



Comparison of Effectiveness of Selective Adsorbents for Recovery of Gold from Cyanide Leach Solutions Containing Copper

M. Nourollahi Leilan¹, H. Nikoofard^{2*}, A. Azizi³

1- M. Sc. Student of Physical Chemistry, Shahrood University of Technology

2- Associate Professor of Physical Chemistry, Shahrood University of Technology

3- Associate Professor of Mining Engineering, Shahrood University of Technology

Email: hnikoofard@shahroodut.ac.ir

Abstract

The aim of this research is to investigate the efficiency of various ion exchange resin adsorbents for selective adsorption of gold from cyanide solutions containing copper. The adsorbents used in this study are to be the strong-based Dowex 21K XLT and Purogold™ MTA1940 resins, medium-based Purogold™ MTA1930 resin, weak-based Purogold™ MTA9920 resin and NORIT GAC 1240 activated carbon. The DLLME+AAS and ICP-MS methods were used to carry out the cyanide solutions contain 36 mg/l gold and 3014 mg/l copper. The obtained results showed that NORIT GAC 1240 activated carbon had the highest gold adsorption (at about 99.2%) and also the highest copper adsorption (81.4%), which increased the impurity level in the system. Among the studied adsorbents, Purogold™ MTA9920 resin absorbs less gold than other adsorbents, but due to the absorption of the lowest amount of copper ions (7.6%) and the consumption of the lowest amount of adsorbent, it can be the best option for absorbing gold in this type of solution.

Received: 8 June 2023

Accepted: 31 January 2024

Page Number: 32-45

Keywords:

Gold,
Copper,
Cyanide Solution,
Selective recovery,
Adsorbent,
Ion Exchange Resins

Please Cite this Article Using:

Nourollahi Leilan, M., Nikoofard, H., & Azizi, A. (2024). Comparison of Effectiveness of Selective Adsorbents for Recovery of Gold from Cyanide Leach Solutions Containing Copper. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(135), 32-45, [In Persian].



مقایسه اثربخشی جاذب‌های انتخابی برای بازیابی طلا از محلول‌های لیچ سیانید دارای مس

محمد نوراللهی لیلان^۱، حسین نیکوفرد^{۲*}، اصغر عزیزی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد شیمی فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار شیمی فیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

پایان‌نگار: hnikoofard@shahroodut.ac.ir

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، بررسی کارایی جاذب‌های مختلف رزین تبادل یونی برای جذب انتخابی طلا از محلول سیانید حاوی مس است. جاذب‌های به‌کاررفته در این تحقیق شامل رزین‌های پایه‌قوی Dowex 21K XLT و Purogold™ MTA1940، رزین پایه‌متوسط Purogold™ MTA1930، رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920 و کربن فعال NORIT GAC 1240 بودند. از روش‌های آنالیزی AAS-DLLME و ICP-MS برای بررسی فرایند جذب محلول‌های سیانیدی پایه حاوی ۳۶ mg/l طلا و ۳۰۱۴ mg/l مس استفاده شد. نتایج نشان داد که جاذب NORIT GAC 1240 دارای بیشترین جذب طلا (حدود ۹۹/۲٪) و هم‌چنین بیشترین جذب مس (۸۱/۴٪) است که مقدار ناخالصی را در سامانه افزایش داد. در میان جاذب‌های مطالعه‌شده، رزین Purogold™ MTA9920 طلای کمتری نسبت به سایر جاذب‌ها جذب می‌کند؛ اما به‌دلیل جذب کمترین مقدار یون مس (۷/۶٪) و هم‌چنین مصرف کمترین مقدار ماده جاذب می‌تواند بهترین گزینه برای جذب طلا در این نوع محلول‌ها باشد.

کلیدواژه‌ها:

طلا،
مس،
محلول سیانیدی،
بازیابی انتخابی،
جاذب،
رزین‌های تبادل یونی

* شاهرود، دانشکده شیمی، گروه شیمی فیزیک

استناد به مقاله:

نوراللهی لیلان، محمد، نیکوفرد، حسین، و عزیزی، اصغر. (۱۴۰۳). مقایسه اثربخشی جاذب‌های انتخابی برای بازیابی طلا از محلول‌های لیچ سیانید دارای مس، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳ (۱۳۵)، ۳۲-۴۵.

۱. مقدمه

طلا، نقره و فلزات گروه پلاتین (پلاتین، پالادیوم، اسمیم، رودیم، روتنیم و ایریدیم) از خانواده فلزات گران‌بها هستند. در شرایط عادی، طلا نسبت به واکنش‌های اکسایش غیر فعال است و به‌عنوان یک فلز نجیب طبقه‌بندی می‌شود [۱]. طلا به‌عنوان فلزی نجیب به‌صورت خردایش آزاد^۱، آلیاژی و یا در ترکیب با سولفیدها، آرسنیدها و سایر سنگ‌های معدنی یافت می‌شود [۲]. جایگاه این فلز به‌عنوان یک سرمایه ملی و منبع ثروت و نیز پشتوانه مالی و اقتصادی یک کشور سبب شده‌است که به‌دنبال کاهش سریع طلای آزاد، فرایندهای تولید و بازیابی طلا از کان‌سنگ‌های مقاوم^۲ در سراسر جهان جلب توجه کند که یکی از انواع آن‌ها، کان‌سنگ‌های معدنی طلای غنی از مس است [۳-۵]. فرایند بازیابی طلا از سنگ معدن طلا- مس دارای اشکالات فنی مختلفی است که به انحلال اکثر کانی‌های مس در محلول‌های سیانید نسبت داده می‌شود و این فرایند منجر به مصرف بالای سیانید و هزینه گزاف می‌شود. برخی از کانی‌های مس (مانند کالکوپیریت^۳) می‌توانند ویژگی‌های پیش‌قرض‌گیری را نشان دهند که وقتی در معرض محلول‌های دارای کمبود سیانید قرار می‌گیرند، برگشت‌پذیر هستند [۶]. درحقیقت، یکی از چالش‌های مهمی که صنعت طلا با آن مواجه است، وجود مس در کان‌سنگ حاوی طلا است، به‌ویژه زمانی که کان‌سنگ مورد نظر از نوع کانه مقاوم (مانند کانه‌های سولفیدی طلا) نیز باشد که در این کانه‌ها طلا عمدتاً به‌صورت آزاد نیست و در داخل شبکه کانی‌های سولفیدی به‌صورت محبوس هست و در نتیجه بازیابی طلا در فرایند سیانوراسیون کم است (معمولاً کمتر از ۸۰ درصد) [۷، ۸]. تخمین زده می‌شود که بیش از ۲۰ درصد از کل تولید طلای جهان از سنگ معدن مس-طلا تأمین می‌شود. در ضمن ثابت شده‌است که مس به‌طور اجتناب‌ناپذیری با بیشتر سامانه‌های شست‌وشوی طلا مرتبط است [۹، ۱۰]. حتی بررسی‌های مختلفی در مورد یافتن یک حلال جای‌گزین طلا انجام شده که بیشتر این مطالعات بر روی معرف‌های حاوی گوگرد، هالوژن‌ها و ترکیبات آن‌ها، استفاده از لیچینگ آمونیاکی و سامانه گلاسیسین- سیانید به‌ویژه برای کان‌سنگ‌های مس‌دار به‌عنوان عامل

لیچینگ طلا متمرکز شده‌است [۱۱-۱۳]. با این حال بررسی‌ها نشان می‌دهد که هم‌چنان بیش از ۸۳ درصد از طلای جهان از راه سیانیداسیون استخراج می‌شود؛ زیرا عملیات راحت، هزینه کم و سرعت شست‌وشوی بالایی دارد [۱۱]. از طرفی فرایند مرسوم بازیابی طلا از محلول لیچینگ سیانید، جذب طلا بر روی کربن فعال و استفاده از فرایندهای کربن در لیچ و کربن در پالپ است [۱۴]. حضور مس در این سامانه، مشکلات فنی چشم‌گیری علاوه بر مصرف بالای سیانید ایجاد می‌کند که بستگی زیادی به خواص سنگ معدن دارند. در غلظت‌های پایین سیانید، مس به‌طور رقابتی بر روی کربن فعال جذب می‌شود و بر بازیافت طلا از محلول تأثیر منفی می‌گذارد [۱۵، ۱۶، ۱۷]. از طرفی، در صورتی که سنگ معدن با مواد کربنی همراه باشد، استفاده از جاذب کربن فعال روش مناسبی در بازیافت طلا از محلول سیانید نیست، زیرا مواد کربنی نیز به‌عنوان کربن فعال عمل کرده، باعث جذب طلای محلول و در نتیجه منجر به تلفات ۹۰-۲۰٪ طلا می‌شود [۱۷، ۱۸]. هم‌چنین نتایج پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که در طی فرایند سیانیداسیون، بسیاری از گونه‌های فلزی سیانید در فرایند شست‌وشو ظاهر می‌شوند؛ برای مثال، نقره به‌صورت کمپلکس $Ag(CN)_2^-$ آزاد می‌شود و بهتر از سایر فلزات کمپلکس سیانیدی بر روی کربن فعال جذب می‌شود. از آنجایی که نسبت غلظت $[Au]:[Ag]$ به‌صورت ۲:۱ است، نقره می‌تواند برای جذب طلا با استفاده از کربن فعال به‌عنوان بازدارنده عمل کند [۱۹].

بررسی‌ها نشان می‌دهد که کمپلکس طلا-سیانید را می‌توان از محلول‌های لیچ سیانیدی باردار به‌وسیله کربن فعال یا رزین تبادل یونی (IX) بازیابی کرد که میزان جذب بستگی به ماهیت جاذب و خواص شیمیایی محلول دارد [۱۱]. با این‌که رزین‌های تبادل یونی قیمت بالاتری نسبت به کربن فعال دارند؛ اما برتری‌های زیادی داشته که نشان می‌دهد این رزین‌ها می‌توانند جای‌گزین امیدوارکننده‌ای برای کربن فعال باشند [۲۰، ۲۱]. برخی از مهم‌ترین برتری‌های آن‌ها شامل ظرفیت جذب و یا نرخ بارگذاری بالاتر، قابلیت انتخابی بودن جذب یون طلا نسبت به فلزات پایه مانند مس، احتمال پایین مسمومیت با مواد آلی، بی‌نیازی از بازسازی حرارتی و دوام بالا از نظر تجاری است. این نوع رزین‌ها به دو دسته آنیونی و کاتیونی تقسیم می‌شوند که رزین‌های تبادل آنیونی شامل سه دسته

1. Free Milling
2. Refractory Ores
3. Chalcopyrite

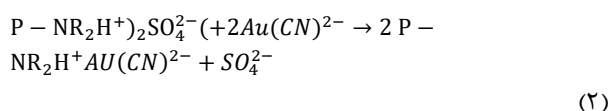
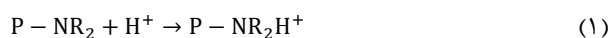
تبادل یونی بازی قوی و ضعیف شامل Purogold™ MTA1940 و Purogold™ MTA9920 برای جذب انتخابی طلا از محلول به‌دست آمده از مرحله لیچینگ سیانیدی یک کانه مقاوم پیریتی غنی از مس بررسی شد. نتایج نشان داد که رزین بازی ضعیف Purogold™ MTA9920 بسیار انتخابی‌تر حتی در غلظت‌های بالای سیانید (5 g/l) عمل می‌کند [۹]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، باتوجه‌به اهمیت موضوع و هزینه گزافی که بازیابی طلا از محلول‌های سیانیدی با غلظت مس بالا دارد، پژوهش‌های اخیر بر بازیابی انتخابی طلا به‌وسیله جاذب‌های رزین تبادل یونی متمرکز شده‌است. بنابراین، باتوجه‌به جهت‌گیری و رویکرد صنعت طلا به بازیابی حداکثری و انتخابی طلا از کانه‌های کم‌عیار و مقاوم (از قبیل کان‌سنگ‌های مس-طلا)، محدودبودن پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه و همچنین ترکیب کانی‌شناسی متفاوت سنگ‌های معدنی حاوی طلا در کشور ایران، هدف پژوهش حاضر بر مقایسه اثر جاذب کربن فعال و جاذب‌های رزین تبادل یونی مختلف بر بازیابی طلا از محلول سیانید با غلظت مس بالا متمرکز شد. در این پژوهش از کربن فعال NORIT GAC 1240 و انواع مختلفی از رزین‌های پایه‌قوی Purogold™ MTA1940، Dowex 21K XLT، پایه‌متوسط Purogold™ MTA1930 و پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920 استفاده می‌شود.

۲. مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام آزمایش‌ها از یک محلول پایه حاوی 36 g/l طلا و 3014 g/l مس استفاده شد (از این به‌بعد با نماد MSA اشاره می‌شود). این آزمایش‌ها شامل اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی جرمی جذب اتمی بود که به‌ترتیب بادستگاه‌های طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت‌شده القایی (ICP-MS) و جذب اتمی (AAS+DLLME) در شرکت کاوشگران روی زنگان انجام شد. محلول MSA در شرایط 1/1 g/l در NaCN، نسبت وزنی بر وزن جامد 25٪، سرعت جریان هوا 1/2 l/min، در محدوده pH بین 10-11 و در حدود 16 ساعت زمان ماند آماده شده‌است. این محلول در فلاسک‌های ارلن مایر با حجم 100 ml تهیه شد و سپس بر روی همزن قرار گرفت [28]. طلای موجود در محلول تهیه‌شده به‌وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری و مقدار آن 36 ppm گزارش شد.

پایه‌قوی، متوسط و ضعیف هستند [22]. به‌طور کلی، در طول فرایند جذب، رزین‌های پایه‌متوسط و ضعیف برای طلا نسبت به فلزات پایه انتخابی‌تر است و شست‌وشوی آن‌ها (استخراج از رزین) به‌سادگی با محلول سود انجام می‌شود. همچنین این نوع رزین‌ها به تغییرات اسیدیته محیط بسیار حساس‌اند و در محدوده pH بهینه 10-11 قرار دارند [23].

برای استفاده از یک رزین با پایه ضعیف و یا متوسط، گروه عاملی آن باید پروتونه شود تا استخراج انجام شود؛ زیرا گروه‌های عاملی آن‌ها آمین‌های ثانویه یا سوم هستند که بار دائمی ندارند. واکنش‌های (۱) و (۲) به‌ترتیب سازوکارهای پروتونه‌شدن و جذب را نشان می‌دهد:



در کل برای جذب طلا از محلول‌های شست‌وشو که حاوی سطوح چشم‌گیری از مس هستند، حفظ نسبت CN/Cu بالا (معمولاً بیشتر از ۲ و حتی بالای ۴) برای بهبود انتخاب‌پذیری کربن فعال برای جذب طلا مورد نیاز است که این به‌دلیل میل نسبتاً کم کربن فعال برای کمپلکس‌های مس-سیانید با بار زیاد است (مانند $Cu(CN)_4^{3-}$ ، $Cu(CN)_3^{2-}$)، که در نسبت‌های CN/Cu بالا تشکیل می‌شوند. با این حال، حتی در غلظت بالایی از سیانید هم، مقدار مشخصی مس همچنان روی کربن فعال جذب می‌شود؛ اما در حین استفاده از جاذب رزین تبادل یونی، نیازی به افزایش نسبت CN/Cu نیست [25, 24, 9]. بنابراین انتخاب روش مناسب برای بازیابی انتخابی طلا از محلول سیانیدی حاوی مس ضروری است و موجب تسهیل در مشکلات این صنعت خواهد شد. اخیراً به استفاده از این نوع رزین‌ها برای بازیابی طلا از محلول‌های سیانید توجه زیادی شده‌است. نتایج تحقیقات ادامز^۱ و ژانگ^۲ و همکاران نشان می‌دهد که میزان طلای بازیافت‌شده از محلول‌های سیانیدی با استفاده از رزین‌ها بسیار بیشتر از بازیافت با استفاده از کربن فعال است، در صورتی که نیاز به هیچ‌گونه پیش‌تصفیه و یا هزینه اضافی نیز ندارد [27, 26]. همچنین به‌تازگی نیز عملکرد کربن فعال و دو رزین

1. Adams
 2. Zhang

پایه قوی Dowex 21K XLT، Purogold™ MTA1940 و رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920، جذب انتخابی طلا نسبت به مس، ظرفیت بارگذاری و نسبت توزیع طلا و مس، ارزیابی و تعیین شد [۲۸]. ویژگی های فنی رزین های استفاده شده در این مطالعه در جدول (۲) ارائه شده است.

مقادیر سایر عناصر موجود در محلول MSA نیز به روش اندازه گیری طیف سنجی جرمی در جدول (۱) نشان داده شده است. با استفاده از جاذب های کربن فعال شرکتی و بدون تغییر در ماهیت ماده با نام اختصاری NORIT GAC 1240 با اندازه دانه مؤثر ۰/۶۵ mm، رزین پایه متوسط Purogold™ MTA1930، رزین

جدول ۱. نتایج اندازه گیری عناصر محلول MSA (به جز طلا) به وسیله طیف سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی.

Table 1. The results of analysis of dissolved elements in MSA sample (apart from Au) by inductively coupled plasma mass spectrometer.

Element	Amount	Element	Amount	Element	Amount	Unit
Ag	0.75	Ho	0.91	Sn	7.4	ppm
As	19.7	Hf	7.41	Sr	347	ppm
Ba	1045	In	0.25	Ta	1.46	ppm
Be	2.6	La	38.7	Tb	0.82	ppm
Bi	1.51	Lu	0.44	Te	0.25	ppm
Cd	0.25	Mo	23	Th	19	ppm
Ce	69	Nb	18.1	Sm	6.41	ppm
Co	17.3	Nd	30.7	Tl	0.9	ppm
Cr	114	Ni	45	Tm	0.38	ppm
Cs	12	Pb	22	U	0.9	ppm
Cu	3014	Pr	8.51	V	132	ppm
Dy	4.67	Rb	201	W	3.65	ppm
Er	2.84	Re	< 0.01	Y	27.6	ppm
Eu	1.59	Sb	0.9	Yb	2.67	ppm
Ga	19.3	Sc	14.7	Zn	80	ppm
Gd	5.41	Se	< 5	Zr	252	ppm
Mn	2.5	Ti	0.503	---	---	wt. %

% wt: Weight percent, ppm: parts per million.

جدول ۲. ویژگی های فنی رزین های تبادل یونی استفاده شده در این تحقیق [۲۹-۳۱]

Table 2. Technical features of ion exchange resins used in this research [29-31]

Name / Brand	Matrix / Type	Functional group	Ionic form	Capacity	Moisture retention (%)	Effective size (µm)
Dowex 21K XLT	Styrene-divinylbenzene / Type I Strong base anion	Quaternary Amines	Cl ⁻	1.4 eq/L	50-60	525-625
Purogold™ MT A1930 *	Macroporous polystyrene divinylbenzene / Mixed base anion	Mixed Tertiary & Quaternary	Cl ⁻	3.8 eq/kg	46-56	800-1300
Purogold™ MTA1940 *	Macroporous / Strong base anion	Quaternary Amines	Cl ⁻	3 eq/kg	44-52	710-1300
Purogold™ MTA9920 *	Macroporous polystyrene divinylbenzene / Weak base, Chelating	Mixed Amines	FB	4.4 eq/kg	47-55	800-1300

* توسعه یافته برای جذب مجتمع های طلا-سیانید از لیج سیانید، FB = Free Base

نشان می‌دهد که در آن میزان جذب طلا (شکل (۲)-a) و میزان جذب مس (شکل (۲)-b) در بازه زمانی بین ۲۰-۴۰۰ min در دمای اتاق و در pH ثابت ۱۰ مشخص است. همچنین در این آزمون، ۱/۵ g از جاذب‌ها به ۶۰ ml محلول اضافه و نتایج بررسی شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، بهترین زمان جذب برای هر جاذب براساس بیشترین جذب طلا و کمترین جذب مس بررسی شده که بر این اساس بهترین زمان جذب برای رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920، رزین پایه‌متوسط Purogold™ MTA1930، رزین‌های پایه‌قوی Purogold™ MTA1940 و Dowex 21K XLT و کمترین فعال NORIT GAC 1240 به ترتیب برابر ۴۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ دقیقه است. همچنین می‌توان نسبت این جاذب‌ها را براساس بیشترین جذب طلا و کمترین جذب مس در زمان بهینه هر جاذب به صورت زیر مقایسه کرد:

$$\text{NORIT GAC 1240} < \text{MTA1940} < \text{MTA9920} < \text{MTA1930} < \text{Dowex 21K XLT} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{D_{Au}}{D_{Cu}} = \frac{[Au]_{\text{adsorbent}} \times [Cu]_{\text{solution}}}{[Cu]_{\text{adsorbent}} \times [Au]_{\text{solution}}} / m \quad (3)$$

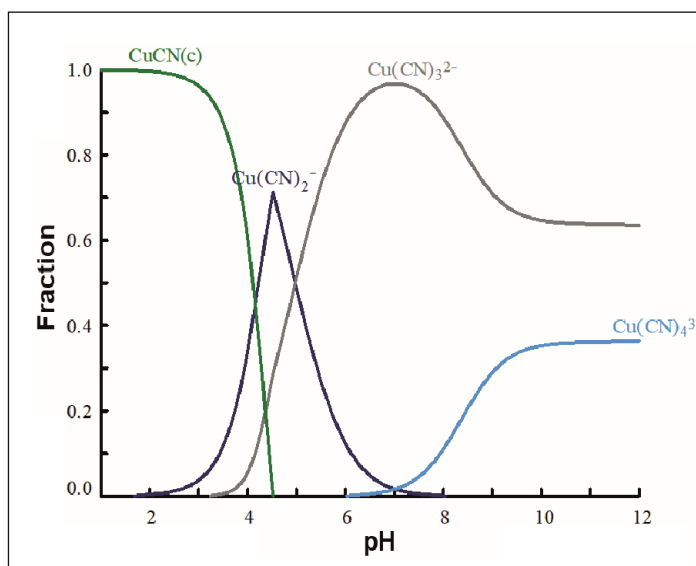
$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (4)$$

D_{Cu} و D_{Au} به ترتیب نسبت جذب طلا و مس، C_0 غلظت اولیه جاذب (mg/l)، C_e غلظت تعادلی جاذب (mg/l)، V حجم محلول (l) و m جرم جاذب (g) هستند.

۳. نتایج و بحث

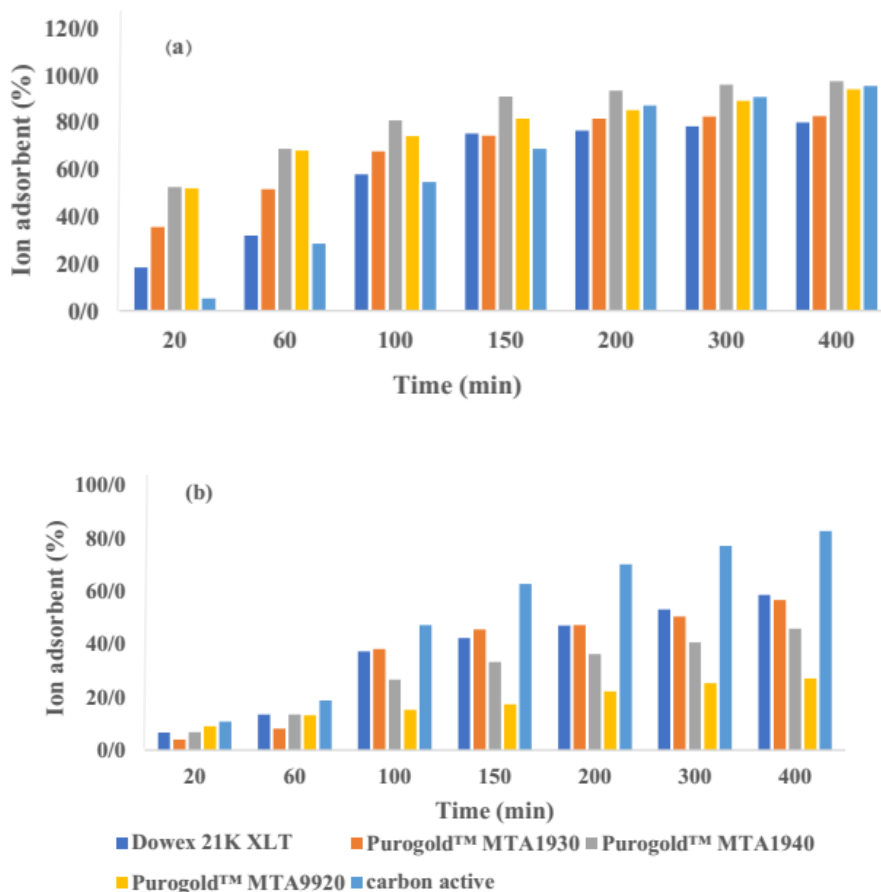
توزیع وابسته به pH کمپلکس‌های مس سیانید در محلول MSA با نرم‌افزار MEDUSA-2009 تعیین شد که در شکل (۱) نمایش داده شده است. نمودار شکل (۱) نشان می‌دهد که کمپلکس‌های غالب مس سیانید محلول در طول آزمایش‌های جذب عبارت‌اند از $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ با ۶۴٪ و $\text{Cu}(\text{CN})_3^{4-}$ با ۳۶٪ که در محدوده pH بین ۱۲-۲ اندازه‌گیری شده و منعکس‌کننده شرایط محلول MSA است.

شکل (۲) نتایج مربوط به آنالیز طیف‌سنجی جذب اتمی را



شکل ۱. نمودار توزیع کمپلکس‌های مس سیانید محلول MSA در مقابل pH [۳۳].

Figure 1. Distribution diagram coppercyanides of MSA solution vs. pH [33].



شکل ۲. جذب یون های (a) طلا و (b) مس در بازه زمانی ۲۰-۴۰۰ min.

Figure 2. Absorption of (a) gold and (b) copper ions in the time interval 20-400 min.

زیرا با افزایش pH از ۱۰ به ۱۱/۵ از محلول حاوی ۱ mg/l طلا، بارگذاری طلا از مقدار ۲۳۷۰۰ g/ton به ۲۳۸۰۰ g/ton کاهش یافت و همچنین در محدوده $pH \geq 12/5$ هیچ جذب طلائی رخ نداد. از همین رو، باتوجه به مطالعات گذشته، محدوده pH در این مطالعه بین ۷-۱۱ در نظر گرفته شد. شکل (۳) تغییرات جذب مس و طلا را براساس تغییر pH جاذب ها نشان می دهد. همان طور که از شکل بالا پیدا است، بهترین pH از نظر بیشترین بازده جذب که مربوط به بیشترین نسبت جذب طلا به جذب مس است برای رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920، رزین پایه متوسط Purogold™ MTA1930، رزین های پایه قوی Dowex 21K XLT و Purogold™ MTA1940 و کربن فعال NORIT GAC 1240 به ترتیب برابر ۱۰، ۱۱، ۱۱ و ۱۰ به دست می آید. همچنین بیشترین تغییرات pH یا تأثیر آن بر فرایند جذب

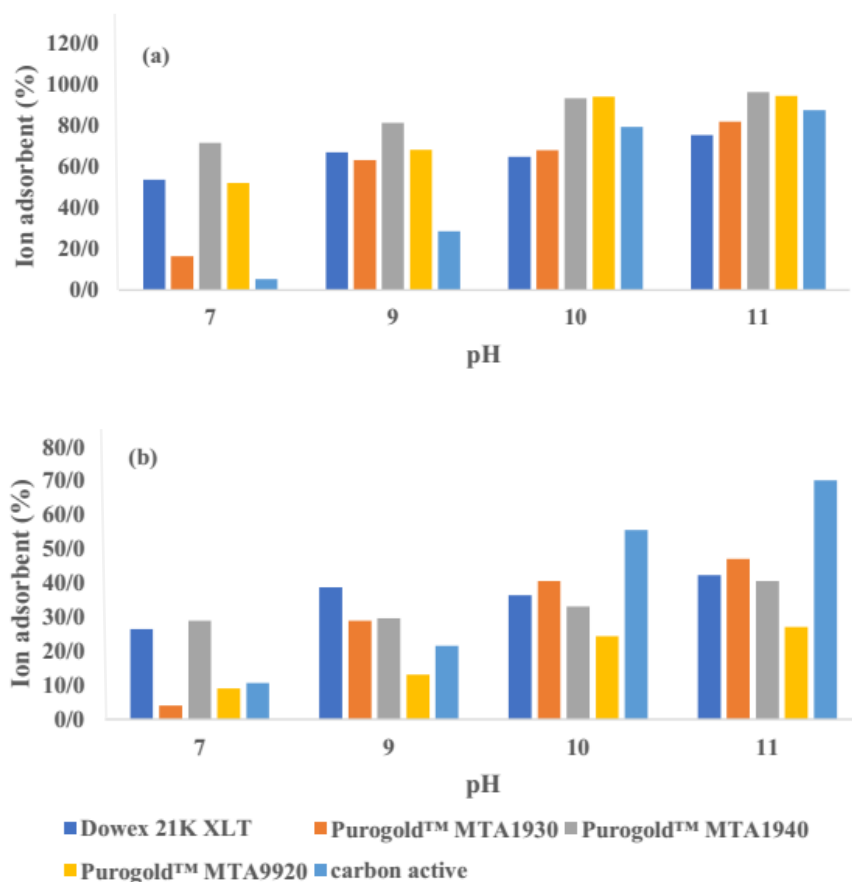
هم چنین برای تعیین بهترین pH از نظر بیشترین بازده، به بررسی میزان جذب طلا و مس در محدوده pH بین ۷-۱۱ و در بهترین زمان جذب مربوط به هر جاذب پرداخته شد. از آنجایی که رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920 نسبت به pH بسیار حساس است، مطالعات مختلفی در زمینه بررسی محدوده مناسب pH این جاذب انجام شده است. وویلوشنیکوا^۱ و همکاران [۲۳] گزارش کردند که بارگذاری بهینه طلا و حداقل جذب مس روی رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920 در pH حدود ۱۰/۵-۱۰/۴ رخ داده است. هم چنین وان دونتس^۲ و همکاران [۳۲] نیز عملکرد جذب طلا را با استفاده از رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920 از محلول های طلائی مصنوعی و سیانید چندفلزی را بررسی کردند که نتایج آزمایش های تعادلی نشان داد که رزین نسبت به pH حساس است؛

1. Voiloshnikova
 2. Van Deventer

افزایش دما است، در صورتی که ظرفیت جذب طلا بر روی آن‌ها تغییری نشان نمی‌دهد؛ از این‌رو، موجب افزایش کارایی جاذب‌های رزینی می‌شود. در مقابل، جذب ناخالصی مس بر روی جاذب کربن فعال NORIT GAC 1240 با افزایش دما بالا می‌رود و بدین ترتیب کارایی خود را نسبت به دمای پایین از دست می‌دهد. همچنین مطابق با نتایج، بهترین بازده جذب (بیشترین جذب طلا و کمترین جذب مس) در کل محدوده دمایی مطالعه شده، مربوط به رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920 است، در صورتی که رزین پایه قوی Dowex 21K XLT کمترین تغییر بازده را نسبت به سایر جاذب‌ها داشت.

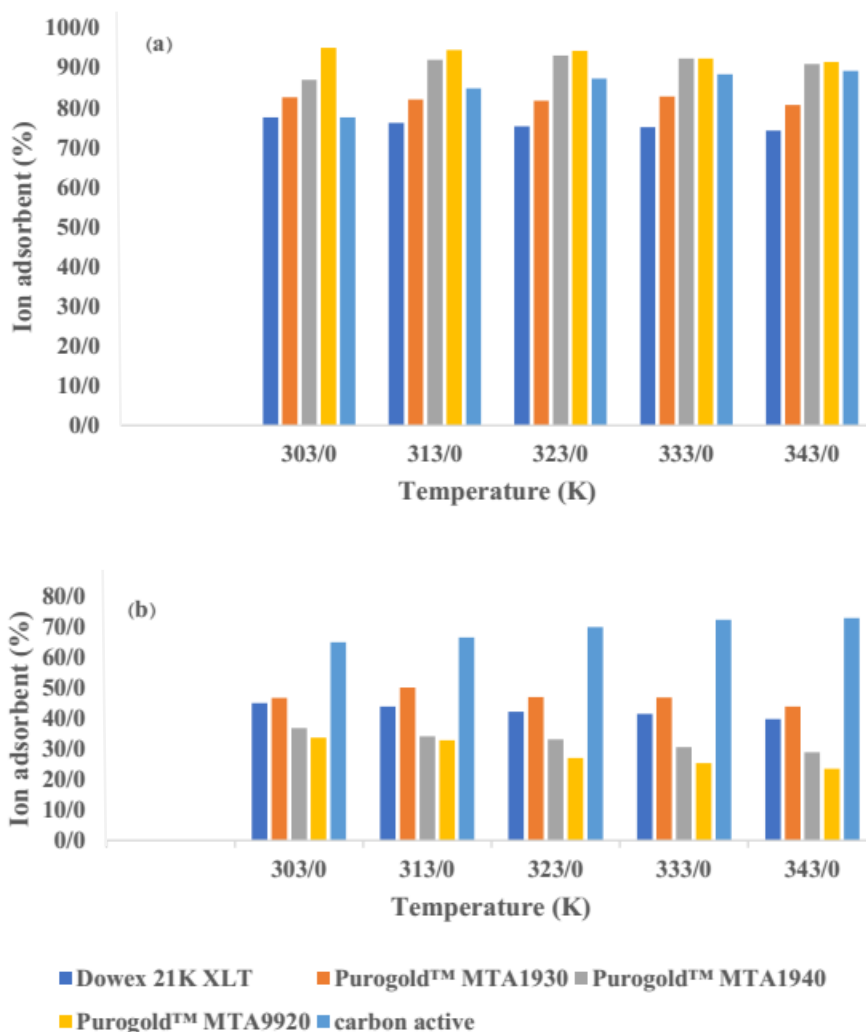
مربوطه جاذب کربن فعال NORIT GAC 1240 است و بیشترین جذب طلا در گستره تغییرات pH مورد مطالعه روی رزین پایه قوی Purogold™ MTA1940 انجام می‌گیرد.

پس از بررسی تأثیر عوامل زمان و pH بر روی فرایند جذب، در این بخش به بررسی و تعیین دمای مناسب جذب در محدوده ۳۰۳-۳۴۳ K پرداخته شد که نتایج حاصل از آن در شکل (۴) پیدا است. همان‌طور که از شکل (۴) مشخص است، بیشترین اثر دما بر فرایند جذب ناخالصی مس (شکل (۴-b)) نسبت به طلا (شکل (۴-a)) مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه در این زمینه، کاهش جذب ناخالصی بر روی همه رزین‌های تبادل یونی همراه با



شکل ۳. جذب یون‌های (a) طلا و (b) مس در محدوده pH بین ۷-۱۱ در زمان بهینه هر جاذب.

Figure 3. Absorption of (a) gold and (b) copper ions in the pH range 7-11 at the optimized time for each adsorbent.

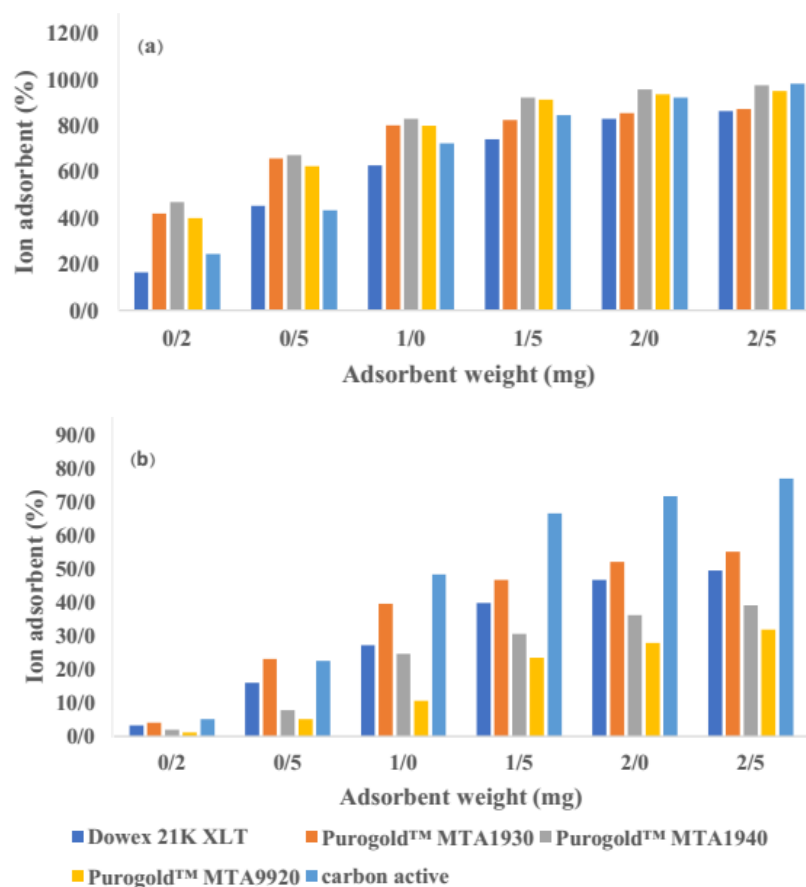


شکل ۴. جذب یون های (a) طلا و (b) مس در بازه دمایی K ۳۰۳-۳۴۳.

Figure 4. Absorption of (a) gold and (b) copper ions in the temperature range of 303-343 K.

به دست می آید. نتایج این شکل نشان می دهد که رزین پایه قوی Purogold™ MTA1940 امکان جذب طلای بیشتر را با کمترین میزان مصرف ماده جاذب، نسبت به سایر رزین ها دارد؛ در حالی که جذب ناخالصی مس آن نیز زیاد است، اما رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920 با این که از نظر جذب طلا ضعیف تر از رزین پایه قوی عمل کرده، با این حال کمترین جذب مس را داشته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که این رزین در این آزمون، عملکرد بهتری نسبت به سایر رزین ها نشان داده است.

در ادامه، میزان مصرف مواد جاذب برای بهترین جذب به عنوان یک مؤلفه اقتصادی نیز بررسی شد تا بتوان در نهایت، براساس نتایج تمامی مؤلفه های بررسی شده، بهترین جاذب را شناسایی کرد. نتایج مربوط به این بررسی در شکل (۵) پیدا است. چنان که مشاهده می شود، میزان مصرف ماده جاذب برای رزین پایه ضعیف Purogold™ MTA9920، رزین های پایه قوی Purogold™ MTA1930، Purogold™ MTA1940 و Dowex 21K XLT و کربن فعال NORIT GAC 1240 به ترتیب برابر ۱، ۱، ۱/۵، ۲/۵ و ۲/۵ گرم



شکل ۵. جذب یون‌های (a) طلا و (b) مس برحسب جرم جاذب.

Figure 5. Absorption of (a) gold and (b) copper ions against adsorbent weight.

داخلی تغییر یافت، به طوری که غلظت طلا از ۳۶ ppm به ۵۰۰ ppm افزایش و غلظت مس از مقدار ۳۰۱۴ ppm به ۳۶۷/۸ ppm کاهش یافت. جدول (۳) بهترین شرایط جذب هر یک از جاذب‌ها را براساس میزان مصرف جاذب، دما، pH، زمان و حجم طلا و مس نشان می‌دهد.

براساس نتایج این پژوهش، ناخاصی فلز مس تأثیر مهمی بر میزان جذب یون طلا در محلول سیانیدی MSA دارد. در این بخش با بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های انجام شده برای تعیین بهترین شرایط سامانه جذب به‌ازای هر جاذب، می‌توان به بررسی تأثیر کاهش میزان ناخاصی بر سینتیک بارگذاری طلا و مس پرداخت. بنابراین غلظت طلا و مس موجود در محلول با استفاده از استانداردسازی

جدول ۳. مشخصات محلول استاندارد و شرایط مؤثر هر یک از جاذب‌ها.

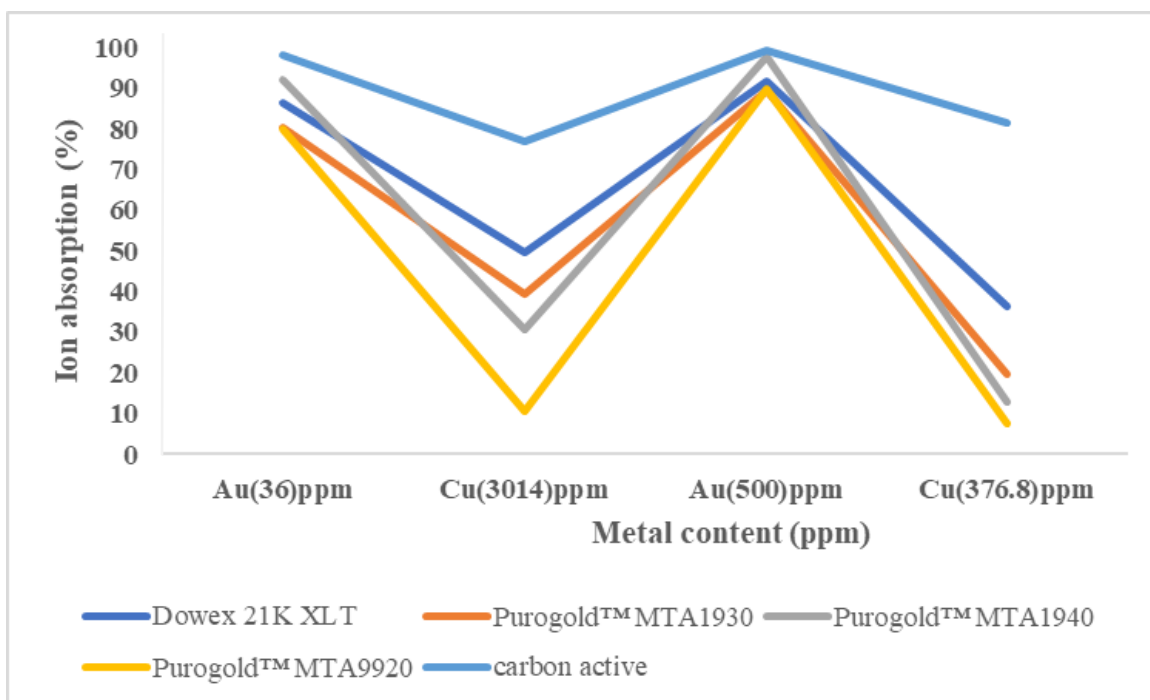
Table 3. Specifications of the standard solution and the effective conditions for each adsorbent.

Adsorbent	Mass (g)	Temperature (K)	pH	Time (min)	Cu (ppm)	Au (ppm)
Dowex 21K XLT	2.5	343	11	150	367.8	500
Purogold™ MTA1930	1.0	303	11	200	367.8	500
Purogold™ MTA1940	1.5	333	11	300	367.8	500
Purogold™ MTA9920	1.0	343	10	400	367.8	500
NORIT GAC 1240	2.5	313	10	200	367.8	500

نمودارهای جذب یون انتخابی طلا و یون ناخالصی مس در محلول‌های MSA با غلظت‌های مختلف از طلا و مس در حضور مشخصه‌های مؤثر هر جاذب (جدول (۳)) در شکل (۶) نشان داده شده‌است. چنان‌که در شکل (۶) مشخص است با تغییرات غلظت طلا از ۳۶ ppm به ۵۰۰ ppm و مس از ۳۰۱۴ ppm به ۳۷۶/۸ ppm ظرفیت بارگذاری طلا و هم‌چنین ناخالصی مس بر روی جاذب کربن فعال نسبت به جاذب‌های رزینی بیشتر است. در شرایط استفاده از این جاذب به میزان ۲/۵ g، حدود ۵۰۰ ppm طلا در هر ۲۰۰ min بارگذاری شد، درحالی‌که در شرایط استفاده از رزین پایه‌قوی Purogold™ MTA1940 به میزان ۱/۵ g، حدود ۵۰۰ ppm طلا در هر ۳۰۰ min بارگذاری شد که به اندازه ۱۰۰ دقیقه اختلاف زمان بین این دو جاذب وجود دارد. هم‌چنین نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920 توانست بیشترین نسبت جذب یون انتخابی طلا و کمترین جذب یون ناخالصی مس را با مصرف کمترین حجم جاذب و البته با صرف بیشترین زمان جذب داشته‌باشد. رزین‌های پایه‌قوی و پایه‌متوسط

به میزان میانگین ۹۸-۸۹٪ رسید. در جدول (۴) نسبت جذب طلا و مس، گزینش‌پذیری و میزان یون طلا و مس جذب‌شده در همه جاذب‌ها مقایسه شده‌است. براساس جدول (۴)، رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920 با این‌که طلای کمتری نسبت به سایر جاذب‌ها جذب می‌کند؛ اما به دلیل جذب کمترین مقدار یون مس و هم‌چنین مصرف کمترین مقدار ماده جاذب، می‌تواند به‌عنوان بهترین جاذب انتخابی پیشنهاد شود. پس از رزین پایه‌ضعیف، رزین‌های تبادل یونی Dowex 21K XLT، Purogold™ MTA1930 و Purogold™ MTA1940 کمترین جذب مس را دارند، درحالی‌که جاذب کربن فعال NORIT GAC 1240 نسبت به همه رزین‌های جاذب، طلای بیشتر و البته مس بیشتری را نیز جذب کرده‌است.

نمودارهای جذب یون انتخابی طلا و یون ناخالصی مس در محلول‌های MSA با غلظت‌های مختلف از طلا و مس در حضور مشخصه‌های مؤثر هر جاذب (جدول (۳)) در شکل (۶) نشان داده شده‌است. چنان‌که در شکل (۶) مشخص است با تغییرات غلظت طلا از ۳۶ ppm به ۵۰۰ ppm و مس از ۳۰۱۴ ppm به ۳۷۶/۸ ppm ظرفیت بارگذاری طلا و هم‌چنین ناخالصی مس بر روی جاذب کربن فعال نسبت به جاذب‌های رزینی بیشتر است. در شرایط استفاده از این جاذب به میزان ۲/۵ g، حدود ۵۰۰ ppm طلا در هر ۲۰۰ min بارگذاری شد، درحالی‌که در شرایط استفاده از رزین پایه‌قوی Purogold™ MTA1940 به میزان ۱/۵ g، حدود ۵۰۰ ppm طلا در هر ۳۰۰ min بارگذاری شد که به اندازه ۱۰۰ دقیقه اختلاف زمان بین این دو جاذب وجود دارد. هم‌چنین نتایج شکل (۶) نشان می‌دهد که رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920 توانست بیشترین نسبت جذب یون انتخابی طلا و کمترین جذب یون ناخالصی مس را با مصرف کمترین حجم جاذب و البته با صرف بیشترین زمان جذب داشته‌باشد. رزین‌های پایه‌قوی و پایه‌متوسط



شکل ۶. نمودارهای جذب انتخابی یون طلا و ناخالصی مس در شرایط مؤثر هر جاذب.

Figure 6. Selective absorption diagrams of gold and copper impurity ions in effective conditions for each adsorbent.

جدول ۴. مقایسه مؤلفه‌های جذب در همه جاذب‌ها.

Table 4. Comparison of absorption components in all adsorbents.

Adsorbent	D _{Au}	D _{Cu}	μ (selectivity)	q _e (Au) (g/ton)	q _e (Cu) (g/ton)
Dowex 21K XLT	18.50	5.51	1.01	463	138
Purogold™ MTA1930	45.15	7.38	4.58	451	74
Purogold™ MTA1940	32.78	3.23	5.14	492	48
Purogold™ MTA9920	45.17	2.88	11.77	452	29
NORIT GAC 1240	19.98	12.27	0.49	499	307

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقایسه‌ای بین انواع جاذب‌های رزین تبادل یونی و جاذب کربن فعال برای جذب انتخابی طلا از محلول سیانیدی پایه حاوی ۳۶ mg/l طلا و ۳۰۱۴ mg/l مس به روش اندازه‌گیری طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی و جذب اتمی انجام گرفت. مؤثرترین شرایط جذب انتخابی طلا نسبت به ناخالصی مس از لحاظ زمان بازیابی، pH، دما، مقدار جاذب، عیار طلا و غلظت ناخالصی محلول برای هر جاذب مشخص شد. یافته‌ها نشان داد که بالاترین بازده جذب برای همه جاذب‌ها در pH محدوده ۱۱-۱۰ قرار دارد. همچنین نتایج نشان داد که فرایند جذب ناخالصی نسبت به طلا بیشتر تحت تأثیر دما قرار دارد. در این زمینه، جذب ناخالصی بر روی همه جاذب‌های رزینی با افزایش دما کاهش می‌یابد؛ در صورتی که ظرفیت جذب طلا بر روی آن‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد و از این رو موجب افزایش کارایی جاذب‌های رزینی در دمای بالا می‌شود. از آنجایی که جذب ناخالصی بر روی جاذب کربن فعال NORIT GAC 1240 با افزایش دما افزایش می‌یابد، این جاذب کارایی خود را در دمای بالا از دست می‌دهد. همچنین مشخص شد که مقدار مصرف ماده جاذب برای رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920، رزین پایه‌متوسط Purogold™ MTA1930، رزین‌های پایه‌قوی Purogold™ MTA1940 و Dowex 21K XLT و کربن فعال NORIT GAC 1240 به ترتیب برابر ۱، ۱/۵، ۲/۵ و ۲/۵ گرم بود. افزون بر این، یافته‌های به دست آمده نشان داد که جاذب کربن فعال NORIT GAC 1240 میزان طلای بیشتری نسبت به سایر جاذب‌های رزینی جذب می‌کند، در حالی که میزان مس جذب شده به وسیله این جاذب نیز زیاد است؛ اما جاذب‌های رزینی به مراتب میزان مس

یافته‌های حاصل از این پژوهش در تأیید برخی مطالعات پیشین نشان داد که فلزات پایه مانند مس می‌توانند به عنوان ناخالصی در فرایند جذب طلا بر روی رزین‌های تبادل یونی عمل کنند. همچنین بارگذاری و گزینش طلا با استفاده از رزین‌های تبادل یونی، به شدت تحت تأثیر حضور غلظت زیاد یون ناخالصی و همچنین قدرت یونی آن در محلول است که ممکن است منجر به رقابت سایر آنیون‌ها و کمپلکس‌های مس-سیانید با کمپلکس‌های طلا-سیانید شود. حضور احتمالی سیلیس در محلول MSA نیز ممکن است به رسوب‌گیری رزین و در نتیجه کاهش بارگذاری طلا کمک کند. در مطالعات مارسدن^۱، ساینر^۲ و فلمینگ^۳ نیز تأکید شده است که رزین‌های پایه‌ضعیف و متوسط دارای گزینش‌پذیری بالاتری برای طلا نسبت به رزین‌های پایه‌قوی هستند [۳۵،۳۴،۷]. در پژوهش مشابهی، وان دونت و همکاران [۳۰] عملکرد رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920، رزین پایه‌قوی Purogold™ MTA1940 و کربن فعال NORIT GAC 1240 را با استفاده از محلول حاوی ۱/۴ mg/L طلا و ۱ mg/L مس مقایسه کردند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که ترتیب گزینش‌پذیری این جاذب‌ها به صورت NORIT GAC 1240 > Purogold™ MTA9920 > Purogold™ MTA1940 است و ترتیب بارگذاری طلا به وسیله این جاذب‌ها به صورت Purogold™ MTA1940 > NORIT GAC 1240 > Purogold™ MTA9920 است. تفاوت نتایج مطالعات گذشته با تحقیق اخیر می‌تواند به مقایسه هم‌زمان جاذب کربن فعال با هر سه نوع جاذب رزینی (قوی، متوسط و ضعیف)، ویژگی شیمیایی سنگ معدن طلای ایران و تداخل سایر یون‌ها در محلول نسبت داده شود.

1. Marsden
2. Sayiner
3. Fleming

- Reviews*, 156: 105370.
- [7] Marsden, J. O. & House, C. I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*, Second ed. Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, Colorado, USA.
- [8] Mahmoodi, F. & Azizi, A. (2018). Optimizing the alkaline oxidation pretreatment of a refractory gold ore using taguchi orthogonal array method. *Materials Research Express*, 5: 126516.
- [9] Msumange, D. A., Yazici, E. Y., Celep, O., Deveci, H., Kritskii, A. & Karimov K. (2023). Recovery of Au and Ag from the roasted calcine of a copper-rich pyritic refractory gold ore using ion exchange resins. *Minerals Engineering*, 195: 108017.
- [10] Azizitorghabeh, A., Mahandra, H., Ramsay, J. & Ghahreman, A. (2023). Selective gold recovery from pregnant thiocyanate leach solution using ion exchange resins. *Hydrometallurgy*, 218: 106055.
- [11] Li, J., Kou, J., Sun, Ch., Zhang, N. & Zhang, H. (2023). A review of environmentally friendly gold lixivants: Fundamentals, applications, and commonalities. *Minerals Engineering*, 197: 108074.
- [12] Grosse, A. C., Dicoski, G. W., Shaw, M. J. & Haddad, P. R. (2003). Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors (a review). *Hydrometallurgy*, 69: 1-21.
- [13] Oraby, E. A. (2017). Gold and copper leaching from gold-copper ores and concentrates using a synergistic lixiviant mixture of glycine and cyanide. *Hydrometallurgy*, 169: 339-345.
- [14] Fleming, C. A., Mezei, A., Bourricaudy, E., Canizares, M. & Ashbury, M. (2011). Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. *Minerals Engineering*, 24: 484-494.
- [15] Adams, M., (2005) "Advances in gold ore processing", First Edition, Elsevier, London, 241.
- [16] Yang, W., Dong, H., Cao, H., Long, T., Deng, S. & Wan, H. (2023). Lead Oxide Enhances the Leaching of Gold in Cyanide Tailings. *The Journal of Minerals, Metals & Materials Society*, 75: 301-309.
- [17] Celep, O., Bas, A. D., Yazici, E. Y., Alp, I. & Deveci, H. (2015). Improvement of silver extraction by ultrafine grinding prior to cyanide leaching of the plant tailings of a refractory silver ore. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36: 227-236.
- [18] Celep, O. (2021). Effect of flotation and potassium hydroxide pretreatment of an antimonial refractory ore on the extraction of silver by cyanidation. *Minerals Engineering*, 172: 107171.

کمتری جذب می‌کند که این موضوع به دلیل کاهش ناخالصی در جذب، بسیار مهم است. رزین پایه‌ضعیف Purogold™ MTA9920 با این که طلای کمتری نسبت به سایر جاذب‌ها جذب می‌کند، اما به دلیل جذب کمترین مقدار یون مس و هم‌چنین مصرف کمترین مقدار ماده جاذب، می‌تواند گزینه مناسبی برای انتخاب جاذب باشد. هم‌چنین پس از رزین پایه‌ضعیف نیز رزین‌های تبادل یونی Dowex Purogold™ MTA1940 و Purogold™ MTA1930، 21K XLT کمترین جذب مس و در نتیجه بیشترین بازدهی را از خود نشان دادند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جاذب Purogold™ MTA9920 می‌تواند از لحاظ اقتصادی با بازیابی مناسب طلا از محلول‌های لیچینگ سیانید غنی از مس با تکیه بر ظرفیت نسبتاً بالای آن استفاده شود.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از حمایت‌های دانشگاه صنعتی شاهرود تشکر و قدردانی می‌کنند.

مراجع

- [1] Grilli, M. L., Slobozeanu, A. E., Larosa, C., Paneva, D., Yakoumis, I. & Cherkezova-Zheleva, Z. (2023). Platinum Group Metals: Green Recovery from Spent Auto-Catalysts and Reuse in New Catalysts: A Review. *Crystals*, 13: 550-579.
- [2] Ng, W. S., Liu, Y., Wang, Q. & Chen, M. (2023). The fate of the arsenic species in the pressure oxidation of refractory gold ores: Practical and modelling aspects. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 44: 155-187.
- [3] Gomes, C. P., Almeida, M. F. & Loureiro, J. M. (2001). Gold recovery with ion exchange used resins. *Separation and Purification Technology*, 24: 35-57.
- [4] Leao, V. A., Lukey, G. C., van Deventer, J. S. & Ciminelli, V. S. (2001). The dependence of sorbed copper and nickel cyanide speciation on ion exchange resin type. *Hydrometallurgy*, 61: 105-119.
- [5] Bachiller, D., Torre, M., Rendueles & Diaz, M. (2004). Cyanide recovery by ion exchange from gold ore waste effluents containing copper. *Minerals Engineering*, 17: 767-774.
- [6] Zhang, M., Shen, J., Santosh, M., Li, Ch., Liu, H., Yu, H., Kamoto, M., Du, B. & Liu, J. (2023). Tellurium and Gold enrichment aided by melts and pyrite crystallization kinetics: Insights from the Yongxin gold deposit, Northeast China. *Ore Geology*

- [19] Danscher, G. & Rasmussen, S. (2023). NanoGold and μ Gold inhibit autoimmune inflammation: a review. *Histochemistry and cell biology*, 159: 225-232.
- [20] Esmailpour, M., Ghahraman Afshar, M., Noroozi Tisseh, Z. & Ghahremanzadeh, R. (2023). Phosphonomethyl amino diacetic acid as an effective magnetic nanosorbent for the removal of Ni(II), Pb(II), V(V) ions from aqueous solutions. *Iranian Chemical Engineering Journal*, Doi:10.22034/IJCHE.2023.361493.1242 [In Persian].
- [21] Abedpour, H., Moghadas, J. S. & Alizadeh, R. (2023). Adsorption of lead from aqueous solution using nanostructured silica aerogel/zeolite ZSM-5 composite. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22: 7-32. Doi: 10.22034/IJCHE.2022.351399.1222 [In Persian].
- [22] Kotze, M., Green, B., Mackenzie, I. & Virnig, M. (2016). Resin-in-pulp and resin-in-solution. *Gold Ore Processing*, Second Edition, Elsevier, 561-583.
- [23] Voiloshnikova, N., Deemyteyev, V., Voiloshnikov, G., Grigoryeva, I., Moskaeva, N., "A comparison of anion exchange resins for adsorption processes in the gold industry" in XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago-Chile, 1-10, (2014).
- [24] Dai, X., Breuer, P. & Jeffrey, M. (2010). Comparison of activated carbon and ion-exchange resins in recovering copper from cyanide leach solutions. *Hydrometallurgy*, 101: 48-57.
- [25] Dai, X. & Simons, A. (2012). Breuer P., A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores. *Minerals Engineering*, 25: 1-13.
- [26] Adams, M. D. (2016). *Gold ore processing: project development and operations*, Second Edition, Elsevier, Amsterdam.
- [27] Zhang, Y., Xu, B., Zheng, Y., Li, Q., Yang, Y., Liu, X., Jiang, T. & Lyu, X. (2021). Hexaamminecobalt (III) catalyzed thiosulfate leaching of gold from a concentrate calcine and gold recovery from its pregnant leach solution via resin adsorption. *Minerals Engineering*, 171: 107079.
- [28] Msumange, D. A., Yazici, E. Y., Celep, O. & Deveci, H. (2021). The effectiveness of adsorbents for selective recovery of gold from copper-bearing cyanide leach solutions. *Scientific Mining Journal*, 60: 21-30.
- [29] Van Deventer, J. (2014). New developments in ion exchange resins for the recovery of gold from complex ores. *Hydrometallurgy, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, Canada*, 677: 687.
- [30] Van Deventer, J., Kotze, M. & Yahorava, V. (2012). Gold Recovery From Copper-Rich Ores Employing the Purogold S992 Gold-Selective Ion Exchange Resin, proceedings of the ALTA 2012 Gold Conference, Melbourne, Australia, ALTA Metallurgical Service.
- [31] Msumange, D. A., Yazici, E. Y., Celep, O. & Deveci, H. (2021). A comparison of ion-exchange resins and activated carbon in recovering gold from cyanide leach solutions with low levels of copper. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 168: 35-41.
- [32] Van Deventer, J., Bazhko, V. & Yahorava, V. (2014). Comparison of gold-selective ion exchange resins and activated carbon for the recovery of gold from copper-gold leach liquors, proceedings of the Gold-Precious Metals Conference (ALTA 2014), Melbourne, Australia, p. 18.
- [33] Msumange, D. A., Yazici, E. Y., Celep, O. & Deveci, H. (2020). Investigation of the Amenability of a Copper-Rich Refractory Gold Ore to Cyanide Leaching. *Scientific Mining Journal*, 59: 225-234.
- [34] Sayiner, B. & Acarkan, N. (2014). Effect of silver, nickel and copper cyanides on gold adsorption on activated carbon in cyanide leach solutions. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50: 277-287.
- [35] Fleming, C. A. & Cromberge, G. (1984). The elution of aurocyanide from strong-and weak-base resins. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 84: 269-280.