

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2021.289449.1119



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.121.6.8



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

## Bioleaching of Basic Metals from Computer Printed Circuit Boards Waste Using *Penicillium Simplicissimum*

M. Arshadi<sup>1</sup>, A. Esmaeili<sup>2</sup>, S. Yaghmaei<sup>3\*</sup>

1- The Researcher of Postdoctoral, Sharif University of Technology

2- M. Sc. in Biotechnology Engineering, Sharif University of Technology

3- Professor of Biotechnology Engineering, Sharif University of Technology

E-mail: yaghmaei@sharif.edu

### Abstract

*Background and Objectives:* By improving technology at recent years, some new environmental problems created. Electronic waste is one of the important problems. Recycling of e-wastes is limited. Just some countries by using traditional methods are recycling e-wastes. Pyrometallurgy and hydrometallurgy are two recycling methods for e-waste. These traditional methods are expensive and non-ecofriendly. Bioleaching is a new and efficient method for e-waste recovery which by interacting microorganisms helps to metal recovery. In this article biorecovery of Cu, Al, Ni, Zn, Mn, Mg, Ba, Cr, and Fe from printed circuit boards using one-step bioleaching was studied. To this purpose computer printed circuit boards were fined and the particle size was in the range of 75-149 micron. *Penicillium simplicissimum* was adapted to 1% (w/v) of computer printed circuit boards. After adaptation and bioleaching process Cu, Al, Ni, Zn, Mn, Mg, Ba, Cr, and Fe were bioleached about 94%, 99/8%, 100%, 100%, 61%, 81%, 46%, 26%, and 100% respectively. This paper proved the great potential of the bio-hydrometallurgical route to recover base metals from electronic wastes using fungi.

Received: 6 June 2021

Accepted: 14 July 2021

Page Number: 55-65

### Keywords:

Bioleaching, One-Step, Computer Printed Circuit Boards, *Penicillium Simplicissimum*, Basic Metals

### Please Cite this Article Using:

Arshadi, M., Esmaeili, A., Yaghmaei, S., "Bioleaching of Basic Metals from Computer Printed Circuit Boards Waste Using *Penicillium Simplicissimum*", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 121, pp. 55-65, In Persian, (2022).



## فروشویی زیستی فلزات اساسی از زباله‌های صفحات مدارچاپی رایانه با استفاده از قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم

مهدخت ارشدی<sup>۱</sup>، علیرضا اسماعیلی<sup>۲</sup>، سهیلا یغمایی<sup>۳\*</sup>

۱- پژوهشگر دورهٔ رسالهٔ دکتری مهندسی بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی شریف

۲- کارشناسی ارشد مهندسی بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی شریف

۳- استاد مهندسی بیوتکنولوژی، دانشگاه صنعتی شریف

پیام نگار: yaghmaei@sharif.edu

### چکیده

زباله‌های الکتریکی و الکترونیکی دو تا سه برابر سریع‌تر از سایر زباله‌های جامد شهری در حال تولید شدن هستند. بازیابی فلزات این زباله‌ها علاوه بر کاهش مواد خطرناک، نیاز جهانی برای تولید فلزات جدید را تأمین می‌کند. در این مقاله بازیافت زیستی فلزات مس، آلومینیوم، نیکل، روی، منگنز، منیزیم، باریوم، کروم و آهن از صفحات مدارچاپی رایانه با استفاده از فروشویی زیستی تک مرحله‌ای مطالعه شده است. صفحات مدارچاپی رایانه تا اندازهٔ ذرات ۱۴۹-۷۵ میکرون پودر شدند. قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم<sup>۱</sup> به ۱ درصد (وزنی - حجمی) از صفحات مدارچاپی رایانه خود داده شد. بعد از خوسازی و انجام فرایند فروشویی زیستی هر یک از فلزات مس، آلومینیوم، نیکل، روی، منگنز، منیزیم، باریوم، کروم و آهن به ترتیب برابر با ۹۹/۸٪، ۱۰۰٪، ۱۰۰٪، ۱۰۰٪، ۶۱٪، ۸۱٪، ۴۶٪، ۲۶٪ و ۱۰۰٪ استخراج شدند؛ در نتیجه فرایند فروشویی زیستی با استفاده از قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم روشی مؤثر در حذف فلزات سنگین از زباله‌های الکترونیکی شناخته شد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۳

شماره صفحات: ۵۵ تا ۶۵

### کلیدواژه‌ها:

فروشویی زیستی،

تک مرحله‌ای،

صفحات مدارچاپی رایانه،

پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم،

فلزات اساسی

\* تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکدهٔ مهندسی شیمی و نفت

### استناد به مقاله:

ارشدی، م.، اسماعیلی، ع. ر.، یغمایی، س.، "فروشویی زیستی فلزات اساسی از زباله‌های صفحات مدارچاپی رایانه با استفاده از قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست‌ویکم، شماره ۱۲۱، صص. ۵۵-۶۵، (۱۴۰۱).

## ۱. مقدمه

در قرن اخیر با گسترش فناوری و سامانه‌های هوشمند، وسایل الکترونیکی و الکترونیک بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ این موضوع سبب افزایش تولید وسایل الکترونیکی شده است. چون با گذر زمان در طی چند سال، این وسایل منسوخ و مدل‌های به‌روز شده از هر یک به‌سرعت به بازار وارد می‌شوند؛ مدل‌های قبلی کارایی خود را از دست می‌دهند و از رده خارج می‌شوند. وسایل الکترونیکی از کارافتاده با نام زباله‌های الکترونیکی به یکی از معضلات دنیای امروز تبدیل شده و زندگی بشر را به چالش کشیده است [۱]. آمار نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۴ حدود ۴۲ میلیون تن زباله الکترونیکی تولید شده است. این مقدار معادل سرانه ۵/۹ کیلوگرم به ازای هر فرد است [۲]. همچنین در سال‌های اخیر میزان تولید زباله‌های الکترونیکی ۳-۵٪ رشد داشته است؛ بدین ترتیب میزان تولید زباله‌های الکترونیکی در سال ۲۰۱۸ به مقدار ۵۰ میلیون تن رسید [۲،۳]. گزارش شده است که نرخ تولید زباله‌های الکترونیکی حدود سه برابر بیشتر از تولید سایر پسماندهای جامد است [۴]. همچنین تخمین زده شده که تولید جهانی زباله‌های الکترونیکی در سال ۲۰۲۱ برابر ۵۷/۴ میلیون تن در سال بوده است. پیش‌بینی می‌شود که این مقدار در سال ۲۰۳۰ به ۷۴/۷ میلیون تن در سال برسد. قاره آسیا با تولید ۱۶ میلیون تن و آمریکا با تولید ۱۱/۷ میلیون تن زباله‌های الکترونیکی بیشترین میزان تولید با نرخ سرانه را به ترتیب ۳/۷ کیلوگرم و ۱۲/۲ کیلوگرم به ازای هر نفر دارند. با توجه به آمار، موضوع زباله‌های الکترونیکی در کشورهای توسعه‌یافته به یک نگرانی و چالش تبدیل شده است [۱].

زباله‌های الکترونیکی حاوی بیش از ۱۰۰۰ نوع ماده مختلف از جمله چوب، پلاستیک، فلز و مواد دیگر است؛ این زباله‌ها دست کم شصت نوع فلز مختلف را از جمله فلزهای بسیار ارزشمند مانند طلا، پلاتین، پالادیوم، نقره و مس شامل می‌شوند. بازیافت این فلزها می‌تواند علاوه بر ارزش اقتصادی حاصل از آن، با کاهش نیاز جهانی برای تولید فلزات و کاهش دفع مواد خطرناک، به جامعه بشری کمک کند [۵]؛ اما اکنون بیشتر زباله‌های الکترونیکی دفن و یا سوزانیده می‌شوند و تنها ۱۵٪ از آن‌ها در دنیا به‌طور کامل بازیافت می‌شوند [۶].

در این میان رایانه‌های شخصی یکی از مهم‌ترین انواع زباله‌های الکترونیکی است؛ به دلیل کاهش طول عمر رایانه‌ها (از ۴ سال به ۹ ماه بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۵) حجم زیادی از رایانه‌ها به زباله تبدیل شده‌اند. نیز پیش‌بینی شده است که در پنج سال آینده حدود یک میلیارد رایانه دور انداخته شود [۷،۸].

مهم‌ترین قسمت زباله‌های الکترونیکی، صفحات مدارچاپی<sup>۲</sup> هستند؛ این صفحات بخش مهمی از فلزات را در خود نگه داشته‌اند. تولید این صفحات در سال‌های اخیر، ۹٪ افزایش داشته است [۹]. وزن صفحات مدارچاپی به‌طور میانگین بین ۳٪ تا ۶٪ از وزن پسماندهای الکترونیکی است [۳]. این عدد برای صفحات مدارچاپی تلویزیون، رایانه و تلفن همراه به ترتیب مقدار ۷/۴٪، ۱۸/۷۶٪، و ۲۱/۳٪ گزارش شده است [۱۰]. ۴۰٪ از ارزش کلی فلزات زباله‌های الکترونیکی در صفحات مدارچاپی نهفته است؛ پتانسیل بازیابی این فلزات به ازای هر تن از آن‌ها ۲۱۲۰۰ دلار تخمین زده شده است [۱۱ و ۳].

ترکیب پیچیده و ساختار فیزیکی صفحات مدارچاپی، بازیابی آن‌ها را به یک چالش بزرگ تبدیل کرده است. حضور فلزات مختلف مانند فلزات ارزشمند پلاتین، طلا و نقره، فلزات اساسی مانند آلومینیوم، مس و روی، فلزات سمی مانند جیوه و سرب و همچنین ترکیبات سرمایی و پلاستیکی، بازیابی را از لحاظ اقتصادی ارزشمند و دفن را از لحاظ محیط زیستی خطرناک قلمداد می‌کند [۱۳ و ۱۲]. حضور ترکیبات مختلف و انواع مواد در آن‌ها مانع سهولت بازیابی فلزات می‌شود [۱۴]. همچنین در حال حاضر از روش‌های سنتی برای بازیابی این فلزات استفاده می‌شود. در این روش‌ها تنها نهایتاً ۳۵٪ فلزات با خلوص بین ۸۵٪ تا ۹۵٪ بازیابی می‌شوند [۱۵ و ۱۶]؛ اما از سوی دیگر بازیافت فلزات از زباله‌های الکترونیکی سودآور و اقتصادی است و ظرفیت ایجاد یک اقتصاد گردشی را دارد. همچنین در حفظ معادن طبیعی و جلوگیری از تخریب محیط زیست نقش به‌سزایی دارد [۱۷].

برای بازیابی فلزات از صفحات مدارچاپی، تا کنون روش‌های پیرومتالوژی<sup>۳</sup> و هیدرومتالوژی<sup>۴</sup> امتحان شده است [۱۸ و ۱۹]. این روش‌ها گران، ناپایمان و پرهزینه است. در دهه اخیر روش بیوهیدرومتالوژی<sup>۵</sup> برای بازیابی فلزات از زباله‌های الکترونیکی مطرح

2. Printed Circuit Boards (PCBs)  
3. Pyrometallurgy  
4. Hydrometallurgy  
5. Bio-hydrometallurgical

1. <https://www.statista.com/statistics/1067081/generation-electronic-waste-globally-forecast/>

تهران خریداری شد. در این مرکز زباله‌های الکترونیکی بدون هیچ فرایندی به خارج از کشور صادر می‌شوند. ابتدا مقدار ۳۰۰ گرم از این صفحات مدارچاپی به صورت دستی تا ابعاد حدود ۱ سانتی متر مربع خرد، سپس با استفاده از آسیاب ماهواره‌ای<sup>۸</sup> (HERZOG, HSM 100, Germany) پودر شدند. نمونه از سرند سایز مش ۲۰۰ عبور داده شد. بخشی از نمونه که روی سرند ماند از نو آسیاب شد تا نمونه به طور کامل از آن عبور کند. سپس نمونه از سرند مش ۴۰۰ از نو عبور داده شد. بخشی از نمونه که بر روی الک به جا ماند برای آزمایش‌ها استفاده شد. بنا بر این نمونه در مناسب‌ترین بازه فروشوی زیستی، بر اساس گزارش‌ها، تا اندازه بین ۱۴۹-۷۵ میکرون به صورت پودر درآمد.

## ۲-۲ ریزاندامگان و مواد شیمیایی

قارچ *پنیسیلیوم سیمپلیسیسیموم* (BBRC-20019) از مرکز تحقیقات بیوشیمی و محیط زیست<sup>۹</sup> دانشگاه صنعتی شریف تهیه و برای تنظیم pH محیط از اسیدسولفوریک<sup>۱۰</sup> و سدیم هیدروکسید<sup>۱۱</sup> یک مولار تهیه شد. به منظور کشت جامد و مایع قارچ از محیط کشت بوسشارد<sup>۱۲</sup> و محیط کشت آگار دکستروز سیب زمینی<sup>۱۳</sup> استفاده شد. همه مواد استفاده شده ساخت کارخانه مرک<sup>۱۴</sup> آلمان است. آب مقطر دیونیزه برای آماده‌سازی محلول‌ها به کار رفت.

## ۳-۲ ترکیبات صفحات مدارچاپی رایانه

مشخصات ساختاری صفحات مدارچاپی به وسیله فلورانس پرتو ایکس (XRF)<sup>۱۵</sup> (Spectro Xepos, Germany) تعیین و در جدول (۱) نشان داده شده است. پراش پرتو ایکس (XRD)<sup>۱۶</sup> (EQUINOX 3000, Inel, France) برای مشخص کردن فازهای بلورین زباله‌های الکترونیکی استفاده شد. طبق نتایج Cu, AlCuO, SiO<sub>2</sub>, CuBr, Pb, Al و بیشترین قسمت از صفحات مدارچاپی رایانه را به خود اختصاص داده‌اند (شکل (۱)).

شده است. این روش کم‌هزینه، ایمن و دوستدار محیط زیست است [۲۲-۲۰]. فروشوی زیستی<sup>۱</sup> یکی از زیرشاخه‌های اصلی بیوهیدرومتالورژی در بازیابی فلزات است. این روش بر اساس توانایی ریزاندام‌ها در تولید متابولیت‌های زیستی است. طبق تحقیقات گذشته تا کنون ریزاندام‌های اتوتروفیک<sup>۲</sup> و هتروتروفیک<sup>۳</sup>، برای بازیابی فلزات بررسی شده‌اند [۲۳ و ۲۴]. ریزاندام‌های کیمولیتوتروف<sup>۴</sup> [۲۵]، هتروتروف<sup>۵</sup> [۲۶]، باکتری‌های گرمادوست [۲۷] و همچنین قارچ‌ها [۲۰]، در بازیابی فلزات شناخته شده‌اند. این ریزاندام‌ها به دلیل توانایی هایشان در انحلال فلزات موجود در زباله‌های الکترونیکی مؤثر بوده‌اند. باکتری‌های *اسیدیتیوباسیلیوس فرواکسیدانس*<sup>۶</sup> و *اسیدیتیوباسیلیوس تیواکسیدانس*<sup>۷</sup> معروف‌ترین باکتری‌های اسیددوست در فرایند فروشوی زیستی فلزات از زباله‌های الکترونیکی بوده‌اند [۲۸]. تا کنون مطالعات بسیار کمی بر روی استفاده از قارچ‌ها در بازیابی فلزات انجام شده است [۲۹]. علت می‌تواند به دوره‌های بلندمدت فرایند استفاده از قارچ‌ها، مشکلات کنترل فرایند و تأمین مواد غذایی ثابت برای رشد قارچ‌ها ارتباط داشته باشد [۳۰]. اما از سوی دیگر قارچ‌ها در pHهای قلیایی امکان رشد دارند؛ در حالی که باکتری‌ها معمولاً در این pHها غیرفعال هستند. همچنین فروشوی فلزات به دلیل فاز تأخیر کوتاه قارچ‌ها سریع‌تر از فروشوی باکتریایی است [۳۰-۳۲]. قارچ *پنیسیلیوم سیمپلیسیسیموم* یکی از قارچ‌های مهم مورد استفاده در فرایندهای فروشوی زیستی است. از این قارچ تا کنون به منظور فروشوی زیستی فلزات از کاتالیست‌های فرسوده پالایشگاه [۳۳] و خاکستر بادی نیروگاه [۳۴ و ۳۵] استفاده شده است. این قارچ می‌تواند اسیدهای آلی با غلظت بالا در گستره وسیعی از pH تولید کند. همچنین نسبت به فروشوی باکتریایی سرعت بالاتری دارد؛ بنابراین در پژوهش پیش رو بازیابی فلزات از صفحات مدارچاپی رایانه با استفاده از قارچ *پنیسیلیوم سیمپلیسیسیموم* بررسی شده است.

## ۲. روش بررسی

### ۲-۱ منبع و مشخصات صفحات مدارچاپی رایانه

صفحات مدارچاپی رایانه از مرکز جمع‌آوری زباله‌های الکترونیکی

1. Bioleaching
2. Autotrophic
3. Heterotrophic
4. Chemolithotrophic
5. Heterotrophic
6. *Acidithiobacillus ferrooxidans*
7. *Acidithiobacillus thiooxidans*

8. Ball Mill

9. Biochemical and Bioenvironmental Research Center

10. Sulfuric Acid

11. Sodium Hydroxide

12. Bosshard Medium

13. Potato Dextrose Agar

14. Merck

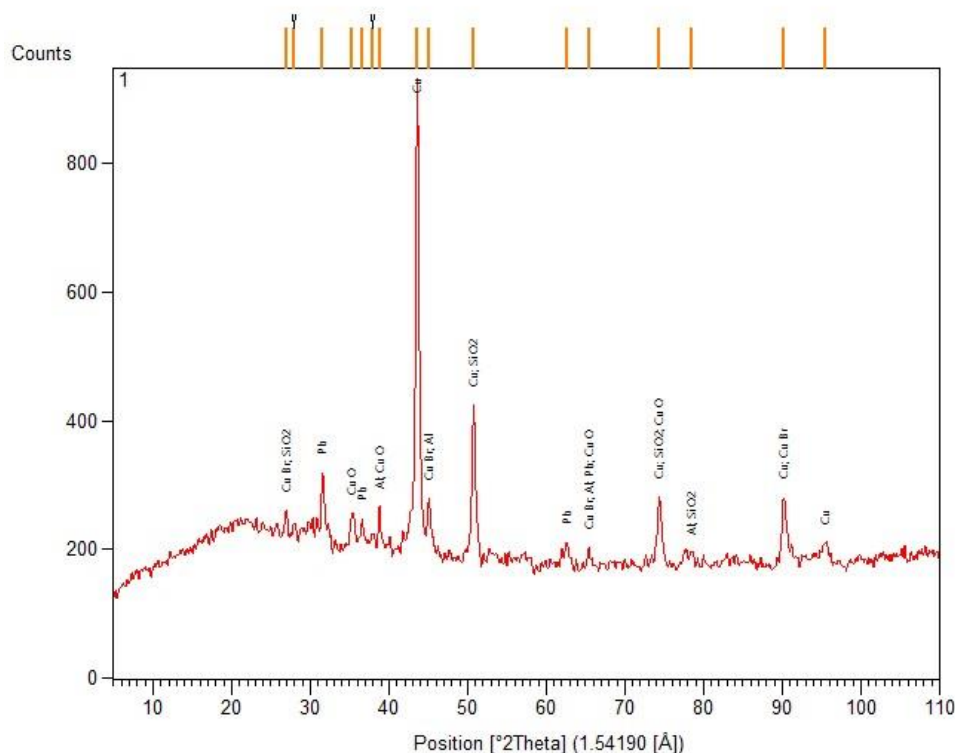
15. X-Ray Fluorescence (XRF)

16. X-ray Diffraction (XRD)

جدول ۱. مشخصات صفحات مدارچاپی رایانه با آزمون XRF بر حسب ppm.

Table 1. Metal content of computer PCBs analyzing by XRF (ppm).

Ti	Ca	K	Cl	S	P	Si	Al	Mg	Na
2513	43870	543	11450	1786	477	82200	60510	5787	8442
Ge	Ga	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	Mn	Cr	V
0.5>	13	3116	98280	976	>3	13450	1187	443	53
Ag	Mo	Nb	Zr	Y	Sr	Rb	Br	Se	As
416	1>	1>	151	1>	469	>0.5	42380	0.5>	21
Pr	Ce	La	Ba	Cs	I	Te	Sb	Sn	Cd
2>	2>	2>	4274	4>	3>	3>	2746	4598	0.3
	U	Th	Bi	Pb	Tl	Hg	Ta	Hf	Nd
	47	311	68	829	46	1>	1>	1>	123



شکل ۱. نتایج مربوط به تجزیه پراش پرتو ایکس صفحات مدارچاپی رایانه.

Figure 1. XRD analysis of computer PCBs.

بدین ترتیب قارچ‌ها را مرحله به مرحله در مجاورت فلزات سنگین قرار می‌دهند.

در این پژوهش ابتدا در زیر هود و تحت شرایط کاملاً استرون اسپورهای قارچی بر روی پلیت به مدت ۷ روز کشت داده، سپس

## ۴-۲ خوسازی قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیوم

حضور فلزات سنگین می‌تواند مانع از رشد و سبب کاهش تولید متابولیت‌های قارچی شود. به همین دلیل لازم است قارچ‌ها به محیط خو داده شوند تا اثر مهارکنندگی فلزات سنگین کاهش یابد.

درصد (وزنی-حجمی) از پودر نمونه تلقیح می‌شود [۳۱]. این مراحل تا غلظت ۱ درصد (وزنی-حجمی) یا به عبارتی ۱۰ گرم بر لیتر از پودر نمونه، ادامه یافت. در همه آزمایش‌های بعدی از قارچ خودآده‌شده به ۱۰ گرم بر لیتر از پودر نمونه استفاده شد.

**۲-۵ فرایند فروشویی و بازیابی فلزات به روش تک‌مرحله‌ای**  
 برای سترون‌سازی، ۱۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت بوسشارد و ۱ درصد (وزنی-حجمی) از پودر صفحات مدارچاپی در ارلن‌مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری، به‌طور جداگانه هر یک به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس اتوکلاو می‌شود. سپس در شرایط کاملاً استریل و زیر هود بیولوژیکی از روی پلیت قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم که از آخرین مرحله خوسازی تهیه شده، به روش گفته‌شده در قسمت ۲-۴، یک میلی‌لیتر از سوسپانسیون اسپوری با غلظت  $1 \times 10^7$  (میلی‌لیتر/اسپور) به ارلن حاوی محیط کشت اتوکلاو شده، تلقیح می‌شود. سپس محلول حاصل به ارلن شامل پودر نمونه، اضافه و در گرمخانه لرزان با دمای ۳۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱۳۰ دور بر دقیقه قرار داده می‌شود [۹]. در شکل (۲) نمایی از ریخت‌شناسی قارچ‌ها در ارلن‌مایر (که به صورت گویچه‌های معلق هستند) و کشت‌شده در پلیت نشان داده شده است.

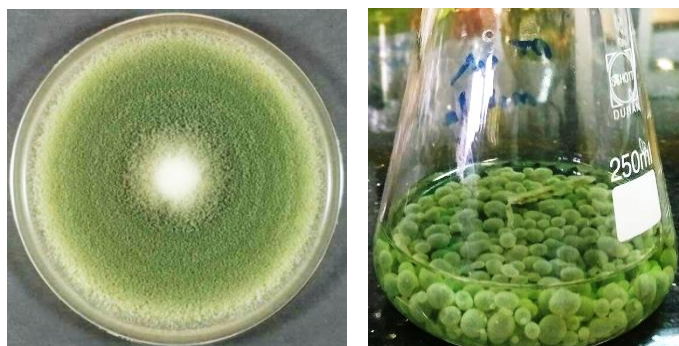
با استفاده از آب مقطر سترون اسپورهای رشد یافته شسته شد. پس از تهیه سوسپانسیون اسپوری تعداد آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ (بزرگ‌نمایی ۴۰ برابر) و لام نئوبار (مشخصات عمق ۰/۱ میلی‌متر و مساحت ۰/۰۲۵ میلی‌متر مربع) شمارش شد. برای شمارش ابتدا چند میکرولیتر از محلول به فضای بین لام نئوبار و لامل تزریق شد. میانگین تعداد اسپورهای موجود در یک مربع لام به دست آمد و در عدد  $4 \times 10^6$  ضرب شد تا تعداد اسپورها در یک میلی‌لیتر از محلول به دست بیاید. در آخر تعداد  $10^7$  اسپور با سمپلر سترون جدا و به ۱۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت بوسشارد در ارلن‌مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۰/۱ درصد (وزنی-حجمی) پودر نمونه سترون تلقیح، سپس با استفاده از گرمخانه لرزان<sup>۱</sup> در سرعت ۱۳۰ دور بر دقیقه و دمای ۳۰ درجه سلسیوس نگهداری می‌شود [۹]. ترکیبات محیط کشت بوسشارد در جدول (۲) آمده است.

pH محلول به‌طور روزانه اندازه‌گیری می‌شود. پس از ایجاد کاهش محسوس pH که به معنای این است که قارچ در اوایل فاز رشد فعالش قرار گرفته است، یک میلی‌لیتر از محیط محلول به سطح پلیت با محیط کشت آگار دکستروز سیب‌زمینی تلقیح می‌شود. پس از طی یک هفته و اطمینان از رشد کامل قارچ، همه مراحل قبلی تکرار می‌شود. این بار  $10^7$  اسپور شمارش و به ارلنی حاوی ۰/۲

جدول ۲. ترکیبات محیط کشت بوسشارد.

Table 2. Bosshard medium.

Composition	Yeast Extract	KCl	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	NaNO <sub>3</sub>	Sucrose
Concentration (g/l)	1.6	0.025	0.025	0.5	1.5	100



شکل ۲. ریخت‌شناسی قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیسیموم در الف) ارلن حاوی محیط کشت بوسشارد و ۱ درصد (وزنی-حجمی) پودر جامد صفحات مدارچاپی ب) کشت‌شده در پلیت حاوی محیط نوترینت آگار.

Figure 2. The morphology of *penicillium simplicissimum* a) cultured on Erlenmeyer containing Bosshard medium and 1(w/v) computer PCBs powder b) cultured on nutrient agar.

1. Incubator

سلسیوس منتقل و بعد از آن فیلتر شد. با استفاده از آب مقطر محلول رد شده از فیلتر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. با استفاده از آزمون ICP مقدار یون‌های فلزی موجود در محلول معین شد. آزمایش کنترل با استفاده از اسیدنیتریک ۵ درصد و غلظت یکسان از پودر نمونه انجام شد [۳۶].

### ۳-۳ محاسبه میزان بازیابی فلزات

میزان بازده استخراج فلزات از معادله (۱) به دست می‌آید:

$$\text{درصد بازیابی فلزات} = \frac{(C_S + C_B) \times V_S}{C_F \times M_F} \times 100 \quad (1)$$

در این معادله  $C_S, C_B, V_S, C_F, M_S$  به ترتیب غلظت‌های فلز حل شده در محلول فروشویی، یون‌های فلزی تجمع یافته در توده زیستی، حجم محیط فروشویی، مقدار فلز در پودر جامد اولیه و جرم پودر جامد استفاده شده در آزمایش است [۳۵].

پس از مراحل گفته شده و آماده شدن نتایج تجزیه غلظت یون‌های فلزی موجود در محلول و هم‌چنین یون‌های فلزی تجمع یافته در توده زیستی قارچ با توجه به رابطه فوق، درصد بازیابی فلزات آلومینیوم (Al)، باریم (Ba)، کروم (Cr)، مس (Cu)، آهن (Fe)، منیزیم (Mg)، منگنز (Mn)، نیکل (Ni) و روی (Zn) به ترتیب برابر با ۹۹/۸، ۴۶، ۲۶، ۹۴، ۱۰۰، ۸۱، ۶۱، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد به دست آمد. این نتایج در شکل (۳) نیز نمایش داده شده است.

با توجه به گزارش‌های امیری و همکاران [۳۳] (۲۰۱۱) در رابطه با همین سویه قارچ بعد از مدت ۱۵ روز از تلقیح اسپوری و قراردادن ارلن فروشویی در گرمخانه لرزان با دمای ۳۰ درجه سلسیوس و سرعت ۱۳۰ دور بر دقیقه با تولید پیگمان‌های قرمز رنگ که موجب افزایش pH نیز می‌شوند، قارچ‌ها وارد فاز مرگ شده‌اند و زمان مناسبی برای پایان فروشویی در نظر گرفته می‌شود.

### ۳. بحث و نتایج

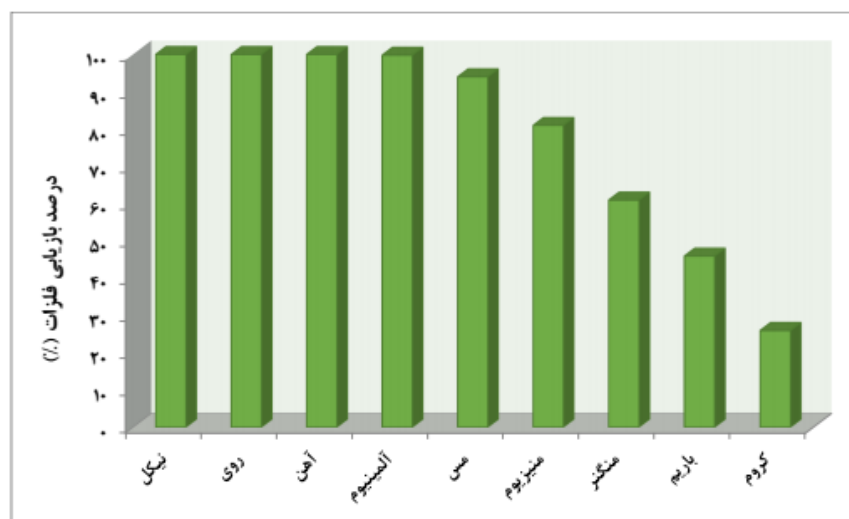
#### ۳-۱ اندازه‌گیری میزان یون‌های فلزی

توده زیستی با پالایش با کاغذ صافی از محیط، جدا شد سپس با استفاده از طیف‌سنجی نشری اتمی با پلاسمای القائی جفت شده<sup>۱</sup> (ICP-OES) غلظت یون‌های فلزی مختلف موجود در محلول اندازه‌گیری شد.

#### ۳-۲ اندازه‌گیری یون‌های فلزی تجمع یافته در توده زیستی

##### قارچ

مواد جامد مانده بر روی کاغذ صافی در کوره<sup>۲</sup> با دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت یک روز قرار داده شد. این مواد در یک ارلن‌مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری با ۵۰ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۵ درصد مخلوط و برای دو ساعت در دمای اتاق شیک شد. پس از اطمینان از مخلوط شدن کامل، به مدت نیم‌ساعت به حمام آب داغ ۸۰ درجه



شکل ۳. درصد بازیابی فلزات مختلف با فروشویی زیستی.

Figure 3. Metal recovery (%) with bioleaching.

1. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES)

2. Oven

هم‌چنین بیان شده که اصلی‌ترین متابولیت در استخراج فلز مس، گلوکونیک اسید است. هم‌چنین اگزالیک اسید مهم‌ترین متابولیت در استخراج فلزهای روی، نیکل، آلومینیوم و آهن است [۳۷ و ۳۸]. بنابراین مطابق با شکل (۳)، با استفاده از قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیوم که توانایی تولید عمده گلوکونیک اسید و اگزالیک اسید را دارد فلزهای مس، نیکل، روی، آلومینیوم و آهن بیشینه میزان استخراج را دارند.

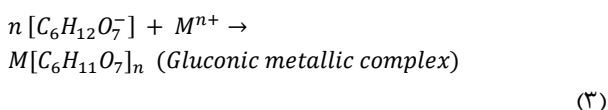
جدول (۳) نتایج حاصل از این پژوهش را با برخی از پژوهش‌های گذشته در خصوص فروشویی قارچی پسماندهای جامد مقایسه می‌کند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیوم همانند قارچ اسپرژیلوس نایجر و بهمان مقدار می‌تواند در فروشویی زیستی پسماندهای جامد مؤثر باشد. علاوه بر این در این پژوهش تعداد فلزهایی بسیار بیشتری نسبت به پژوهش‌های پیشین مطالعه شده و میزان بازیابی فلزات نسبت به بسیاری از آن‌ها بهبود داشته است.

#### ۴. نتیجه‌گیری

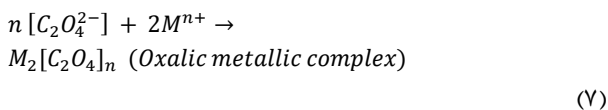
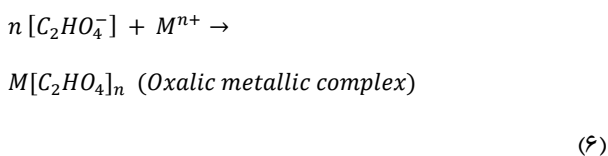
خوسازی قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیوم با یون‌های فلزی صفحات مدارچاپی رایانه با چگالی توده ۱ درصد (وزنی-حجمی) ظرفیت بالای تحمل این ریزاندام را در محیط حاوی انواع مختلف فلزات نشان می‌دهد. با توجه به مدت زمان فروشویی زیستی و هم‌چنین میزان بسیار بالای بازیابی فلزات که در روش‌های مرسوم برای همین میزان بازیابی نیاز به هزینه‌های گزاف و آلودگی‌های محیط زیستی فراوانی خواهد بود، می‌توان نتیجه گرفت که فروشویی زیستی صفحات مدارچاپی رایانه، با استفاده از قارچ‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از روش‌های حائز اهمیت در این موضوع مطرح شود که مستلزم بررسی‌های بیشتر و بهینه‌سازی شرایط موجود است.

اسیدهای آلی، عامل اصلی استخراج فلزات به‌وسیله قارچ‌ها هستند؛ نوع و مقدار اسیدهای آلی ترشح‌شده در میزان بازیابی فلزات مختلف تأثیرگذار است. مطابق با تحقیقات محققان پیشین، گلوکونیک اسید اصلی‌ترین متابولیت تولیدشده به‌وسیله قارچ پنسیلیوم سیمپلیسیوم است. هم‌چنین اگزالیک اسید یکی دیگر از متابولیت‌های تولید شده است. میزان تولید اگزالیک در محیط‌های حاوی نیکل افزایش می‌یابد [۳۷]. واکنش‌های بین گلوکونیک اسید و اگزالیک اسید با فلزات در معادلات زیر آمده است [۳۸]:

#### Gluconic acid



#### Oxalic acid





جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با پژوهش‌های پیشین.

Table 3. Comparison of the results of this study with literature.

Reference	Waste	Used Fungi	Metal Recovery
Previous study	E-waste	<i>Penicillium simplicissimum</i>	Cu 94% Al 100% Ni 100% Zn 100% Mn 61% Mg 81% Ba 46% Cr 26% Fe 100%
[33]	Spent refinery hydrocracking catalyst	<i>Penicillium simplicissimum</i>	W 100% Fe 100% Mo 93% Ni 66% Al 25%
[34]	Vanadium-rich power plant residual ash	<i>Penicillium simplicissimum</i>	V 90% Ni 49%
[35]	Power plant residual ash	<i>Penicillium simplicissimum</i>	V 100% Ni 40% Fe 48%
[34]	Vanadium-rich power plant residual ash	<i>Aspergillus niger</i>	V 97% Ni 50%
[9]	E-waste	<i>Aspergillus niger</i>	Cu 97% Ni 74%
[30]	Spent Zn-Mn or Ni-Cd batteries	<i>Aspergillus niger</i>	Zn 90% Mn 90%
[31]	Spent refinery hydrocracking catalyst	<i>Aspergillus niger</i>	W 100% Fe 78% Mo 91% Ni 66% Al 14%
[32]	Lateritic chromite overburden	<i>Aspergillus niger</i>	Ni 71% Co 67%

مراجع

- [1] Kumar, M., Holuszko, M., "E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices", *Resources, Conservation, and Recycling*, 122: pp. 32-42, (2017).
- [2] Blade, C. P., Kuehr, R., Blumenthal, K., Fondeur Gill, S., Kern, M., Micheli, P., Magpantay, E., Jaco, H., "E-waste statistics - Guidelines on classification, reporting and indicators", Bonn: United Nations University; (2015).
- [3] Cucchiella, F., D'Adamo, I., Lenny Koh, S. C., Rosa, P., "Recycling of WEEE: an economic assessment of present and future e-waste streams", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: pp. 263-72, (2015).
- [4] Singh, N., Li, J., Zeng, X., "Global responses for recycling waste CRTs in e-waste", *Waste Management*, 57: pp. 187-97, (2016).
- [5] Namias, J., "The future of electronic waste recycling in the United States: Obstacles and domestic solutions", New York: Columbia University, (2013).
- [6] Heacock, M., Kelly, C. B., Asante, K. A., Birnbaum, L. S., Bergman, A. L., Brune, M. N., Buka, I., Carpenter, D. O., Chen, A., Huo, X., Kamel, M., Landrigan, P. J., Magalini, F., Diaz-Barriga, F., Neira, M., Omar, M., Pascale, A., Ruchirawat, M., Sly, L., Sly, P. D., Berg, M. V. D., Suk, W. A., "E-Waste and harm to vulnerable populations: A growing global problem", *Environmental Health Perspectives*, 124 (5): pp. 550-55, (2015).
- [7] Ely, C., "The life expectancy of electronics", Arlington: Consumer Technology Association, (2014). [Cited 2017 Nov 30]. Available from: <https://www.cta.tech/News/Blog/Articles/2014/September/The-Life-Expectancy-of-Electronics.aspx>
- [8] Holgersson, S., Steenari, B. M., Bjorkman, M., Cullbrand, K., "Analysis of the metal content of small-size waste electric and electronic equipment (WEEE) printed circuit 294 boards—part 1: Internet routers, mobile phones and smartphones", *Resources, Conservation, and Recycling*, 295 (133): pp.300-308, (2018).
- [9] Arshadi, M., Esmaeili, A., Yaghmaei, S., "Investigating critical parameters for bioremoval of heavy metals from computer printed circuit boards using the fungus *Aspergillus niger*", *Hydrometallurgy*, 197: pp. 105464, (2020).
- [10] Duan, H., Hou, K., Li, J., Zhu, X., "Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environment concerns", *Environmental Management*, 92: pp. 392-99, (2011).
- [11] Golev, A., Schmeda-Lopez, D. R., Smart, S. K., Corder, G. D., McFarland, E. W., "Where next on e-waste in Australia?", *Waste Management*, 58: pp. 348-58, (2016).
- [12] Arshadi, M., Esmaeili, A., Yaghmaei, S., "Evaluating the optimal digestion method and value distribution of precious metals from different waste printed circuit boards", *Journal of Material Cycle and Waste Management*, 22: pp. 1690-1698, (2020).
- [13] Arshadi, M., Yghamei, S., Mousavi, S. M., "Study of plastics elimination in bioleaching of electronic waste using *Acidithiobacillus ferrooxidans*", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(11): pp. 7113-7126, (2018).
- [14] Tanskanen, P., "Management and recycling of electronic waste", *Acta Materialia*, 61 (3): pp. 1001-1011 (2013).
- [15] Reuter, M., Hudson, C., Van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers. C., Hagelüken, C., "Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure", A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel: United Nations Environment Programme, (2013).
- [16] Kumar, R., Shah, D., "Review: Current status of recycling of waste printed circuit boards in India", *Journal of Environmental Protection*, 5: pp. 9-16, (2014).
- [17] Wang, X., Gaustad, G., "Prioritizing material recovery for end-of-life printed circuit boards", *Waste Management*, 32: pp. 1903-1913, (2012).
- [18] Pant, D., Joshi, D., Upreti, M. K., Kotnala, R. K., "Chemical and biological extraction of metals present in E waste: a hybrid technology", *Waste Management*, 32 (5): pp. 979-990, (2012).
- [19] Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E., Deveci, H., "Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling", *Minerals Engineering*, 25(1): pp. 28-37, (2012).
- [20] Arshadi, M., Pourhossein, F., Mousavi, S. M., Yaghmaei, S., "Green recovery of Cu-Ni-Fe from a mixture of spent PCBs using adapted *A. ferrooxidans* in a bubble column bioreactor", *Separation and Purification Technology*, 271: p. 118701, (2021).
- [21] Erust, C., Akcil, A., Gahan, C., Deveci, H., "Biohydrometallurgy of secondary metal resources: a potential alternative approach for metal recovery", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 88 (12): pp. 2115-2132, (2013).
- [22] Arab, B., Hassanpour, F., Arshadi, M., Yaghmaei, S., Hamedi, J., "Optimized bioleaching of copper by indigenous cyanogenic bacteria isolated from the landfill of e-waste", *Journal of Environmental Management*, 261: pp. 110124 (2020).
- [23] Li, S., Zhong, H., Hu, Y., Zhao, J., He, Z., Gu, G., "Bioleaching of a low-grade nickel-copper sulfide by mixture of four thermophiles", *Bioresource Technology*, 153: pp. 300-306, (2014).

- [24] Qu, Y., Lian, B., "Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using *Penicillium tricolor* RM-10", *Bioresource Technology*, 136: pp. 16-23, (2013).
- [25] Arshadi, M., Mousavi, S. M., "Enhancement of simultaneous gold and copper extraction from computer printed circuit boards using *Bacillus megaterium*", *Bioresource Technology*, 175: pp. 315-324, (2015).
- [26] Chi, T., Lee, J., Pandey, B., Yoo, K., Jeong, J., "Bioleaching of gold and copper from waste mobile phone PCBs by using a cyanogenic bacterium", *Minerals Engineering*, 24: pp. 1219-1222, (2011).
- [27] 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*", *Separation and Purification Technology*, 147: pp. 207-219 (2015).
- [28] Karwowska, E., Andrzejewska-Morzuch, D., Lebkowska, M., Tabernacka, A., Wojtkowska, M., Telepko, A., Konarzawska, A., "Bioleaching of metals from printed circuit boards supported with surfactant-producing bacteria", *Journal of Hazardous Materials*, 264: pp. 203-210, (2014).
- [29] Saidan, M., Brown, B., Valix, M., "Leaching of electronic waste using biometabolised acids", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20: pp. 530-534, (2012).
- [30] 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 Management*, 51: pp. 168-173, (2016).
- [31] Amiri, F., Yaghmaei, S., Mousavi, S. M., Sheibani, S., "Recovery of metals from spent refinery hydrocracking catalyst using adapted *Aspergillus niger*", *Hydrometallurgy*, 109: pp. 65-71, (2011).
- [32] Biswas, S., Bhattacharjee, K., "Fungal assisted bioleaching process optimization and kinetics: Scenario for Ni and Co recovery from a lateritic chromite overburden", *Separation and Purification Technology*, 135: pp. 100-109, (2014).
- [33] Amiri, F., Yaghmaei, S., Mousavi, S. M., "Bioleaching of tungsten-rich spent hydrocracking catalyst using *Penicillium simplicissimum*", *Bioresource Technology*, 102: pp. 1567-1573, (2011).
- [34] Rasoulnia, P., Mousavi S. M., "V and Ni recovery from a vanadium-rich power plant residual ash using acid producing fungi *Aspergillus niger* and *Penicillium simplicissimum*", *The Royal Society of Chemistry*, 6: pp. 9139-9151, (2016).
- [35] Rasoulnia, P., Mousavi, S. M., Rastegar, S., 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 Management*, 52: pp. 309-317, (2016).
- [36] Arshadi, M., Nili, S., Yaghmaei, S., "Ni and Cu recovery by bioleaching from the printed circuit boards of mobile phones in non-conventional medium", *Journal of Environmental Management*, 250: pp. 109502, (2019).
- [37] Bahaloo-Horeh, N., Mousavi, S. M., Baniasadi, M., "Use of adapted metal tolerant *Aspergillus niger* to enhance bioleaching efficiency of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries", *Journal of Cleaner Production*, 197: pp. 1546-1557, (2018).
- [38] Gadd, G. M., "Fungal production of citric and oxalic Acid: Importance in metal speciation, physiology and biogeochemical processes", Poole, R. K. (Ed.), *Advances in Microbial Physiology*. Academic Press, pp. 47-92, (1999).