



Original Article

Gold Recovery from Electronic Waste using Iodide-Iodine Leaching Solution and Nanobiochar Adsorbent

Nafiseh Hassanzadeh* , Seyed Ali Sarkeshikian , Mohammad Hossein Golbou , Soolmaz Safari , Seyed Mohammad Hossein Siadati 

Faculty of Materials Science and Engineering. K. N. Toosi University of Technology. Tehran. Iran

Received: 2025-08-28

Revised: 2025-09-26

Accepted: 2025-10-13

Abstract: The rapid increase in electronic waste has created significant environmental challenges. Recycling this waste, especially precious metals such as gold, is essential for reducing pollution and recovering valuable resources. This study aims to investigate iodide-iodine leaching as a cyanide-free process and to utilize nanobiochar as a cost-effective and environmentally friendly adsorbent for gold recovery. In this research, biochar derived from pruned apricot tree branches was used as a bio-based adsorbent for gold recovery. The effects of biochar particle size, temperature, and adsorption duration were optimized using Taguchi experimental design. Under optimal conditions (temperature of 70°C, adsorption time of 5 hours, and biochar particle size of 106–250 micrometers), the gold recovery efficiency using biochar reached 88%. Also, this method was compared with chemical precipitation and electrochemical precipitation. The combination of iodide-iodine leaching and the use of nano-biochar adsorbent, while providing acceptable efficiency, due to its low cost, ease of implementation, and environmental compatibility, can be a valuable option for gold recovery from electronic waste.

Keywords: Printed circuit boards, Gold recovery, Nanobiochar, Leaching, Taguchi design

*Corresponding Author. Email: n.hassanzadeh@kntu.ac.ir

How to Cite This Article:

Hassanzadeh, N, Sarkeshikian, S A, Golbou, M H, Safari, S, Siadati, S M H. Gold Recovery from Electronic Waste using Iodide-Iodine Leaching Solution and Nanobiochar Adsorbent. *Nanomeghyas*. 2025; 12(3): 302-317. DOI: [10.22034/ns.2025.2070101.1405](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2070101.1405)





بازیابی طلا از زباله‌های الکترونیکی با استفاده از محلول لیچینگ یدید-ید و جاذب نانوبیوچار

نقیسه حسن زاده*^{id}، سید علی سرکشیکیان^{id}، محمدحسین گلبو^{id}، سلماز صفری^{id}، سید محمدحسین سیادتی^{id}

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶

چکیده: افزایش سریع زباله‌های الکترونیکی، چالش‌های زیست‌محیطی مهمی ایجاد کرده است. بازیافت این زباله‌ها، به‌ویژه فلزات گران‌بها مانند طلا، برای کاهش آلودگی و بازگرداندن منابع ارزشمند ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی لیچینگ یدید-ید به عنوان فرآیند غیرسیانیدی و استفاده از نانوبیوچار به عنوان جاذب مقرون‌به‌صرفه و دوست‌دار محیط زیست برای بازیابی طلا از ضایعات الکترونیکی انجام شده است. در این تحقیق، نانوبیوچار حاصل از شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو به عنوان جاذب زیست‌پایه برای بازیابی طلا به کار گرفته شد. تأثیر اندازه ذرات بیوچار، دما و مدت زمان فرآیند جذب با استفاده از طراحی آزمایش‌های تاگوچی بهینه‌سازی گشت، در شرایط بهینه (دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، زمان جذب ۵ ساعت و اندازه ذرات بیوچار در محدوده ۱۰۶ تا ۲۵۰ میکرومتر)، راندمان بازیابی طلا با استفاده از بیوچار به ۸۸ درصد رسید. همچنین، این روش با رسوب شیمیایی و رسوب الکتروشیمیایی مقایسه شد. ترکیب لیچینگ یدید-ید و استفاده از جاذب نانوبیوچار، ضمن ارائه راندمان قابل قبول، به دلیل هزینه پایین، سهولت اجرا و سازگاری با محیط زیست، می‌تواند گزینه‌ای ارزشمند برای بازیابی طلا از زباله‌های الکترونیکی باشد.

واژگان کلیدی: بردهای مدار چاپی، بازیابی طلا، نانوبیوچار، لیچینگ، طراحی تاگوچی

* نویسنده مسئول. ایمیل: n.hassanzadeh@kntu.ac.ir

نحوه استناد به این مقاله:

حسن زاده، نقیسه، سرکشیکیان، سید علی، گلبو، محمدحسین، صفری، سلماز، سیادتی، سید محمدحسین. بازیابی طلا از زباله‌های الکترونیکی با استفاده از محلول لیچینگ یدید-ید و جاذب نانوبیوچار. *نانو مقیاس*، ۲۰۲۵، ۱۱۲(۳)، ۳۰۲-۳۱۷.

DOI: [10.22034/ns.2025.2070101.1405](https://doi.org/10.22034/ns.2025.2070101.1405)



۱- مقدمه

با توجه به حجم بالای زباله‌های الکترونیکی، آلودگی شدید ناشی از آن‌ها و ارزش بالای منابع موجود در این زباله‌ها، در سال‌های اخیر توجه زیادی به مدیریت و بازیافت زباله‌های الکترونیکی معطوف شده است. علاوه بر این، محتوای فلزات نادر و با ارزش موجود در بردهای مدار چاپی تلفن‌های همراه و رایانه‌ها، که از اجزای کلیدی تجهیزات الکترونیکی به شمار می‌روند، چندین برابر بیشتر از مواد معدنی طبیعی است. این امر باعث شده است که زباله‌های الکترونیکی به یکی از منابع اصلی و مهم برای بازیافت تبدیل شود [۱-۳].

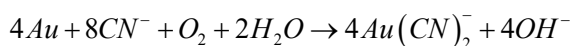
در یک برد مدار چاپی ممکن است حدود ۶۰ عنصر شیمیایی مختلف وجود داشته باشد که تقریباً ۴۰٪ از وزن آن را محتوای فلزی تشکیل می‌دهد. به همین دلیل، بردهای مدار چاپی به‌عنوان یک منبع مهم برای بازیابی فلزات شناخته می‌شوند. برآوردها نشان می‌دهد که بازیافت یک تن تلفن همراه می‌تواند به طور میانگین ۱۳۰ کیلوگرم مس، ۳/۵ کیلوگرم نقره، ۰/۳۴ کیلوگرم طلا و ۰/۱۴ کیلوگرم پالادیوم تولید کند [۴]. فلزات مختلف در زباله‌های الکترونیکی را می‌توان به پنج دسته اصلی دسته‌بندی کرد، فلزات گران‌بها (Ag و Au)، فلزات گروه پلاتین (Ru، Pd، Pt، Rh، Ir)، فلزات پایه (Cu، Ni، Sn، Zn و Fe)، فلزات خطرناک (Hg، Be، In، Pb، Cd، As و Sb) و عناصر کمیاب. ذخایر معدنی فلزات گران‌بها محدود است و بیش از ۵۰ درصد ارزش کل زباله‌های الکترونیکی به این فلزات تعلق دارد. بنابراین، با وجود درصد وزنی بسیار پایین فلزات گران‌بها خصوصاً طلا در این زباله‌ها، بازیابی آن‌ها همچنان اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه به شمار می‌آید [۵].

امروزه، یکی از مهم‌ترین تکنولوژی‌ها برای بازیابی فلزات با ارزش از بردهای مدار چاپی، استفاده از فرآیندهای هیدرومتالورژیکی است که در آن‌ها از عوامل لیچینگ در محلول‌های آبی اسیدی یا قلیایی

استفاده می‌شود. این روش‌ها به‌ویژه برای بازیابی زباله‌های الکترونیکی گزینه‌ای بسیار مناسب هستند، زیرا دارای هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین، تولید کم غبار و گازهای سمی، قابلیت انتخابگری بالا، قابل کنترل بودن فرآیند و راندمان بالا هستند [۶ و ۷].

به‌منظور لیچینگ منابع حاوی طلا معمولاً از عوامل کمپلکس‌کننده استفاده می‌شود که رایج‌ترین آن‌ها سیانید است. روش سیانیداسیون، ساده و کم‌هزینه است ولی دارای معایبی است که ناشی از سمیت بالای سیانید است و تهدیدی جدی برای سلامت انسان و محیط زیست به‌شمار می‌رود و همچنین بازده استخراج فرآیند نسبتاً پایین است [۸]. واکنش شیمیایی برای لیچینگ سیانیدی طلا به‌صورت زیر است [۹]:

(۱)



با توجه به مطالب مذکور، لیچینگ غیرسیانیدی طلا مورد توجه محققان و صنعتگران است که معمولاً شامل استفاده از تیواوره، تیوسولفات و هالیدها است. لیچینگ تیواوره و تیوسولفات به‌عنوان کم‌خطرترین تکنیک‌ها برای بازیافت فلزات گران‌بها هستند، اما با توجه به سینتیک ضعیف، استفاده از آن‌ها مقرون‌به‌صرفه نیست. هالیدها از دیگر عوامل کمپلکس‌کننده هستند که در استخراج فلزات گران‌بها استفاده می‌شوند. در چند سال اخیر، استفاده از محلول‌های کلریدی، برمیدی و یدیدی برای بازیافت فلزات گران‌بها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۶ و ۱۰].

لیچینگ منابع حاوی طلا توسط هالیدها خصوصاً یدید، یک فرآیند مناسب برای جایگزینی فرآیندهای سیانیداسیون است. ید، به‌عنوان یک واکنش‌دهنده، در بسیاری از کاربردهای پزشکی و زندگی روزمره به کار می‌رود و در مقادیر مناسب برای سلامت انسان ضروری است. لیچینگ با استفاده از یدیدها به دلیل سرعت بالا، نرخ بازیابی مناسب، شرایط واکنش

توسط کربن فعال صورت گرفته است [۱۵]. در برخی دیگر از پژوهش‌ها از روش‌های لیچینگ غیرسیانیدی استفاده شده است و سپس جذب طلا از محلول، با استفاده از کربن فعال [۱۶]، بیوجاذب تهیه شده از خرمالو [۱۷] و نانولوله‌های کربنی چندجداره [۱۸] گزارش شده است. در مطالعاتی دیگر که لیچینگ به روش یدید-ید انجام شده است، فرآیند جذب طلا توسط کربن فعال تهیه شده از پوسته نارگیل [۱۹] و همچنین بیوچار تولید شده از کاه ذرت، کاه گندم و تراشه‌های چوب [۱۳] صورت گرفته است.

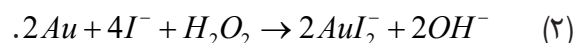
عوامل متعددی بر برهمکنش‌ها و جذب طلا توسط بیوچار تأثیرگذارند که از جمله آن‌ها می‌توان به نوع زیست‌توده، اندازه ذرات بیوچار، نسبت محلول به بیوچار، pH محلول، مدت زمان جذب، دمای فرآیند جذب و سرعت هم‌زدن محلول اشاره کرد. در این میان، دما و زمان فرآیند جذب از مهم‌ترین متغیرها هستند. همچنین، اندازه ذرات بیوچار ارتباط مستقیمی با میزان جذب طلا دارد [۲۰-۲۳]. در پژوهش حاضر، تأثیر متغیرهای اندازه ذرات بیوچار، دما و زمان فرآیند جذب بر راندمان بازیابی طلا مورد بررسی قرار گرفت و شرایط بهینه با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی تعیین شد. لازم به ذکر است که روش متداول برای بررسی تأثیر پارامترها، تغییر یک متغیر در هر آزمایش و ثابت نگه داشتن سایر متغیرها است؛ اما تکنیک تاگوچی با کاهش تعداد آزمایش‌های موردنیاز، کارایی مطالعات تجربی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۲۴].

رسوب الکتریکی طلا [۲۵] و رسوب شیمیایی طلا با استفاده از سدیم متابی‌سولفیت [۲۶] از روش‌های رایج بازیابی طلا محسوب می‌شوند. واکنش کاتدی برای رسوب الکتریکی طلا پس از لیچینگ در سیستم ید به‌صورت ذیل است [۲۷]:



در مطالعه‌ای، بازیابی طلا به روش رسوب شیمیایی با سدیم متابی‌سولفیت از محلول فروشویی تیزاب سلطانی انجام شد. واکنش‌هایی که برای این فرآیند پیشنهاد شده است در ادامه ارائه شده است [۹]:

ملایم، انتخابگری بهتر و امکان بازیابی آسان ماده لیچ‌کننده، به عنوان روشی امیدوارکننده مطرح شده است و شرکت‌های استخراج به سمت لیچینگ طلا با یدیدها گرایش پیدا کرده‌اند. علاوه بر این، پایداری کمپلکس طلا-یدید پس از کمپلکس طلا-سیانید بیشترین است. بنابراین، لیچینگ یدید-ید به‌عنوان یک روش دوست‌دار محیط زیست و بدون استفاده از سیانید برای استخراج طلا، دارای چشم‌انداز توسعه بسیار خوبی است [۱۱ و ۱۲]. واکنش لیچینگ در سیستم ید به کمک هیدروژن پراکسید در رابطه زیر نمایش داده شده است [۹]:



پس از لیچینگ باید یون‌های فلزی موجود در محلول به فلز جامد تبدیل شوند که به این مرحله، بازیابی گفته می‌شود. اکثر روش‌های بازیابی گران و پیچیده هستند و منجر به آلودگی ثانویه می‌شوند. روش جذب به دلیل هزینه پایین و سهولت در انجام کار، تکنیکی محبوب برای بازیابی است. کربن فعال یکی از جاذب‌های پرکاربرد در زمینه بازیابی است. اخیراً، تمرکز تحقیقات به سمت جاذب بیوچار تغییر یافته است که نسبت به کربن فعال ارزان‌تر است. مواد خام مورد استفاده برای تولید بیوچار معمولاً فراوان و ارزان هستند که این امر انگیزه‌ای برای استفاده از بیوچار به‌عنوان جاذب را فراهم می‌کند. نمونه‌هایی از مواد خام که می‌توان برای تولید بیوچار استفاده کرد عبارتند از: باقیمانده‌های محصولات کشاورزی و زباله‌های جنگل‌داری، کودهای دامی، زباله‌های جامد شهری و لجن فاضلاب. در فناوری جذب بیوچار، از زباله برای بازیابی زباله استفاده می‌شود و بدین ترتیب یک وضعیت "برد-برد" در زمینه حفاظت از محیط زیست است [۱۳ و ۱۴].

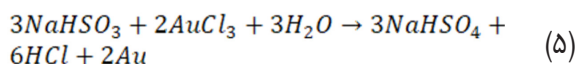
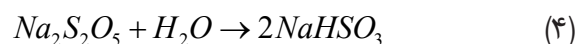
یکی از نوآوری‌های کلیدی پژوهش حاضر، به‌کارگیری تلفیقی سیستم یدید-ید به‌عنوان روش لیچینگ غیرسیانیدی و جاذب بیوچار تولیدشده از شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو برای بازیابی طلا از ضایعات الکترونیکی است. پیشتر در پژوهشی، پس از انجام فرآیند لیچینگ سیانیدی، جذب طلا

جدا شدند. جهت کاهش ابعاد پودر حاصله، از آسیاکاری استفاده شد و پودر با ابعاد کمتر از mm حاصل شد. برای تعیین درصد عناصر موجود در پودر، از روش آزمون پلاسمای جفت شده القایی طیف‌سنج نشر نوری (ICP-OES) (Varian730-ES) استفاده شد. به‌منظور هضم نمونه برای این آزمون، از تیزاب سلطانی، هیدروژن پراکسید و هیدروفلوئوریک اسید با نسبت ۱:۱:۳ استفاده شد و نمونه در دمای °C ۲۲۰ به مدت ۴ h قرار گرفت.

به‌منظور انجام فرآیند پیش‌تصفیه و حذف فلزات پایه در پودر، از اسید نیتریک استفاده شد زیرا این اسید قابلیت انحلال سریع اغلب فلزات پایه را دارد ولی فلز طلا در این اسید غیر قابل انحلال است. فرآیند انحلال با استفاده از اسید نیتریک ۴/۵ M و نسبت جامد:مایع برابر ۱:۱۵ در دمای °C ۴۵ به مدت ۵۰ min انجام شد. پس از فرآیند پیش‌تصفیه، جامد باقی‌مانده با آب مقطر شسته شد و سپس جهت انحلال طلا از جامد باقی‌مانده، فرآیند لیچینگ با استفاده از سیستم دید-ید صورت گرفت که سیستمی کارا و دوست‌دار محیط زیست است. لیچینگ در شرایط بهینه صورت گرفت که عبارتند از: غلظت ید معادل ۱٪ با نسبت ید:دید معادل ۱:۱۰، نسبت جامد:مایع معادل ۱:۱۰، و H₂O₂ با کسر جرمی ۱٪ در دمای محیط به مدت ۴ h و با pH خنثی. در گام بعد، از محلول حاصله غنی از طلا، در فرآیند جذب استفاده شد. روندنمای آزمایش‌های انجام شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۲- آماده‌سازی نانوبیوچار

برای تولید بیوچار، شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو جمع‌آوری شد. پس از شستشو، خردایش و خشک کردن، فرآیند پیرولیز در کوره تحت اتمسفر گاز نیتروژن در دمای °C ۴۵۰ به مدت ۱ ساعت قرار گرفت. در گام بعد، شستشو و خشک کردن صورت گرفت و بیوچار حاصل شد. برای تولید نانوبیوچار، مقدار ۷۵ گرم بیوچار توسط دستگاه آسیای گلوله-



در روش الکتروشیمیایی ممکن است به دلیل حضور فلزات پایه مانند مس، انتخاب‌گری کمتری نسبت به ترسیب طلا وجود داشته باشد و علاوه بر طلا، سایر فلزات نیز روی سطح کاتد احیا شوند. بنابراین، لازم است قبل از فرآیند الکتروشیمیایی، سایر فلزات از محلول حذف شده باشند. همچنین، احتیاط در میزان ولتاژ اعمالی لازم است تا از فرآیندهای جانبی مانند تولید هیدروژن جلوگیری شود زیرا این پدیده سبب کنده شدن طلا از سطح الکتروود می‌شود. از سوی دیگر، روش شیمیایی با سدیم متابی‌سولفیت نیازمند استفاده از مواد شیمیایی است که می‌تواند به محیط زیست آسیب برساند و مشکلاتی در دفع ضایعات ایجاد کنند. در مقابل، استفاده از بیوچار به عنوان ماده‌ای ارزان، رویکردی سازگار با محیط زیست برای بازیابی طلا از قطعات الکترونیکی است که نیاز به مواد شیمیایی خطرناک را حذف می‌کند و جایگزینی مؤثر برای این روش‌های معمول محسوب می‌شود [۲۸ و ۲۹].

به منظور مقایسه جذب طلا توسط بیوچار با این روش‌ها، درصد بازیابی این فلز ارزشمند در سه فرآیند تحت شرایط یکسان مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این ارزیابی می‌تواند برای انتخاب بهینه روش‌های کاربردی در زمینه بازیابی طلا، در مطالعات و کاربردهای آتی اهمیت داشته باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- پیش‌عملیات صفحه‌های مدار چاپی

ضایعات الکترونیکی شامل صفحه‌های مدارچاپی تلفن همراه و رایانه از شرکت پارس چرخش آسیا تهیه شد. پس از جداسازی قطعات سالم، خردایش صفحه‌های مدارچاپی صورت گرفت و سپس طی جداسازی مغناطیسی، آهن و سایر فلزات فرومغناطیس

(مغز باتری قلمی) به عنوان آند استفاده شد و فرآیند تحت ولتاژ اعمالی 12 ولت و زمان 4 ساعت صورت گرفت.

جدول ۱: نمونه‌های بیوچار

کد نمونه	مشبندی الک	ابعاد پودر (میکرومتر)	مقدار پودر (گرم)
۱S	۲۷۰	کمتر از ۵۳	۱۶
۲S	۱۴۰	۱۰۶ تا ۵۳	۲۹
۳S	۶۰	۲۵۰ تا ۱۰۶	۲۲

جذب طلا توسط سدیم متابی سولفیت

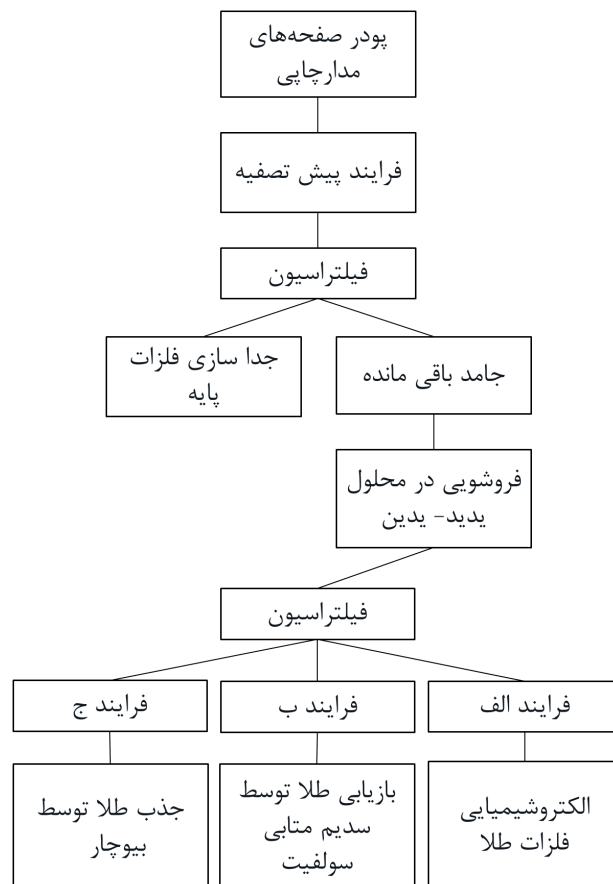
مقدار ۰/۱۵ g پودر سدیم متابی سولفیت توزین شد و به ۱۰ ml محلول لیچینگ یدید-ید اضافه شد.

ای به مدت ۱۵ دقیقه در ۲۵۰ rpm آسیا شد. سپس توسط الک با مشبندی ۶۰، ۱۴۰ و ۲۷۰ سایزبندی انجام شد. با توجه به جدول ۱ سه نمونه پودر بیوچار ۱S، ۲S و ۳S با سه اندازه ذره مختلف به دست آمد. سپس آزموهای BET (Belprep II, BEL Co.) و FESEM (Japan) (MIRA3TESCAN, Czech) برای اندازه‌گیری میزان سطح و بررسی مورفولوژی استفاده شد.

۲-۳- جذب طلا

فرآیند الکتروشیمیایی

فرآیند الکتروشیمیایی با هدف الکتروسوب فلز طلا انجام شد. در این فرآیند، از محلول یدید-ید حاوی فلز طلای حل شده به عنوان الکترولیت، از فولاد زنگ‌نزن به عنوان کاتد و از میله گرافیتی



شکل ۱: روندنمای آزمایشهای انجام شده

۳- نتایج و بحث

فرآیند بازیابی به مدت ۵ ساعت در دمای ۷۰°C انجام شد.

۳-۱- آنالیز شیمیایی پودر جامد اولیه

ترکیب درصد فلزات در پودر جامد حاصل از آزمون ICP-OES در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد فلزات مس، آلومینیوم و آهن بیشترین غلظت را در پودر به خود اختصاص داده است. در بین فلزات گرانبها نیز نقره و طلا به ترتیب دارای غلظت ۵۰۰ و ۳۰۰ ppm هستند (غلظت عنصر پلاتین در پودر بسیار ناچیز و غیرقابل اندازه‌گیری بوده است).

۳-۲- مشخصه‌یابی نانویوچار

تصاویر FESEM از نمونه‌های بیوچار قبل و بعد از آسیاکاری در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ (الف)، ساختار متخلخل بیوچار مشاهده می‌شود. به‌منظور تولید نانویوچار، آسیاکاری انجام شد. همان‌طور که در شکل ۲ (ب و ج) مشاهده می‌شود، پس از آسیاکاری، شکست در ساختار بیوچار رخ داده است. در شکل ۲ (ج)، تشکیل ساختار سلسه‌مراتبی مشاهده می‌شود. این ساختار شامل ذرات ثانویه در بازه ۱۰۰-۳۰۰ nm است که خود از ذرات اولیه با اندازه متوسط حدود ۱۲ nm تشکیل شده‌اند. ذرات ثانویه سبب سهولت در حمل ذرات می‌شود. برای نمونه‌های بیوچار ۱S، ۲S و ۳S، آنالیز BET انجام شد. با توجه به نتایج مساحت سطح

جذب طلا توسط بیوچار

پس از انجام هر آزمایش، محلول فیلتر شد و میزان جذب طلا توسط دستگاه آنالیز طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS) با مدل GBC Avanta PM بررسی شد. همچنین در هر آزمایش درصد بازیابی طلا طبق رابطه (۶) محاسبه و به‌عنوان پاسخ طراحی آزمایش (Y) در نظر گرفته شد. در این رابطه، R راندمان جذب یا درصد بازیابی فلز و C_0 و C_t به ترتیب غلظت فلز قبل و بعد از فرآیند است.

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (6)$$

۳-۲-۴- طراحی آزمایش تاگوچی

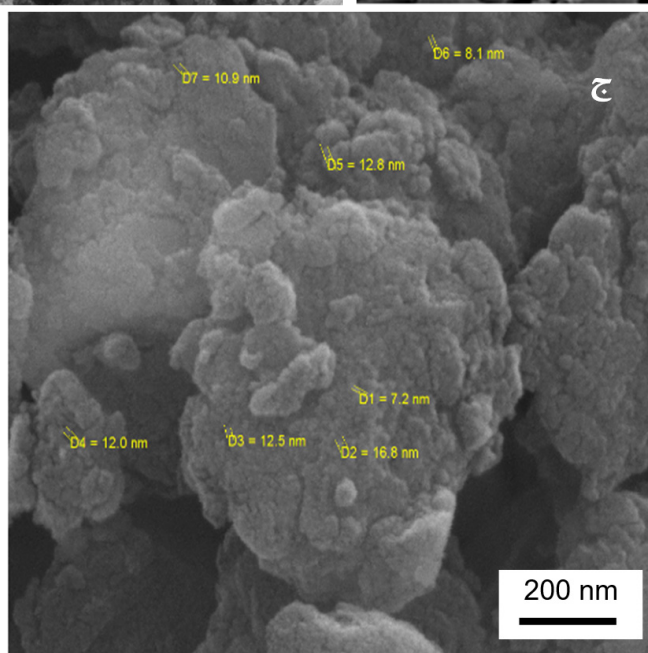
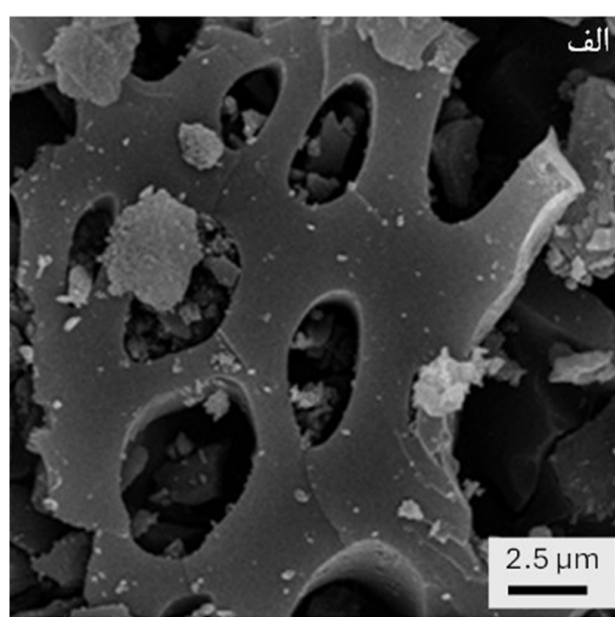
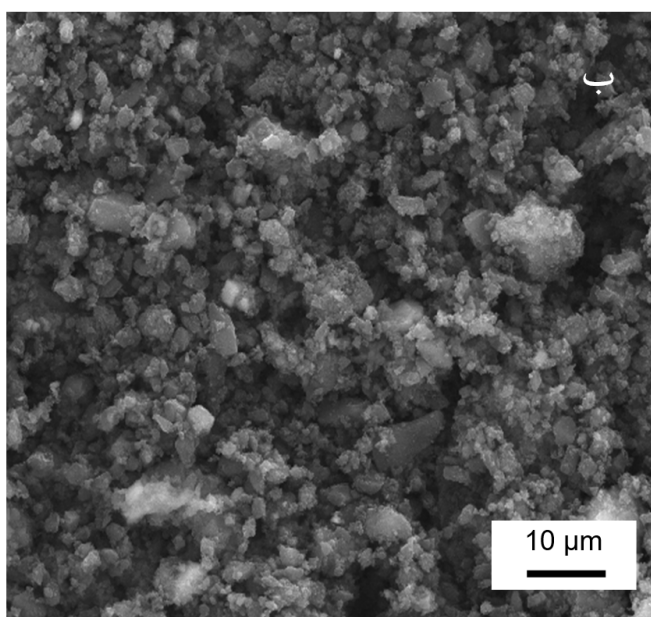
در این پژوهش سه متغیر دما، زمان انجام فرآیند و اندازه ذرات بیوچار به‌عنوان متغیرهای مستقل در سه سطح مورد ارزیابی قرار گرفت و تاثیر آنها بر درصد بازیابی فلز طلا بررسی شد. برای سه متغیر در سه سطح، طبق روشهای سنتی باید ۳^۳ یا ۲۷ آزمایش صورت گیرد. با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی، انجام ۹ آزمایش (آرایه L9) کفایت میکند تا بتوان اثر تمام متغیرها را مورد بررسی قرار داد [۳۰]. در جدول ۲، متغیرهای طراحی آزمایش و سطوح آنها نشان داده شده است. در این تحقیق، از نرم‌افزار آماری Minitab 15 استفاده شده است.

جدول ۲: مقدار متغیرهای مستقل طراحی آزمایش در ۳ سطح

متغیر	واحد	نماد متغیر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
دما	سانتیگراد	A	۳۵	۷۰	۱۰۵
زمان	ساعت	B	۳	۴	۵
اندازه ذرات بیوچار	میکرومتر (طبق جدول ۱)	C	۱S	۲S	۳S

جدول ۳: ترکیب درصد فلزات پودر جامد صفحه‌های مدارچاپی

مواد غیر فلزی	فلزات										
	Mn	Pt	Ag	Au	Zn	Sn	Pb	Al	Fe	Cu	عناصر
۶۹/۶۸	۰/۰۱	ناچیز	۰/۰۵	۰/۰۳	۱/۱	۲/۲	۰/۳۳	۴/۷	۱۲/۲	۹/۷	غلظت (%wt)



شکل ۲: تصاویر FESEM از (الف) بیوچار، (ب و ج) نانوبیوچار

جدول ۴: نتایج سنجش مساحت سطح (BET) برای نمونه‌های بیوچار

کد نمونه	S1	S2	S3
مساحت سطح ویژه (m ² /g)	۵/۲۲	۰/۲۲	۵/۲۵

جدول ۵: طراحی تاگوچی به همراه پاسخ

شماره آزمایش	دما (A)	زمان (B)	اندازه ذرات بیوچار (C)	پاسخ	درصد بازیابی
۱	A1	B1	C1	Y1	۵۱
۲	A1	B2	C2	Y2	۵۶
۳	A1	B3	C3	Y3	۷۵
۴	A2	B1	C2	Y4	۸۲
۵	A2	B2	C3	Y5	۸۴
۶	A2	B3	C1	Y6	۸۲
۷	A3	B1	C3	Y7	۴۷
۸	A3	B2	C1	Y8	۴۱
۹	A3	B3	C2	Y9	۳۵

در این پژوهش، ۹ آزمایش با کمک طراحی تاگوچی انجام شده است. پس از انجام هر آزمایش، درصد بازیابی فلز طلا محاسبه و به‌عنوان پاسخ طراحی آزمایش (Y) در نظر گرفته شد. در جدول ۵، طراحی تاگوچی به همراه پاسخ ارائه شده است. برای مثال، A1 به‌معنای متغیر A (دما) در سطح ۱ (35 °C) است (بر اساس جدول ۲).

با توجه به این که اثر اصلی هر متغیر (E_F) از تفاضل بین بیشترین و کمترین مقدار میانگین آن در سطوح مختلف به‌دست می‌آید، ابتدا میانگین هر متغیر در هر سطح به‌دست آورده شد. برای دستیابی به میانگین هر متغیر در هر سطح به‌عنوان مثال A در سطح ۱، طبق روابط (۷) تا (۹) ابتدا باید تمامی پاسخهای آزمایشهایی که دارای متغیر A1 هستند را جمع و سپس بر تعداد آنها تقسیم کرد.

$$A_1 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3}{3} = 60.67\% \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{Y_4 + Y_5 + Y_6}{3} = 82.67\% \quad (8)$$

$$A_3 = \frac{Y_7 + Y_8 + Y_9}{3} = 41.00\% \quad (9)$$

ویژه که در جدول ۴ ارائه شده است، سطح ویژه نانوبیوچارهای تولیدی در حدود ۲۲-۲۵ m²/g است و ۳S کمی بیشتر باشد. لازم بذکر است که سطح ویژه بیوچارها بسته به نوع زیست‌توده اولیه، شرایط فرآیند تولید و روش فعال‌سازی، در محدوده وسیعی از ۵ تا ۱۵۰۰ m²/g متغیر است [۳۱ و ۳۲]. طبیعتاً هرچه سطح ویژه بیشتر باشد، مکان‌های فعال بیشتری برای جذب یون‌ها فراهم می‌شود که منجر به بهبود عملکرد جذب می‌شود. اما باید توجه داشت که سطح ویژه تنها یکی از پارامترهای مؤثر است و عوامل دیگری مانند توزیع اندازه منافذ، نوع و تعداد گروه‌های عاملی سطحی، ساختار شیمیایی بیوچار و شرایط pH محلول نیز نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای در جذب فلزات ایفا می‌کنند. بنابراین، سطح ویژه بالاتر معمولاً مزیت دارد اما کیفیت و نوع ساختار بیوچار در جذب انتخابی نیز بسیار تأثیرگذار است.

۳-۳- ارزیابی نتایج و بهینه‌سازی جذب طلا به روش تاگوچی

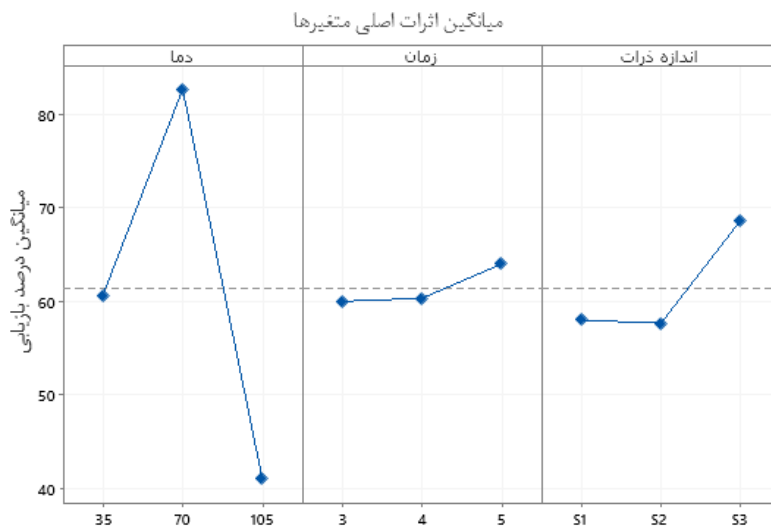
بازیابی و جذب طلا هستند.

در شکل ۴ (الف-ج) اثر متغیرهای مختلف روی درصد بازیابی طلا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، درصد جذب طلا بر روی بیوچار با افزایش مدت زمان فرآیند، افزایش مییابد. جذب طلا روی بیوچار با افزایش زمان فرآیند به دلیل تعامل تدریجی یون‌های طلا با ساختار بیوچار است که از ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و وجود گروه‌های عاملی فعال برخوردار است. این خصوصیات امکان جذب فیزیکی و واکنش‌های شیمیایی متعددی نظیر جاذبه الکترواستاتیکی، پیوند هیدروژنی و انتقال بار میان یون‌های طلا و سطح بیوچار را فراهم می‌کند. با گذشت زمان، یون‌های بیشتری به این سایت‌های فعال متصل می‌شوند و ظرفیت جذب بیشتر می‌شود. همچنین بیوچار با اندازه ذرات نمونه ۳S که دارای مساحت سطح ویژه و تخلخل بیشتری نسبت به نمونه‌های ۱S و ۲S

سپس، جهت به دست آوردن اثر اصلی متغیر A طبق رابطه (۱۰) عمل نمود.

$$E_{fA} = \frac{\overline{A_{\max}} - \overline{A_{\min}}}{\overline{A_{\max}}} = 82.67 - 41.00 = 41.67\% \quad (10)$$

در جدول ۶ میانگین پاسخ تمامی متغیرهای آزمایش‌های تاگوچی به همراه اثر اصلی و ردهبندی متغیرها ارائه شده است. با توجه به این که پارامتر دما (A) دارای بیشترین اثر بر روی پاسخ بوده، لذا به عنوان موثرترین متغیر با رتبه نخست شناخته شد و همچنین پارامتر زمان (B) با کمترین اثر بر روی پاسخ در رتبهی سوم قرار گرفت. در شکل ۳ نیز طبق جدول ۶ میانگین اثرات اصلی بر حسب میانگین پاسخ برای هر متغیر رسم شده است. با توجه به این که بهترین سطح از هر پارامتر سطحی بوده که دارای میانگین پاسخ بیشتری است، بنابراین متغیر دما در سطح ۲، متغیر زمان در سطح ۳ و متغیر اندازه ذرات بیوچار نیز در سطح ۳ شرایط بهینه برای



شکل ۳: نمودار میانگین اثرات اصلی متغیرها بر حسب میانگین پاسخ.

جدول ۶: میانگین پاسخ سطوح و رتبهبندی متغیرها

سطح	دما (A)	زمان (B)	اندازه ذرات (C)
1	67/60	00/60	00/58
۲	67/82	33/60	67/57
۳	00/41	00/64	۶۸/۶۷
Ef	67/41	00/4	00/11
رتبه	1	3	۲

سبب افزایش تعاملات فیزیکی و شیمیایی بین سطح بیوچار و یون‌های طلا می‌شود و در نهایت، این عوامل باعث افزایش ظرفیت جذب طلا می‌شوند. اما نکته قابل توجه متغیر دما است که در دمای 70°C میتوان بیش از ۸۰ درصد جذب طلا بر روی بیوچار به‌دست آورد. با کاهش یا افزایش دما از 70°C ، ۷۰ درصد جذب طلا کاهش مییابد. افزایش دما تا سطح مناسب، سبب کاهش ویسکوزیته محلول شده و همچنین انتشار یون و جذب کمپلکس‌های طلا را افزایش میدهد اما دمای بسیار بالا (105°C) برای جذب مضر است و حتی سبب دفع شده است.

طبق نتایج، سطوح بهینه در این پژوهش عبارتند از: دمای 70°C ، مدت زمان ۵ ساعت و اندازه ذره نمونه بیوچار ۳S (۲۵۰-۱۰۶ میکرومتر). برای پیش‌بینی درصد جذب طلا بر روی بیوچار در نقطه بهینه از رابطه (۱۱) استفاده شده است:

(۱۱)

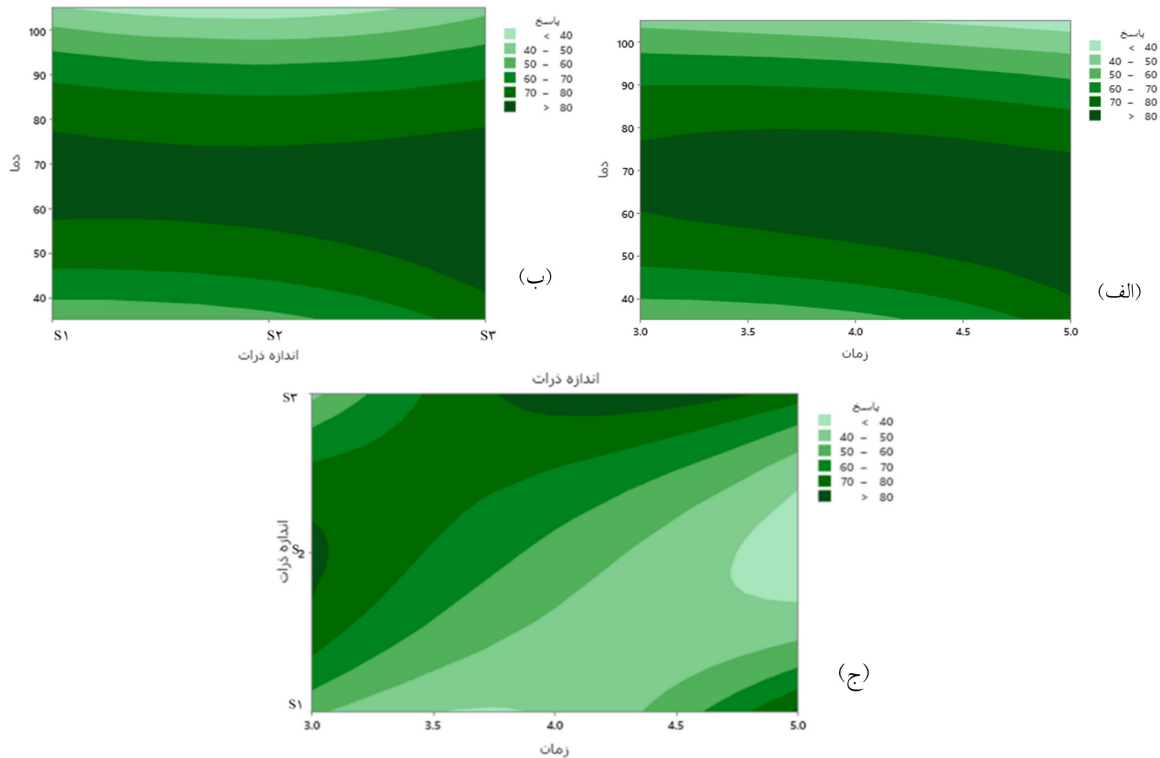
$$Y_{opt}(\%) = T + (\overline{A_2} - T) + (\overline{B_3} - T) + (\overline{C_3} - T) = 92\%$$

در این رابطه، Y_{opt} مقدار پیش‌بینی درصد جذب طلا توسط بیوچار در شرایط بهینه، T میانگین درصد بازیابی طلا یا میانگین پاسخ به‌دست آمده از ۹ آزمایش است که با توجه به این رابطه مقدار درصد بازیابی پیش‌بینی شده در شرایط بهینه برابر با ۹۲٪ است. جهت تایید مقدار پیش‌بینی شده در شرایط بهینه بایستی یک آزمایش دیگر (آزمایش شماره ۱۰) انجام شود. بنابراین آزمایش با شرایط بهینه ذکر شده (دمای 70°C درجه سانتی‌گراد، زمان جذب ۵ ساعت و اندازه ذرات بیوچار در محدوده ۱۰۶ تا ۲۵۰ میکرومتر) انجام شد و سه بار تکرار شد. پس از بررسی با آزمون AAS، میزان متوسط بازیابی طلا توسط بیوچار برابر ۸۸٪ بود. اختلاف مقدار تجربی با مقدار پیش‌بینی شده توسط طراحی تاگوچی (خطای آزمایش) زیر ۵٪ بوده و بنابراین آزمایش انجام شده از دقت و صحت مناسب برخوردار است.

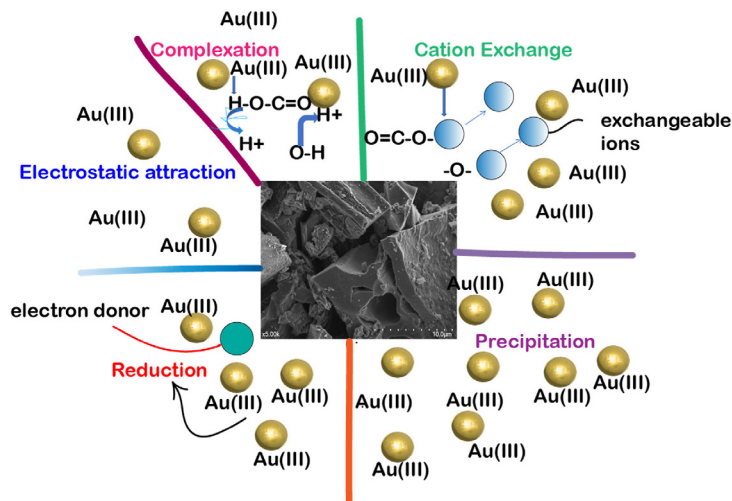
مکانیزم‌های مختلف جذب طلا توسط بیوچار در شکل ۵ ارائه شده است. اتصال یون‌های

می‌باشد، دارای بیشترین درصد جذب است. این ویژگی‌ها منجر به افزایش تعداد و دسترسی بهتر به مکان‌های فعال جذب طلا می‌شود. تخلخل گسترده‌تر امکان نفوذ عمیق‌تر یون‌های طلا به داخل ساختار بیوچار را فراهم می‌کند و سطح بالاتر، سبب افزایش تعاملات فیزیکی و شیمیایی بین سطح بیوچار و یون‌های طلا می‌شود و در نهایت، این عوامل باعث افزایش ظرفیت جذب طلا می‌شوند. اما نکته قابل توجه متغیر دما است که در دمای 70°C میتوان بیش از ۸۰ درصد جذب طلا بر روی بیوچار به‌دست آورد. با کاهش یا افزایش دما از 70°C ، ۷۰ درصد جذب طلا کاهش مییابد. افزایش دما تا سطح مناسب، سبب کاهش ویسکوزیته محلول شده و همچنین انتشار یون و جذب کمپلکس‌های طلا را افزایش میدهد اما دمای بسیار بالا (105°C) برای جذب مضر است و حتی سبب دفع شده است.

در شکل ۴ (الف-ج) اثر متغیرهای مختلف روی درصد بازیابی طلا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده میشود، درصد جذب طلا بر روی بیوچار با افزایش مدت زمان فرآیند، افزایش مییابد. جذب طلا روی بیوچار با افزایش زمان فرآیند به دلیل تعامل تدریجی یون‌های طلا با ساختار بیوچار است که از ویژگی‌هایی مانند سطح ویژه بالا، تخلخل زیاد و وجود گروه‌های عاملی فعال برخوردار است. این خصوصیات امکان جذب فیزیکی و واکنش‌های شیمیایی متعددی نظیر جاذبه الکترواستاتیکی، پیوند هیدروژنی و انتقال بار میان یون‌های طلا و سطح بیوچار را فراهم می‌کند. با گذشت زمان، یون‌های بیشتری به این سایت‌های فعال متصل می‌شوند و ظرفیت جذب بیشتر می‌شود. همچنین بیوچار با اندازه ذرات نمونه ۳S که دارای مساحت سطح ویژه و تخلخل بیشتری نسبت به نمونه‌های ۱S و ۲S می‌باشد، دارای بیشترین درصد جذب است. این ویژگی‌ها منجر به افزایش تعداد و دسترسی بهتر به مکان‌های فعال جذب طلا می‌شود. تخلخل گسترده‌تر امکان نفوذ عمیق‌تر یون‌های طلا به داخل ساختار بیوچار را فراهم می‌کند و سطح بالاتر،



شکل ۴: منحنی نمایشی اثر متغیرهای (الف) دما و زمان، (ب) دما و اندازه ذرات و (ج) اندازه ذرات و زمان، بر درصد بازیابی طلا.

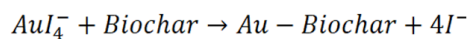


شکل ۵: مکانیزم‌های پیشنهادی جذب طلا توسط بیوچار [۳۳].

سطح بیوچار نیز سبب جذب طلا می‌شود که پارامتر pH در آن فرآیند بسیار مهم است. علاوه بر این، کمپلکس‌سازی سطحی و فعل و انفعالات فلز با الکترون‌های π نیز از دیگر مکانیزم‌های جذب به شمار می‌رود. از سوی دیگر، بیوچار می‌تواند به‌عنوان عامل کاهنده عمل کند و یون‌های طلا را به فلز طلا احیا نماید، که این فرآیند نقش مهمی در بازیابی طلا ایفا می‌کند [۳۳].

فلزی به بیوچار را می‌توان به چند فرآیند اصلی دسته‌بندی کرد که شامل تبادل یونی، ترسیب، کمپلکس‌سازی سطحی، جذب فیزیکی و تعامل الکترواستاتیکی است. ساختار متخلخل بیوچار سبب ایجاد تعداد زیادی مکان فعال روی سطح می‌شود که جذب یا ترسیب فیزیکی را به یکی از مکانیزم‌های کلیدی در جذب طلا تبدیل می‌کند. نیروی جاذبه الکترواستاتیکی بین یون‌های طلا و

واکنش احتمالی برای جذب یون‌های طلا توسط بیوچار در ادامه ارائه شده است: (۱۲)

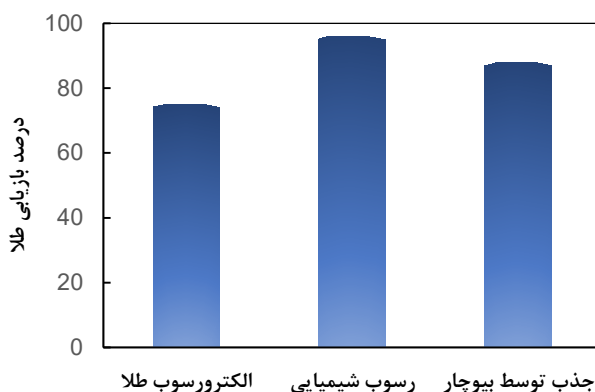


۳- مقایسه جذب طلا توسط بیوچار با فرآیند

رسوب شیمیایی و الکتروسوب طلا

سه فرآیند رسوب شیمیایی طلا توسط سدیم متابی سولفیت، الکتروسوب طلا و جذب طلا بر روی بیوچار انجام شد. درصدهای بازیابی در شکل ۶ ارائه شده است. بازیابی طلا در فرآیند رسوب شیمیایی توسط سدیم متابی سولفیت حدود ۹۶ درصد به دست آمد و رسوب طلا در فرآیند الکتروسیمیایی به ۷۵ درصد رسید.

مقایسه سه روش بازیابی طلا از محلول لیچینگ دید-ید نشان می‌دهد که هر روش مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد. روش رسوب شیمیایی با سدیم متابی سولفیت بالاترین راندمان معادل ۹۶٪ را ارائه می‌دهد که علت آن واکنش سریع و کامل این ماده با کمپلکس طلا و احیای مؤثر یون‌های طلا به فلز است. با این حال، هزینه خرید مواد شیمیایی و نیاز به مدیریت انتشار گاز SO₂، هزینه‌های عملیاتی و زیست‌محیطی این روش را افزایش می‌دهد. روش رسوبدهی الکتروشیمیایی اگرچه راندمان پایین‌تری را ارائه می‌دهد و به دلیل نیاز به تجهیزات تخصصی و مصرف انرژی برق، معمولاً هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های جاری بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد، با این وجود، این روش محصول طلا با خلوص بالا و بدون تولید پساب سمی ارائه می‌دهد و به دلیل پتانسیل اتوماسیون و مقیاس‌پذیری بالا برای مقیاس صنعتی



شکل ۶: مقایسه مقادیر درصد بازیابی طلا در سه فرآیند الکتروسوب طلا، رسوب شیمیایی طلا با سدیم متابی سولفیت و جذب طلا توسط بیوچار.

جدول ۷: مقایسه نتایج بازیابی طلا در پژوهش حاضر با پژوهش‌های قبلی

ماده جاذب	منبع طلا	راندمان بازیابی (%)	زمان جذب (ساعت)	منابع
۱ کربن فعال	محلول سیانید	۸۷	۳	[۱۰]
۲ نانولوله‌های کربنی چند جداره	محلول سیانید و کلرید	۵۲	۲	[۳۸]
۳ بیوچار پوست گردو	محلول سدیم کلراید	-	۳	[۲۱]
۴ بیوچار پوست‌آهن	فاضلاب صنعتی	-	۲۲	[۳۳]
۵ بیوچار دیاتومه	فاضلاب صنعت آبکاری	۹۲	۶۴	[۲۰]
۶ بیوچار کاه ذرت	محلول زباله‌های الکترونیکی	۹۸	۵	[۱۳]
۷ بیوچار شاخه‌های درخت زردآلو	محلول صفحه‌های مدارچاپی	۸۸	۵	این پژوهش

برای بازیابی طلا از زباله‌های الکترونیکی به شمار می‌آید.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش لیچینگ غیرسیانیدی دید-ید و جذب بیوچار تولیدشده از شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو، فرآیندی دوستدار محیط زیست (نسبت به لیچینگ سیانیدی و استفاده از جاذب‌های شیمیایی) و با هزینه‌ی کمتر برای بازیابی طلا از ضایعات الکترونیکی ارائه شده است که همزمان به مدیریت زباله‌های کشاورزی و الکترونیکی کمک می‌کند. بهینه‌سازی پارامترهای کلیدی فرآیند شامل دما، زمان و اندازه ذرات بیوچار با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، نشان داد که شرایط بهینه برای دستیابی به حداکثر بازیابی طلا (88%)، عبارتند از: دمای 70 درجه سانتی‌گراد، زمان 5 ساعت و اندازه ذرات بیوچار در محدوده 106 تا 250 میکرومتر. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی مناسب بیوچار مشتق شده از شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو به‌عنوان یک جاذب پایدار و در دسترس است.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر بدون دریافت کمک‌های مالی یا معنوی خاص انجام شده است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

منابع

[1] Q. Tan, Q. Dong, L. Liu, Q. Song, Y. Liang, J.

می‌تواند مناسب باشد. در مقابل، جذب طلا توسط بیوچار با راندمان 88٪، اگرچه ظرفیت جذب متوسطی دارد، اما به دلیل هزینه بسیار پایین و فراوانی مواد اولیه (مانند ضایعات کشاورزی)، سهولت اجرا، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده و سازگاری با محیط زیست، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی گزینه‌ای مناسب برای بازیابی طلا در مقیاس‌های کوچک و متوسط محسوب می‌شود. استفاده از بیوچار نه تنها هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد، بلکه با بهره‌گیری از منابع تجدیدپذیر و کاهش تولید پسماند و آلودگی ثانویه، راهکاری مقرون‌به‌صرفه، بومی و دوستدار محیط زیست برای مدیریت هم‌زمان زباله‌های الکترونیکی و کشاورزی فراهم می‌آورد [34]-[37]. در جدول 7، نتایج بازیابی و جذب طلا توسط بیوچار حاصل از شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو (پژوهش حاضر) با سایر پژوهش‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، راندمان بازیابی در پژوهش‌هایی که از بیوچار استفاده شده (موارد 3 تا 7)، بالاتر از کربن فعال و نانولوله‌های کربنی است و به دلیل تولید بیوچار از زیست‌توده، هزینه جذب نیز کمتر است. در موارد 3 تا 5، بیوچار برای جذب طلا از فاضلاب‌های صنعتی یا محلول‌های لیچینگ با غلظت بالای طلا به کار رفته و هدف اصلی، بررسی ظرفیت جذب بوده است. اما در مورد 6 و این پژوهش (مورد 7)، بیوچار برای بازیابی طلا از محلول لیچینگ زباله‌های الکترونیکی با غلظت پایین‌تر طلا استفاده شده و تمرکز بر راندمان بازیابی بوده است. در مورد 5، هرچند بیوچار دیاتومه راندمان بالایی داشته، اما زمان فرآیند جذب طولانی است که مطلوب نیست. همچنین، اگرچه راندمان بازیابی با بیوچار گاه ذرت (مورد 6) بالاتر است، اما هزینه تهیه این زیست‌توده به دلیل کاربرد آن به عنوان خوراک دام بیشتر از شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو است که معمولاً بدون استفاده باقی می‌ماند. بنابراین، استفاده از بیوچار شاخه‌های هرس شده درخت زردآلو به دلیل هزینه پایین و راندمان مناسب، روشی مقرون‌به‌صرفه

- gold from a refractory gold ore in iodide solution using persulfate as the oxidant”, *Hydrometallurgy*, 198, 105502, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105502>.
- [12] C.J. Liang, J.Y. Li, “Recovery of gold in iodine-iodide system—a review”, *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 54, 1055–1066, 2019. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1523931>.
- [13] W. Zhou, H. Liang, Y. Lu, H. Xu, Y. Jiao, “Adsorption of gold from waste mobile phones by biochar and activated carbon in gold iodized solution”, *Waste Management*, 120, 530–537, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.017>.
- [14] M. Ahmad, A.U. Rajapaksha, J.E. Lim, M. Zhang, N. Bolan, D. Mohan, M. Vithanage, S.S. Lee, Y.S. Ok, “Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review”, *Chemosphere*, 99, 19–33, 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>.
- [15] C.A. Fleming, A. Mezei, E. Bourricaudy, M. Canizares, M. Ashbury, “Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits”, *Miner Eng*, 24, 484–494, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.03.021>.
- [16] H. Zhang, I.M. Ritchie, S.R. La Brooy, “The adsorption of gold thiourea complex onto activated carbon”, *Hydrometallurgy*, 72, 291–301, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00182-8).
- [17] M. Gurung, B.B. Adhikari, H. Kawakita, K. Ohto, K. Inoue, S. Alam, “Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothiourea leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin”, *Hydrometallurgy*, 133, 84–93, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.12.003>.
- [18] S.K. Pang, K.C. Yung, “Prerequisites for achieving gold adsorption by multiwalled carbon nanotubes in gold recovery”, *Chem Eng Sci*, 107, 58–65, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.11.026>.
- [19] P.A.M. Teirlinck, F.W. Petersen, “The nature of gold-iodide adsorption onto coconut-shell carbon”, *Miner Eng*, 9, 923–930, 1996. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00084-2](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00084-2).
- [20] L. Wang, J. Li, G. Zhong, J. Li, X. Lu, S. Wang, Y. Tang, “Diatom Biochar Recovered Au(III) Efficiently from Both Synthetic and Real Electroplating Wastewaters”, *ACS ES&T Water*, 3, 1395–1405, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00066>.
- [21] Z. Wang, X. Xu, S. Ma, H. Wang, H. Zhao, Y. Wang, S. Tong, Z. Su, W. Wang, J. Bai, “The superior adsorption capacity of boron-nitrogen co-doping walnut shell biochar powder for Au(III), Pt(IV), and Pd(II)”, *J Environ Chem Eng*, 9, 106288, Li, “Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China”, *J Clean Prod*, 148, 509–517, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.036>.
- [2] M. Peydayesh, E. Boschi, F. Donat, R. Mezzenga, “Gold Recovery from E-Waste by Food-Waste Amyloid Aerogels”, *Advanced Materials*, 36, 2310642, 2024. <https://doi.org/10.1002/adma.202310642>.
- [3] K. Liu, Q. Tan, J. Yu, M. Wang, “A global perspective on e-waste recycling”, *Circular Economy*, 2, 100028, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ccc.2023.100028>.
- [4] M.D. Rao, K.K. Singh, C.A. Morrison, J.B. Love, “Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste”, *RSC Adv*, 10, 4300–4309, 2020. <https://doi.org/10.1039/c9ra07607g>.
- [5] F. Tesfaye, D. Lindberg, J. Hamuyuni, P. Taskinen, L. Hupa, “Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste”, *Miner Eng*, 111, 209–221, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.018>.
- [6] M. Sahin, A. Akcil, C. Erust, S. Altynbek, C.S. Gahan, A. Tuncuk, “A Potential Alternative for Precious Metal Recovery from E-waste: Iodine Leaching”, *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, 50, 2587–2595, 2015. <https://doi.org/10.1080/01496395.2015.1061005>.
- [7] M. Baniasadi, F. Vakilchap, N. Bahaloo-Horeh, S.M. Mousavi, S. Farnaud, “Advances in bioleaching as a sustainable method for metal recovery from e-waste: A review”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76, 75–90, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.047>.
- [8] Q. Meng, X. Yan, G. Li, “Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery”, *J Clean Prod*, 323, 129115, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129115>.
- [9] A. Akcil, C. Erust, C. Sekhar Gahan, M. Ozgun, M. Sahin, A. Tuncuk, “Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants – A review”, *Waste Management*, 45, 258–271, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.017>.
- [10] R. Khosravi, A. Azizi, R. Ghaedrahmati, V.K. Gupta, S. Agarwal, “Adsorption of gold from cyanide leaching solution onto activated carbon originating from coconut shell—Optimization, kinetics and equilibrium studies”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 54, 464–471, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.036>.
- [11] Q. Wang, T. Liu, Y. Chen, S. Chen, X. Qin, Y. Nie, F. Zi, “Eco-friendly and economical extraction of

- Pore Diameter of Anodic Aluminium Oxide (AAO) Films Using Taguchi Design”, Arab J Sci Eng, 38, 1305–1312, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0593-2>.
- [31] A. Shaaban, S. M. Se, N. M. M. Mitan, M.F. Dimin, “Characterization of Biochar Derived from Rubber Wood Sawdust through Slow Pyrolysis on Surface Porosities and Functional Groups”, Procedia Engineering, 68, 365-371, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.193>
- [32] S. Y. Foong, B. L. F. Chin, S. S. M. Lock, C. L. Yiin, Y. H. Tan, G. Zheng, S. Ge, R. K. Liew, S. S. Lam, “Enhancing wastewater treatment with engineered biochar from microwave-assisted approach - A comprehensive review”, Environmental Technology & Innovation, 36, 103835, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103835>.
- [33] M. A. Mele, R. Kumar, T. K. Dada, A. Heydari, E. Antunes, “Investigation of gold adsorption by ironbark biochar using response surface methodology and artificial neural network modelling”, Journal of Cleaner Production, 456, 142317, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142317>.
- [34] M. Lekka, I. Masavetas, A. V. Benedetti, A. Moutsatsou, L. Fedrizzi, “Gold recovery from waste electrical and electronic equipment by electrodeposition: A feasibility study”, Hydrometallurgy, 157, 97–106, 2015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.07.017>.
- [35] M. Huy Do, G. Tien Nguyen, U. Dong Thach, Y. Lee, T. Huu Bui, “Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from E-waste: A comprehensive review and perspectives”, Miner Eng, 191, 107977, 2023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107977>.
- [36] B.K. Biswal, R. Balasubramanian, “Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review”, J Environ Chem Eng, 11, 110986, 2023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>.
- [37] S. Syed, “Recovery of gold from secondary sources—A review”, Hydrometallurgy, 115–116, 30–51, 2012. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>.
- [38] F. J. Algucil, “Adsorption of Gold(I) and Gold(III) Using Multiwalled Carbon Nanotubes”, Appl. Sci., 8, 2264, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8112264>
2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106288>.
- [22] Y. Tong, B.K. Mayer, P.J. McNamara, “Triclosan adsorption using wastewater biosolids-derived biochar”, Environ Sci (Camb), 2, 761–768, 2016. <https://doi.org/10.1039/C6EW00127K>.
- [23] X. Kong, Y. Liu, J. Pi, W. Li, Q. Liao, J. Shang, “Low-cost magnetic herbal biochar: characterization and application for antibiotic removal”, Environmental Science and Pollution Research, 24, 6679–6687, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8376-z>.
- [24] N. Hassanzadeh, H. Omidvar, M. Poorbafrani, S.H. Tabaian, “Influence of Anodizing Parameters on Pore Diameter of Anodic Aluminium Oxide (AAO) Films Using Taguchi Design”, Arab J Sci Eng, 38, 1305–1312, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0593-2>.
- [25] S. Fogarasi, F. Imre-Lucaci, Á. Imre-Lucaci, P. Ilea, “Copper recovery and gold enrichment from waste printed circuit boards by mediated electrochemical oxidation”, J Hazard Mater, 273, 215–221, 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.043>.
- [26] M.M.H. Rocky, I.M.M. Rahman, M. Endo, H. Hasegawa, “Comprehensive insights into aqua regia-based hybrid methods for efficient recovery of precious metals from secondary raw materials”, Chemical Engineering Journal, 495, 153537, 2024. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccej.2024.153537>.
- [27] Q. Meng, X. Yan, G. Li, “Eco-friendly and reagent recyclable gold extraction by iodination leaching-electrodeposition recovery”, Journal of Cleaner Production, 323, 129115, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129115>.
- [28] M. D. Rao, K. K. Singh, C. A. Morrison, J. B. Love, “Challenges and opportunities in the recovery of gold from electronic waste”, RSC Adv., 10, 4300, 2020, <https://doi.org/10.1039/C9RA07607G>.
- [29] M. H. Do, G. T. Nguyen, U. D. Thach, Y. Lee, T. H. Bui, “Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from E-waste: A comprehensive review and perspectives”, Minerals Engineering, 191, 107977, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107977>.
- [30] N. Hassanzadeh, H. Omidvar, M. Poorbafrani, S.H. Tabaian, “Influence of Anodizing Parameters on