب زیستی همزمان دو فلز روی / نیکل به وسیله جلبک قهوه‌ای فوکوس سراتوس، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۱) ۳۲: ۸۵ تا ۹۱ (۱۳۹۲).
- [5] González-Muñoz M.J., Rodríguez M.A., Luque S., Álvarez J.R., [Recovery of Heavy Metals from Metal Industry Waste Waters By Chemical Precipitation and Nanofiltration](#), *Desalination*, **200**(1-3):742-744 (2006).
- [6] 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).
- [7] Wang S., Zheng Y., Yan W., Chen L., Dummi Mahadevan G., Zhao F., [Enhanced Bioleaching Efficiency of Metals from E-Wastes Driven by Biochar](#), *J. Hazard. Mater.*, **320**:393-400 (2016).
- [8] Ilyas S., Lee J.C., Chi R.A., [Bioleaching of Metals from Electronic Scrap and Its Potential for Commercial Exploitation](#), *Hydrometallurgy*, **131-132**:138-143 (2013).
- [9] Villares M., Işildar A., Mendoza Beltran A., Guinee J., [Applying an Ex-ante Life Cycle Perspective to Metal Recovery from E-Waste Using Bioleaching](#), *J. Clean. Prod.*, **129**:315-328 (2016).
- [10] Robinson B.H., [E-waste: An Assessment of Global Production and Environmental Impacts](#), *Sci. Total Environ.*, **408**(2):183-191 (2009).
- [11] Veit H.M., & Bernardes A.M., "[Electronic Waste: Recycling Techniques](#)", Springer International Publishing (2015).
- [۱۲] خبرگزاری افکارنیوز، بیماری‌های ناشی از زباله‌های الکترونیک. شناسه خبر: ۵۰۲۴۵۶، تاریخ گزارش ۱۳۹۵/۰۱/۲۲.
- [13] Ongondo F.O., Williams I.D., Cherrett T.J., [How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes](#), *Waste Manag.*, **31**(4):714-730 (2011).
- [14] Perkins D.N., Brune Drisse M.N., Nxele T., & Sly P.D., [E-Waste: A Global Hazard](#), *Ann. Glob. Heal.*, **80**(4):286-295 (2014).
- [۱۵] خبرگزاری تسنیم، تکنولوژی علیه محیط‌زیست؛ خوب و بد خروج زباله‌های الکترونیک از کشور. شناسه خبر ۷۱۴۴۱۷، تاریخ گزارش ۹۴/۰۲/۵.

- [16] Hoque M.E., Philip O.J., [Biotechnological Recovery of Heavy Metals from Secondary Sources- An Overview](#), *Mater. Sci. Eng. C*, **31**(2):57–66 (2011).
- [17] Amankwah-Amoah J., [Global Business and Emerging Economies: Towards a New Perspective on the Effects of E-Waste](#), *Technol. Forecast. Soc. Change*, **105**:20–26 (2016).
- [18] Hong Y., Valix M., [Bioleaching of Electronic Waste Using Acidophilic Sulfur Oxidising Bacteria](#), *J. Clean. Prod.*, **65**:465–472 (2014).
- [19] Pathak A., Morrison L., Healy M. G., [Catalytic Potential of Selected Metal Ions for Bioleaching, and Potential Techno-economic and Environmental Issues: A Critical Review](#). *Bioresource technology*, **229**:211-221 (2017).
- [20] Mousavi S.M., Vossoughi M., Yaghmaei S., Jafari A., [Copper Recovery from Chalcopyrite Concentrate by an indigenous \*Acidithiobacillus ferrooxidans\* in an Air-Lift Bioreactor](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **25**(3):21–26 (2006).
- [21] Havlik T., Orac D., Petranikova M., Miskufova A., Kukurugya F., Takacova Z., [Leaching of Copper and Tin from Used Printed Circuit Boards after Thermal Treatment](#), *J. Hazard. Mater.*, **183**(1–3):866–873 (2010).
- [22] Jadhav U.U., Hocheng H., [A Review of Recovery of Metals from Industrial Waste](#), *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, **54**(2):159–167 (2012).
- [23] Rossini G., Bernardes A.M., [Galvanic Sludge Metals Recovery by Ppyrometallurgical and Hydrometallurgical Treatment](#), *J. Hazard. Mater.*, **131**(1–3):210–216 (2006).
- [24] Huang K., Li J., Xu Z., [Characterization and Recycling of Cadmium from Waste Nickel-Cadmium Batteries](#), *Waste Manag.*, **30**(11):2292–2298 (2010).
- [25] Cui J., Zhang L., [Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review](#), *J. Hazard. Mater.*, **158**(2–3):228–256 (2008).
- [26] Pradhan J.K., Kumar S., [Metals Bioleaching from Electronic Waste by \*Chromobacterium violaceum\* and \*Pseudomonads sp.\*](#), *Waste Manag. Res.*, **30**(11):1151–1159 (2012).
- [27] Shahrabi-Farahani M., Yaghmaei S., Mousavi S.M., Amiri F., [Bioleaching of Heavy Metals from a Petroleum Spent Catalyst Using \*Acidithiobacillus thiooxidans\* in a Slurry Bubble Column Bioreactor](#), *Sep. Purif. Technol.*, **132**:41–49 (2014).
- [28] Xu J., Thomas H.R., Francis R.W., Lum K.R., Wang J., Liang B., [A Review of Processes and Technologies for the Recycling of Lithium-Ion Secondary Batteries](#), *J. Power Sources*, **177**(2):512–527 (2008).
- [29] Al-Thyabat S., Nakamura T., Shibata E., Iizuka A., [Adaptation of Minerals Processing Operations for Lithium-Ion \(LiBs\) and Nickel Metal Hydride \(NiMH\) Batteries Recycling: Critical Review](#), *Miner. Eng.*, **45**:4–17 (2013).
- [30] Kinoshita T., Akita S., Kobayashi N., Nii S., Kawaizumi F., Takahashi K., [Metal Recovery from Non-Mounted Printed Wiring Boards via Hydrometallurgical Processing](#), *Hydrometallurgy*, **69**(1–3): 73–79 (2003).



- [31] Park Y.J., Fray D.J., Separation of Zinc and Nickel Ions in a Strong Acid through Liquid-Liquid Extraction, *J. Hazard. Mater.*, **163**(1): 259–265 (2009).
- [32] Castro L.A., Martins A.H., Recovery of Tin and Copper by Recycling of Printed Circuit Boards from Obsolete Computers, *Brazilian J. Chem. Eng.*, **26**(4):649–657 (2009).
- [33] Deveci H., Yazici E., Aydin U., Yazici R., Akcil A., Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions, *Proc. Going Green-CARE Innov.*, 8-11 (2011).
- [34] Kato T., Igarashi S., Ishiwatari Y., Furukawa M., Yamaguchi H., Separation and Concentration of Indium from a Liquid Crystal Display via Homogeneous Liquid-Liquid Extraction, *Hydrometallurgy*, **137**:148–155 (2013).
- [35] Jha M.K., Kumari A., Jha A.K., Kumar V., Hait J., Pandey B.D., Recovery of Lithium and Cobalt from Waste Lithium-Ion Batteries of Mobile Phone, *Waste Manag.*, **33**(9):1890–1897 (2013).
- [36] Li L., Ge J., Chen R., Wu F., Chen S., Zhang X., Environmental Friendly Leaching Reagent for Cobalt and Lithium Recovery from Spent Lithium-Ion Batteries, *Waste Manag.*, **30**(12):2615–2621 (2010).
- [37] Arshadi M., Mousavi S.M., Rasoulnia P., Enhancement of Simultaneous Gold and Copper Recovery from Discarded Mobile Phone PCBs Using *Bacillus megaterium*: RSM Based Optimization of Effective Factors and Evaluation of Their Interactions, *Waste Manag.*, **57**:158–167 (2016).
- [38] Bahaloo-Horeh N., Mousavi S.M., Shojaosadati S.A., Bioleaching of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Mobile Phone Batteries Using *Aspergillus niger*, *J. Power Sources*, **320**:257–266 (2016).
- [39] Ruan J., Zhu X., Qian Y., Hu J., A New Strain for Recovering Precious Metals from Waste Printed Circuit Boards, *Waste Manag.*, **34**(5):901–907 (2014).
- [40] Amiri F., Yaghmaei S., Mousavi S.M., Bioleaching of tungsten-rich spent hydrocracking catalyst using *Penicillium simplicissimum*, *Bioresour. Technol.*, **102**(2):1567–1573 (2011).
- [41] Kim M.J., Seo J.Y., Choi Y.S., Kim G.H., Bioleaching of Spent Zn-Mn or Ni-Cd Batteries by *Aspergillus* species, *Waste Manag.*, **51**:168–173 (2016).
- [42] Yang Y., Chen S., Li S., Chen M., Chen H., Liu B., Bioleaching Waste Printed Circuit Boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and Its Kinetics Aspect, *J. Biotechnol.*, **173**(1):24–30 (2014).
- [۴۳] مشکینی، محمد؛ ایران‌نژاد، مهدی؛ آزادمه، امیررضا؛ سمیعی بیرق، عبدالله، بررسی امکان استخراج روی از کانی‌های کم عیار اکسیدی با استفاده از باکتری هتروتروف *Pseudomonas aeruginosa* و تطبیق باکتری به غلظت بالای یون روی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **۳۲**(۱):۹۳–۱۰۰ (۲۰۱۳).
- [44] Bahaloo-Horeh N., Mousavi S.M., Enhanced Recovery of Valuable Metals from Spent Lithium-Ion Batteries Through Optimization of Organic Acids Produced by *Aspergillus niger*, *Waste Manag.*, **60**:666–679 (2017).

- [45] Vakilchap F., Mousavi S.M., Shojaosadati S.A., [Role of \*Aspergillus niger\* in Recovery Enhancement of Valuable Metals from Produced Red Mud in Bayer Process](#), *Bioresour. Technol.*, **218**:991–998 (2016).
- [46] Jadhao P., Chauhan G., Pant K.K., Nigam K.D.P., [Greener Approach for the Extraction of Copper Metal from Electronic Waste](#), *Waste Manag.*, **57**:102–112 (2016).
- [47] Asghari I., Mousavi S.M., Amiri F., Tavassoli S., [Bioleaching of Spent Refinery Catalysts: A Review](#), *J. Ind. Eng. Chem.*, **19**(4):1069–1081 (2013).
- [48] Rivero C.P., Hu Y., Kwan T.H., Webb C., Theodoropoulos C., Daoud W., Lin C.S.K., [Current Developments In Biotechnology and Bioengineering](#), *J. Clean. Prod.*, **158**:380-381 (2017).
- [49] Rasoulnia P., Mousavi S.M., Rastegar S.O., Azargoshasb H., [Fungal Leaching of Valuable Metals from a Power Plant Residual Ash Using \*Penicillium simplicissimum\*: Evaluation of Thermal Pretreatment and Different Bioleaching Methods](#), *Waste Manag.*, **52**:309–317 (2016).
- [50] Mehrabani J. V., Shafaei S.Z., Noaparast M., Mousavi S.M., [Bioleaching of High Pyrite Carbon-Rich Sphalerite Preflotation Tailings](#), *Environ. Earth Sci.*, **71**(11):4675–4682 (2014).
- [51] Rastegar S.O., Mousavi S.M., Shojaosadati S.A., Sarraf Mamoori R., [Bioleaching of V, Ni, and Cu from Residual Produced in Oil-Fired Furnaces Using \*Acidithiobacillus ferrooxidans\*](#), *Hydrometallurgy*, **157**:50–59 (2015).
- [52] Pant D., [A Review of Electronic Waste Management Microbial Participation: a Green Technology](#), *Int. J. Environ. Waste Manag.*, **13**(1): 23 (2014).
- [53] Wong, J. W., Tyagi, R. D., Pandey, A., [Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Solid Waste Management.](#), Elsevier (2016).
- [54] Brandl H., Bosshard R., Wegmann M., [Computer-Munching Microbes: Metal Leaching from Electronic Scrap by Bacteria and Fungi](#), *Process Metall.*, **9**(C):569–576 (1999).
- [55] Choi M.-S., Cho K.-S., Kim D.-J.D.-S., Kim D.-J.D.-S., [Microbial Recovery of Copper from Printed Circuit Boards of Waste Computer by \*Acidithiobacillus ferrooxidans\*](#), *J. Environ. Sci. Heal. Part A- Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, **39**:2973–2982 (2004).
- [56] Faramarzi M.A., Stagars M., Pensini E., Krebs W., Brandl H., [Metal Solubilization from Metal-Containing Solid Materials by Cyanogenic \*Chromobacterium violaceum\*](#), *J. Biotechnol.*, **113**(1–3): 321–326 (2004).
- [57] Creamer N.J., Baxter-Plant V.S., Henderson J., Potter M., Macaskie L.E., [Palladium and Gold Removal and Recovery from Precious Metal Solutions and Electronic Scrap Leachates by \*Desulfovibrio desulfuricans\*](#), *Biotechnol. Lett.*, **28**(18):1475–1484 (2006).
- [58] Chi T.D., Lee J.C., 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**(11):1219–1222 (2011).
- [59] Zhang C., Cai Y., Wang J., Bai J., Zhou Y., Wu W., Mao W., [Recovery of Copper from Bio-Leaching Solutions of Waste Printed Circuit Boards Waste by Ion Exchange](#), *Proc. - 2010 Int. Conf. Digit. Manuf. Autom. ICDMA 2010*, **2**:138–140 (2010).

- [60] Vestola E.A., Kuusenaho M.K., Närhi H.M., Tuovinen O.H., Puhakka J.A., Plumb J.J., Kaksonen A.H., [Acid Bioleaching of Solid Waste Materials From Copper, Steel and Recycling Industries](#), *Hydrometallurgy*, **103(1-4)**:74-79 (2010).
- [61] Ilyas S., Ruan C., Bhatti H.N., Ghauri M.A., Anwar M.A., [Column Bioleaching of Metals from Electronic Scrap](#), *Hydrometallurgy*, **101(3-4)**:135-140 (2010).
- [62] Xiang Y., Wu P., Zhu N., Zhang T., Liu W., Wu J., Li P., [Bioleaching of Copper from Waste Printed Circuit Boards by Bacterial Consortium Enriched from Acid Mine Drainage](#), *J. Hazard. Mater.*, **184(1-3)**:812-818 (2010).
- [63] Yamane, Luciana Harue, Denise Crocce Romano Espinosa, and Jorge Alberto Soares Tenório., [Recovery of Copper From Printed Circuit Boards Waste by Bioleaching](#), "Recycling of Electronic Waste II: Proceedings of the Second Symposium", John Wiley & Sons, Inc., (2011).
- [64] Zhu N., Xiang Y., Zhang T., Wu P., Dang Z., Li P., Wu J., [Bioleaching of Metal Concentrates of Waste Printed Circuit Boards by Mixed Culture of Acidophilic Bacteria](#), *J. Hazard. Mater.*, **192(2)**:614-619 (2011).
- [65] Wang Q., Yang J., Wang Q., Wu T., [Effects of Water-Washing Pretreatment on Bioleaching of Heavy Metals from Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash](#), *J. Hazard. Mater.*, **162(2-3)**: 812-818 (2009).
- [66] Zhang T., Zhu N., Cheng D., Wu P., [PCR-DGGE Analysis of Microbial Community During Bioleaching Process of Waste Printed Wire Boards by Acidophilic Bacteria](#), *Guocheng Gongcheng Xuebao/Chinese J. Process Eng*, **12**:466-471 (2012).
- [67] Simona C.C., & Micle V., [Consideration Concerning Factors Influencing Bioleaching Processes](#), **4**:76-79 (2011).
- [68] Brandl H., Lehmann S., Faramarzi M.A., Martinelli D., [Biomobilization of Silver, Gold, and Platinum from Solid Waste Materials by HCN-Forming Microorganisms](#), *Hydrometallurgy*, **94(1-4)**:14-17 (2008).
- [69] Brandl, H., [Microbial Leaching of Metals](#), *Biotechnology Set, Second Edition*, 191-224 (2008).
- [70] Natarajan G., Ting Y.P., [Pretreatment of e-Waste and Mutation of Alkali-Tolerant Cyanogenic Bacteria Promote Gold Bio recovery](#), *Bioresour. Technol.*, **152**:80-85 (2014).
- [71] Bosecker K., [Bioleaching: Metal Solubilization by Microorganisms](#), *FEMS Microbiol. Rev.*, **20(3-4)**: 591-604 (1997).
- [72] Chi T.D., Lee J.C., 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(11)**:1219-1222 (2011).
- [73] Niu Z., Zou Y., Xin B., Chen S., Liu C., Li Y., [Process Controls for Improving Bioleaching Performance of both Li and Co from Spent Lithium-Ion Batteries at High Pulp Density and Its Thermodynamics and Kinetics Exploration](#), *Chemosphere*, **109**:92-98 (2014).
- [74] Amiri F., Mousavi S.M., Yaghmaei S., Barati M., [Bioleaching Kinetics of a Spent Refinery Catalyst Using \*Aspergillus niger\* at Optimal Conditions](#), *Biochem. Eng. J.*, **67**:208-217 (2012).

- [75] 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).
- [76] 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).
- [77] Santhiya D., Ting Y.-P., [Use of Adapted \*Aspergillus niger\* in the Bioleaching of Spent Refinery Processing Catalyst.](#), *J. Biotechnol.*, **121**(1):62–74 (2006).
- [78] Yang J., Wang Q., Wang Q., Wu T., [Heavy Metals Extraction from Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash Using Adapted Metal Tolerant \*Aspergillus niger\*.](#), *Bioresour. Technol.*, **100**(1):254–60 (2009).