

# بررسی مواد کربنی مورد استفاده در روش پیرومتالورژی برای بازیابی نقره از ضایعات بردهای کامپیوتری

هادی حیدری

گروه مستقل شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

نقی سعادتجوی عصر

دانشکده شیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مجید عبدوس\*<sup>+</sup>

گروه مستقل شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

**چکیده:** در این مطالعه، بازیافت فلز نقره از ضایعات بردهای مدار کامپیوتری به روش پیرومتالورژی مورد بررسی قرار گرفته است. نخست ضایعات بردهای مدار کامپیوتری به صورت مکانیکی توسط دستگاه سنگ شکن فکی، مورد خردایش قرار گرفت سپس در اثر لرزش دستگاه آسیا دیسک حلقه ای پودر شد و نمونه همگن به دست آمد سپس نمونه آماده شده توسط مواد شارژ ذوب شد به طوری که انتخاب مواد شارژ جهت تولید سرباره کم و تشکیل آلیاژ سرب - طلا - نقره بسیار دارای اهمیت بوده و از بین مواد شارژ، مواد کربنی به دلیل خاکستر شدن و تأثیر اکسیدهای گوناگون عنصرهای آن بر راندمان استخراج و تولید سرباره، بررسی شدند. در این مطالعه مواد کربنی گوناگون شامل کک گازی، کک متالورژی ذوب آهن، سمی کک، زغال سنگ و زغال چوب مورد بررسی قرار گرفتند به طوری که سمی کک به دلیل کربن غیر فرار بالا (۸۴/۸۷٪) و خاکستر پایین (۸/۹۷٪) و همچنین آلومینیوم اکسید کم تر (۱۱/۸۷٪) در خاکستر آن، انتخاب شد سپس مقدار بهینه آن، ۶ g به دست آمد. همچنین زغال چوب به دلیل داشتن خاکستر بالا (۱۴/۲۰٪) و وجود قلع اکسید در خاکستر آن (۳/۵۴٪)، پایین ترین راندمان استخراج (۶۵٪) و بیشترین مقدار سرباره (۴۵٪) را داشته است. در مرحله بعد، آلیاژ سرب - طلا - نقره بر اساس اختلاف زیاد جرم حجمی از فاز سرباره جداسازی شد سپس فلز نقره توسط فرایند پارتینگ از طلا جدا شد و سرانجام، نقره توسط فرایند سمانتاسیون استخراج شد. در این روش، راندمان استخراج ۹۴٪ به دست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** بازیابی؛ نقره؛ فلزهای گران‌بها؛ ضایعات بردهای کامپیوتری؛ پیرومتالورژی.

**KEYWORDS:** Recovery; Silver; Precious metals; Computer circuit board scraps; Pyrometallurgy.

## مقدمه

استفاده از تجهیزهای الکترونیکی، منجر به رشد بیش از اندازه پسماندهای الکترونیکی شده است سالانه ۲۰ تا ۵۰ میلیون تن، ضایعات گوناگون الکترونیکی تولید می‌شود [۱] به طوری که براساس گزارش مربوط به سازمان حل مشکل‌های ضایعات

\*عهدہ دار مکاتبات

+E-mail: phdabdouss44@aut.ac.ir

به دلیل حضور عنصرهای زیاد فلزی در ضایعات و پسماندهای الکترونیک، سخت می‌باشد [۱۳]. روش پیرومتالورژی برتری‌هایی شامل بالا بودن راندمان تولید فراورده، کاهش میزان فلز حل شده در فاز دور ریز (سرباره) و تلفات کم‌تر و افزایش سرعت واکنش به دلیل دمای عملیات بالا را داشته و برای استخراج فلزهای گران‌بها از ضایعات و پسماندهای الکترونیک، کاربردی می‌باشد [۱۵، ۱۴]. از عیب‌های این روش می‌توان به مصرف بالای انرژی و آلودگی‌های زیست محیطی در صورت وجود ترکیب‌های آرسنیک، جیوه و کادمیوم در نمونه اشاره کرد بنابراین استفاده از دمای بهینه عملیاتی و حذف فلزها سنگین پیش از به‌کارگیری این روش دارای اهمیت می‌باشد. بازیافت نقره به روش پیرولیز نیز به دلیل کاهش هزینه‌های انرژی، کاهش دورریزهای غیر فلزی و بالا بودن راندمان انحلال مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌طوری که محدودیت این روش، راندمان پایین آن (۹۰٪) نسبت به روش پیرومتالورژی می‌باشد [۱۶].

### بخش تجربی

#### مواد شیمیایی مورد استفاده

مواد شیمیایی استفاده شده، فراورده مرکب بوده و درصد خلوص همه آن‌ها (به غیر از نیتریک اسید که بالاترین غلظت ساخته شده توسط مرکب، ۶۵٪ می‌باشد) بالاتر از ۹۸٪ بوده است. این مواد عبارتند از: سولفوریک اسید، تارتاریک اسید، سدیم کلرید، سرب تری هیدرات استات، سرب اکسید، بوراکس، سدیم کربنات، سیلیس، مواد کربنی (زغال سنگ، کک و...)، اسید نیتریک.

#### تجهیزهای مورد استفاده

دستگاه سنگ شکن، دستگاه آسیا دیسک حلقه‌ای<sup>(۵)</sup>، دستگاه پلاسمای جفت شده القائی (ICP (ULTIMA 2 C)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDAX)، آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF PHILIPS (Magix PRO)، آنالیز پراش پرتو ایکس XRD (Diffraktometer D 5000) (SIEMENS)، کوره ATBIN (برای کوبلاسیون)، دستگاه خشک کن، کوره Carbolite.

#### آماده سازی نمونه (خردایش)

نمونه مورد مطالعه در این مقاله، ضایعات گوناگون قطعه‌های کامپیوتری شامل بردهای الکترونیکی، ریزپردازنده مرکزی،

و پسماندها، مقدار تولید این مواد در سال ۲۰۱۷، ۶۵/۴ میلیون تن بوده است [۲]. دست آورد تولید ضایعات و پسماندها، به خطر انداختن سلامتی انسان و محیط زیست می‌باشد. از سوی دیگر، این ضایعات دارای فلزهای گرانبها و با ارزش بوده و از بین فلزهای گرانبها، طلا، نقره، پالادیوم و پلاتین، مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. فلزهای گرانبها شامل طلا (۰/۳۹٪)، نقره (۰/۱۵۶٪) و پالادیوم (۰/۰۰۹٪) به دلیل پایداری شیمیایی و ویژگی رسانایی الکتریکی در بردهای کامپیوتری، به عنوان کنتاکتور استفاده شده‌اند [۵ - ۳]. روش‌های صنعتی مانند پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی و بیومتالورژی برای بازیافت فلزهای گرانبها، پیشنهاد شده است [۱۰ - ۶]. در فرایند هیدرومتالورژی ضایعات بردهای مدار کامپیوتری<sup>(۱)</sup> در حلال‌هایی شامل تیازاب سلطانی<sup>(۲)</sup>، نیتریک اسید، سولفوریک اسید و هیدروکلریدریک اسید در حضور اکسیدکننده‌هایی مانند اکسیژن، ید، برم و پراکسید هیدروژن حل می‌شوند و پس از خالص‌سازی، فلزهای طلا، نقره و... بازیافت می‌شوند [۱۱]. روش هیدرومتالورژی به دلیل حضور عنصرهای زیاد، نیازمند لیچینگ چند مرحله‌ای بوده و همچنین دمای کم این روش، سرعت واکنش را کم کرده و واکنش‌های شیمیایی و فرایندهای انتقال جرم را با محدودیت مواجه می‌کند. روش لیچینگ سیانیدی به دلیل آزاد شدن سیانور، دارای مشکل‌های محیط زیستی بوده و همچنین نقره در کانی‌های مقاوم سولفیدی مثل پیریت و آرسنو پیریت از راندمان استخراج پایینی برخوردار می‌باشد [۱۲]. روش لیچینگ تیوسیانیدی برای بازیافت نقره از سرعت بالایی برخوردار بوده ولی انتخاب پذیری پایینی دارد. روش لیچینگ تیواوره در محیط‌های سولفوریک اسید، هیدروکلریدریک اسید و نیتریک اسید در حضور اکسیدکننده‌هایی مثل هیدروژن پراکسید و سدیم پراکسید برای استخراج فلزهای گرانبها کاربرد دارد به‌طوری که در این روش سرعت لیچینگ بالا بوده ولی مصرف بالای تیواوره به دلیل اکسیداسیون بالا و پایداری شیمیایی پایین تیواوره، استفاده از این روش را محدود می‌سازد همچنین راندمان این روش ۹۲٪ بوده است. روش بیولیچینگ، اغلب برای حذف مزاحمت‌های سولفیدی طلا و نقره از کانی کاربرد داشته و روش برهمکنش میکروارگانسیم‌ها با فلزها، بستگی به پیش‌هسته‌ای<sup>(۳)</sup> یا همو هسته‌ای<sup>(۴)</sup> بودن آن‌ها دارد در نتیجه انتخاب میکروارگانسیم‌ها

(۱) Computer circuit board Scraps

(۲) Aqua regia

(۳) Prokaryotes

(۴) Eukaryotes

(۵) Vibratory Disc Mill

جدول ۱- نتیجه‌های آنالیز سرندي.

اندازه سرندي	وزن مانده روی سرندي (بر حسب گرم)	درصد وزنی مانده روی سرندي (%)	درصد تجمعی باقیمانده (%)
۱/۲۵ mm	۱/۲۵	۰/۶۳	۰/۶۳
۱ mm	۱/۷	۰/۸۵	۱/۴۸
۸۰۰ μm	۱/۸۰	۰/۹	۲/۳۸
۶۳۰ μm	۲/۱	۱/۰۵	۳/۴۳
۵۰۰ μm	۲/۲۵	۱/۱۲	۴/۵۵
۳۱۵ μm	۴	۲	۶/۵۵
۱۰۰ μm	۸۱/۹	۴۰/۹۵	۴۷/۵
<۱۰۰ μm	۱۰۵	۵۲/۵	۱۰۰
جمع	۲۰۰	۱۰۰	-

کربن غیر فرار<sup>(۵)</sup>، خاکستر<sup>(۶)</sup> و مواد فرار<sup>(۷)</sup> بوده و همچنین خاکستر آن‌ها دارای مقدارهای متفاوتی از اکسیدهای مختلف عنصری است. در این مطالعه، مواد کربنی گوناگون از نظر آنالیز شیمیایی و تأثیر گذاری بر فرایند استخراج مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۲ و ۳).

#### سمانتاسیون<sup>(۸)</sup>

در این مرحله، محلول نیترات نقره در درون فلز مس قرار گرفت و به دلیل بالا بودن پتانسیل اکسیداسیون فلز نقره نسبت به مس، فلز مس اکسید شده و به صورت یونی وارد محلول شد و کاتیون نقره، احیاء شده و اطراف فلز مس، به شکل فلز نقره تشکیل شد. سمانتاسیون بر اساس واکنش‌های (۳)، (۲) و (۱) انجام شد:



#### نتیجه‌ها و بحث

##### شناسایی فاز و اجزای تشکیل دهنده نمونه

پایه های فلزی واحد ریزپردازنده کامپیوتری به دلیل پوشش بالای فلز طلا و نقره توسط SEM-EDAX مورد مطالعه

کارت حافظه، کارت گرافیکی و ... بوده است. نخست قطعه‌های یاد شده توسط دستگاه سنگ شکن فکی<sup>(۱)</sup> مورد خردایش قرار گرفت و ذره‌هایی با اندازه ۱۵-۱۰ میلی متر به دست آمد سپس ذره‌های مربوطه در اثر لرزش با ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و زمان ۳ دقیقه توسط دستگاه آسیا<sup>(۲)</sup> از نوع دیسک حلقه ای (دستگاه پودر کننده نمونه ها)، پودر شد و توسط دستگاه لرزاننده<sup>(۳)</sup> غربالگری شد [۱۷]. نتیجه‌های مربوط به سرندي نمونه در جدول ۱، نشان داده شده است.

سرندي نمونه به منظور جداسازی ذره‌های درشت از ذره‌های کوچک و آماده سازی دوباره ذره‌های بزرگ انجام گرفت به طوری که ذره‌ها با اندازه بزرگ‌تر از ۰/۱ میلی متر جداسازی شده و دوباره توسط دستگاه آسیای دیسک حلقه ای با ۱۴۰۰ دور بر دقیقه و مدت زمان ۷ دقیقه پودر شدند و با سرندي دوباره مشخص شد ذره‌های تولید شده دارای اندازه کمتر از ۰/۱ میلی متر بودند. فرایند آماده سازی برای همگن سازی نمونه مورد مطالعه بسیار دارای اهمیت می باشد.

##### بررسی مواد پایه کربنی گوناگون به عنوان اجزای اصلی شارژ

مواد کربنی شامل زغال سنگ، کک متالورژی، کک گازی، زغال چوب و سمی کک<sup>(۴)</sup> دارای آنالیز شیمیایی گوناگون شامل

(۱) Jaw Crusher

(۲) Grinding Machine

(۳) Shaker

(۴) Semicoke

(۵) Fixed Carbon (FC)

(۶) Ash

(۷) Volatile Material

(۸) Cementation

جدول ۲- آنالیز شیمیایی مواد کربنی گوناگون.

نام نمونه	کربن غیر فرار	خاکستر	مواد فرار
زغال سنگ	۵۸/۱۰	۱۳/۵۳	۲۸/۳۷
کک گازی	۸۲/۶۷	۹/۱۳	۸/۲۰
سمی کک	۸۴/۸۷	۸/۹۷	۶/۱۶
کک متالورژی ذوب آهن	۸۳/۳۸	۱۳/۸۰	۲/۸۲
زغال چوب	۷۰/۲۱	۱۴/۲۰	۱۵/۵۹

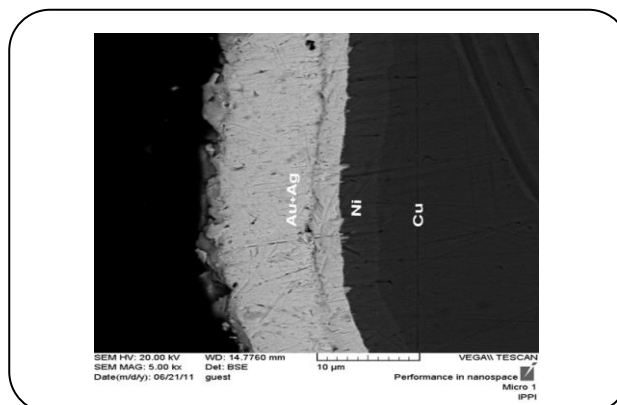
جدول ۳- آنالیز خاکستر مواد کربنی.

نام نمونه	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% MgO	% CaO	CuO%	SnO <sub>2</sub>
خاکستر زغال سنگ	۴۴/۶۰	۲۹/۶۴	۱۵/۱۴	۰/۷۶	۲/۲۴	ناچیز	ناچیز
خاکستر کک گازی	۵۲/۲۱	۱۳/۹۷	۱۰	۲/۶۰	۱۴/۵۶	ناچیز	ناچیز
خاکستر سمی کک	۶۲/۹۸	۱۱/۸۷	۶/۸۵	۱/۸۳	۱۲/۰۸	ناچیز	ناچیز
خاکستر کک متالورژی ذوب آهن	۴۶/۴۰	۲۶/۸۰	۸/۲۸	۱/۷۸	۱۰/۲۲	۱/۸۵	۰/۶۲
خاکستر زغال چوب	۵۲/۲۹	۱۶/۱۱	۴/۵۵	۲/۲۲	۱۳/۹۳	۵/۶۵	۳/۵۴

سرب - طلا - نقره بوده و انتخاب مواد شارژ جهت ذوب نمونه وابسته به ترکیب نمونه (حالت اکسیدی یا فلزی) است در نتیجه آنالیز فازی مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به این که انتخاب نوع و مقدار کمک ذوب و سایر اجزای شارژ بر اساس آنالیز کمی ترکیب‌های موجود در نمونه می باشد در نتیجه از فلورسانس پرتو ایکس برای شناسایی کمی عناصر استفاده شده است (جدول ۴). انتخاب مرحله اکسیداسیون قبل از فرآیند کوپلاسیون بستگی به حضور فلزهای مزاحم آنتیموان و قلع می باشد به طوری که با حضور عناصر مربوطه فلز نقره اکسید شده و به فاز سرباره منتقل می شود در نتیجه در فرآیند اکسیداسیون به دلیل اکسند بودن شرایط محیط، فلز آنتیموان و قلع وارد فاز سرباره شده و خلوص آلیاژ طلا - نقره - سرب افزایش می‌یابد. بر اساس نتیجه‌های جدول ۴، نمونه مورد مطالعه بدون ترکیب آنتیموان و قلع بوده و در نتیجه فرآیند اکسیداسیون انجام نگرفته است.

برای تعیین درصد استخراج فلز نقره، باید مقدار درصد نقره در نمونه مورد مطالعه و درصد نقره استخراج شده مشخص باشد به طوری که آنالیز دقیق این عنصر توسط روش پلاسما جفت شده القائی انجام گرفته است (جدول ۵). نتیجه‌های جدول ۵،



شکل ۱- تصویر SEM-EDAX از تراشه ریزپردازنده مرکزی کامپیوتر با صفحه‌های فلزی Ni، Au+Ag، Cu.

قرار گرفت (شکل ۱) بر اساس تصویر مربوطه، لایه بیرونی پایه‌ها توسط فلز طلا و نقره پوشش داده شده و لایه‌های زیرین به ترتیب از نیکل و مس تشکیل شده است. آنالیز فازی ترکیب‌های موجود در نمونه، توسط XRD انجام شد به طوری که بر مبنای نتیجه‌های XRD، نمونه تشکیل شده از مس، سرب، اکسید سرب، کوارتز و فازهای آمورف است. با توجه به این که اساس روش به کار گرفته شده بر مبنای تشکیل آلیاژ

کربن غیر فرار را داشته است با توجه به این که در فرایند ذوب، کربن غیر فرار به دی اکسید کربن اکسید شده و باعث احیاء اکسید سرب و تشکیل آلیاژ طلا-نقره-سرب شده است بنابراین سمی کک بالاترین درصد استخراج (۹۰٪) و زغال سنگ پس از زغال چوب کمترین درصد استخراج (۷۸٪) را داشته است. در دمای عملیاتی، مواد کربنی سوخته شده و خاکستر تولید شده است به طوری که اکسیدهای فلزی مربوط به خاکستر مواد کربنی در تولید سرباره و مقدار نقره استخراج شده از نقش مهمی برخوردار بودند. آلومینیوم اکسید موجود در خاکستر با اجزای شارژ ترکیب شده و باعث انتقال فلز نقره از ترکیب آلیاژی به فاز سرباره شده است. از بین سه نمونه کک مورد مقایسه، آلومینیوم اکسید کک متالورژی نسبت به کک گازی و سمی کک بالا بوده و باعث تشکیل سرباره به مقدار ۳۳٪ و از دست رفتن فلز نقره به فاز سرباره شده است (جدول ۴).

قلع اکسید موجود در خاکستر زغال چوب به عنوان عامل مزاحم در تشکیل آلیاژ سرب - طلا - نقره است و نباید در فرایند ذوب وجود داشته باشد بنابراین زغال چوب نسبت به سایر مواد کربنی از راندمان استخراج پایینی برخوردار بوده است. ماده کربنی سمی کک به دلیل کربن غیر فرار بالا و پایین بودن آلومینیوم اکسید در خاکستر آن دارای کمترین درصد وزنی سرباره و بالاترین راندمان استخراج نسبت به سایر مواد کربنی بوده است. پس از انتخاب ماده کربنی مناسب، مقدار مصرف آن در شارژ مورد بررسی قرار گرفت به طوری که نتیجه‌های جدول ۷، نشان می‌دهد افزایش مقدار سمی کک باعث افزایش کربن غیر فرار و احیای بیش‌تر اکسید سرب و سرانجام بالا بودن درصد استخراج فلز نقره شده است.

#### فرایند ذوب و بررسی دمای عملیاتی

برای کاهش دمای ذوب ترکیب‌های دیرگداز، از کمک ذوب<sup>(۱)</sup> استفاده شد. در این مطالعه، ترکیب اجزای شارژ بر اساس جدول ۸ انتخاب شد.

در فرایند ذوب، مواد شارژ به صورت شدید در تلاطم بوده و واکنش‌های شیمیایی انجام گرفته است. با ذوب شدن مواد شارژ، سرب تولید شده و با طلا و نقره آلیاژ تشکیل داده است همچنین در این مرحله سدیم کربنات و بوراکس به ترتیب با ترکیب‌های اسیدی و بازی واکنش داده و باعث تولید سرباره شده اند.

جدول ۴- نتیجه‌های آنالیزی نمونه توسط فلورسانس پرتو ایکس.

ترکیب	%
SiO <sub>2</sub>	۴۳/۱۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۵۸
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۹
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۴
SO <sub>3</sub>	۰/۴۵
CaO	۲/۴۶
MgO	۰/۱۶
TiO <sub>2</sub>	۰/۴۱
BaO	۰/۸۱
PbO	۱/۹۲
CuO	۵/۶۳
ZnO	۰/۴۷
NiO	۰/۴۸
Br	۲/۴۴
I	۰/۷۴
Cl	< ۰/۱
SrO	< ۰/۱۰
ZrO <sub>2</sub>	< ۰/۱۰

نشان می‌دهد فلز نقره نسبت به سایر فلزهای گرانبها به مقدار بیش‌تری در ضایعات و پسماندهای الکترونیک استفاده شده و درصد استخراج نقره بر اساس مقدار اولیه و مقدار نهایی محاسبه شده است (معادله ۴).

$$(۴) \quad \text{درصد استخراج نقره} =$$

$$\frac{\text{وزن نقره استخراج شده بر حسب گرم}}{\text{مقدار نقره موجود در وزن اولیه بر حسب گرم}} \times 100$$

#### بهینه کردن نوع و مقدار ماده کربنی مورد استفاده در ترکیب شارژ

در این مطالعه مواد کربنی مختلف شامل زغال سنگ، کک گازی، کک متالورژی، سمی کک و زغال چوب مورد بررسی قرار گرفتند به طوری که بالا بودن کربن غیر فرار برای احیاء اکسید سرب (لیتارژ) در ذوب بسیار مهم است. در بین مواد کربنی مقایسه شده، سمی کک بالاترین کربن غیر فرار و زغال سنگ پایین‌ترین

(۱) Flux

جدول ۵ - نتیجه‌های آنالیز نمونه توسط دستگاه پلاسمای جفت شده القائی<sup>(۱)</sup>.

فلز	مقدار
Ag	۰/۱۷٪
Au	۴۰۰ ppm
Pd	۷۷ ppm

Inductively Coupled Plasma (۱)

جدول ۶ - بررسی راندمان استخراج و میزان سرباره تشکیل شده بر اساس میزان و نوع مواد کربنی استفاده شده.

نام نمونه	درصد فلز نقره بدست آمده به ازای ۳ گرم از مواد کربنی	درصد سرباره تولید شده نسبت به مقدار مواد شارژ شده
زغال سنگ	۷۸٪	۲۸٪
کک گازی	۸۶٪	۲۶٪
سمی کک	۹۰٪	۲۲٪
کک متالورژی ذوب آهن	۸۰٪	۳۳٪
زغال چوب	۶۵٪	۴۵٪

جدول ۷ - بهینه کردن مقدار ماده کربنی انتخاب شده.

نام نمونه	مقدار ماده کربنی بر حسب گرم	درصد فلز نقره بدست آمده
سمی کک	۲	۸۲٪
سمی کک	۳	۹۰٪
سمی کک	۴	۹۲٪
سمی کک	۵	۹۳٪
سمی کک	۶	۹۴٪
سمی کک	۶/۵	۹۴/۱٪

### بررسی آزمون شاخص تورم آزاد مواد کربنی

در این مرحله مواد کربنی در دمای  $400^{\circ}\text{C}$  و در محیطی بدون اکسیژن به منظور بررسی آزمون شاخص تورم آزاد<sup>(۲)</sup> مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۱۰). شاخص تورم آزاد زغال سنگ نشان می‌دهد زغال سنگ در فرایند ذوب آگلومره شده و احیای اکسید سرب به صورت کامل انجام نگرفته است به طوری که سایر مواد کربنی با شاخص تورم آزاد صفر بدون آگلومره بوده و در فرایند ذوب از ویژگی احیاکنندگی خوبی برخوردار بودند.

بهینه کردن دمای عملیاتی در فرایند پیرومتالورژی به دلیل مصرف بالای انرژی و تأثیر گذاری بر راندمان استخراج مهم می‌باشد به طوری که دمای بالا موجب جذب نقره به کوپل<sup>(۱)</sup> شده و باعث از دست رفتن نقره شده است و همچنین انحلال فلز نقره در فلز سرب در دماهای بالا کم‌تر بوده و فاز سربی به دلیل پایین بودن نقطه ذوب سرب در دماهای بالا، کم‌تر تشکیل شده است (جدول ۹). دمای پایین نیز باعث ذوب نشدن کامل مواد شارژ، حل نشدن فلز نقره در مواد کمک ذوب و راندمان پایین استخراج شده است.

فرآیندی است که در آن طلا و نقره از سرب و سایر فلزات پایه آلیاژ شده، جداسازی می‌شوند. (۱)

(۲) Free Swelling Index Test

جدول ۱۰- نتیجه‌های آزمون شاخص تورم آزاد.

نام نمونه	شاخص تورم آزاد
زغال سنگ	۲
کک گازی	۰
سمی کک	۰
کک متالورژی ذوب آهن	۰
زغال چوب	۰

جدول ۸- ترکیب اجزای شارژ.

نوع ترکیب	مقدار بر حسب گرم
PbO	۳۰
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	۳۰
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	۲۵
SiO <sub>2</sub>	۱۰
C (سمی، کک)	۶

جدول ۹- بررسی دمای عملیاتی بر راندمان استخراج نقره.

دمای عملیاتی بر حسب درجه سلسیوس	درصد استخراج فلز نقره
۶۰۰	۴۱
۷۰۰	۶۵
۸۰۰	۷۴
۹۵۰	۸۶
۹۶۰	۸۹
۹۶۳	۹۳
۹۷۰	۹۰
۱۰۰۰	۸۲

### نتیجه گیری

در این روش، بازیابی فلز نقره از ضایعات بردهای کامپیوتری بر اساس فرایند فالگگذاری (تشکیل آلیاژ سرب - نقره) انجام شد. این فرایند به صورت انتخاب پذیر بر اساس میل ترکیبی نقره با غیر فلزها در دماهای بالا و تمایل شدید این فلز به انحلال در فلز سرب و تشکیل فاز سربی انجام گرفت. با بررسی راندمان استخراج نقره، ترکیب اجزای شارژ با انتخاب ماده کربنی سمی کک بهینه شد سپس دمای عملیاتی به منظور مصرف انرژی و تأثیر گذاری بر فرایند استخراج مورد بررسی قرار گرفت و فلز نقره پس از جداسازی از فلز طلا در اثر اکسایش فلز مس، به صورت فلز نقره احیاء شد و به صورت عنصر فلزی بازیابی شد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۱۶

### مراجع

- [1] Herat S., [International Regulations and Treaties on Electronic Waste \(e-waste\)](#), *J. Environ. Eng.*, **4**: 335-351 (2009).
- [2] Yoshida A., Terazono A., Ballesteros F.C., Nguyen D.Q., [E-Waste Recycling Processes in Indonesia, the Philippines, and Vietnam: A Case Study of Cathode Ray Tube TVs and Monitors](#), *Resour. Conserv. Recy.*, **106**: 48-58 (2016).
- [3] Chen M.J., Ogunseitan O.A. J.B., Wang J., Chen H., [Evolution of Electronic Waste Toxicity: Trends in Innovation and Regulation](#), *J. Environ. Eng.*, **47**: 12409-12416 (2013).
- [4] Egn E.V., Meester S.D., Tran H.P., Dewulf, [Resource Savings Urban Mining: The Case of Desktop and Laptop Computers in Belgium](#), *J. Resour. Conserv. Recy.*, **107**: 53-64 (2016).
- [5] Yan Lu, Zhenming Xu., [Precious Metals Recovery from Waste Printed Circuit Boards: A Review for Current Status and Perspective](#), *Resour. Conserv. Recy.*, **113**: 28-39 (2016).

- [6] Nilanjana Das., [Recovery of Precious Metals Through Bio-Sorption: A Review](#), *Hydrometallurgy*, **103**: 180-189 (2010).
- [7] Gurung M., Adhikar B.B., Kawakita H., Ohtot K., [Selective Recovery of Precious Metals From Acidic Leach Liquor of Circuit Boards of Spent Mobile Phones Using Chemistry Modified Persimmon](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**:11901-11913 (2012).
- [8] Birloaga I., Vegilo F., [Overview on Hydrometallurgical Procedures for Silver Recovery from Various Wastes](#), *J. Environ. Eng.*, **18**: 275-310 (2018).
- [9] Isildar A., Vossenber J.V., Rene E.R., Hullebusch E.D., [Two-Step Bioleaching of Copper and Gold From Discarded Printed Circuit Boards \(PCB\)](#), *Waste Manage.*, **57**:149-157 (2015).
- [10] Tunsu G.; Retegan T., [Chapter6-Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE](#), *WEEE Recy.*, 139-175 (2016).
- [11] Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E.Y., Deveci H., [Aqueous Metal Recovery Techniques From E-Scrap: Hydrometallurgy in Recycling](#), *Miner. Eng.*, **25**: 28-37 (2012).
- [12] Akcil A., Erust C., Gahan C.S., Ozgun M., [Precious Metal Recovery from Waste Printed Circuit Boards Using Cyanide and Non-Cyanide Lixiviants-A Review](#), *Waste Manage.*, **45**: 258-271 (2015).
- [13] Reith F., Zammit C.M., Rogers S.L., [Potential Utilization of Microorganism in Gold Processing](#), *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.*, **121**: 251-260 (2012).
- [14] Cui j., Zhang L., [Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review](#), *J. Hazard. Mater.*, **158**: 228-256 (2008).
- [15] Flandinet L., Tedjar F., Ghetta V., Fouletier J., [Metals recovering from Waste Printed Circuit Boards \(WPCBs\) Using Molten Salts](#), *J. Hazard. Mater.*, **213**: 485-490 (2012).
- [16] Bidini G., Fantozzi F., Bartocci P., [Recovery of Precious Metals from Scrap Printed Circuit Boards Through Pyrolysis](#), *J. Anal. Appl. Pyrolysis.*, **84**: 175-183 (2014).
- [17] Wills B.A., Napier – Munn T., ["An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery"](#), *Miner. Process. Technol. Seventh Edition Elsevier*, (2007).