

## تصفیه طلا از محلول لیچینگ کلریدی لجن آندی مس با استفاده از حلال آلی اکتانول-کروزن

نیما صادقی و اسکندر کشاورز علمداری\*

دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۱۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۰۲/۱۳)

**چکیده** - در پژوهش حاضر پس از لیچینگ لجن آندی مس در محلول کلریدی، با استفاده از روش استخراج حلالی و حلال آلی اکتانول-کروزن محلول باردار تخلیص شد. ماکرومولکول استخراج شده به صورت  $\text{HAuCl}_4 \cdot 2\text{L}$  تعیین شد و جدایش ناخالصی‌ها (آهن، مس و سلنیوم) از محلول آبی در حضور طلا مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌های نظری انجام شده بر روی نمودار مک‌کیب-تیلی در حلال ۴۰٪ حجمی اکتانول و ۳ مول برلیتر از اسید کلریدریک نشان می‌دهد که در نسبت حجمی آلی به آبی (O/A) ۰/۷۵، طی ۵ مرحله استخراج به صورت جریان متقابل، غلظت طلا در فاز آبی از ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به ۷ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. محلول آمونیاک توانایی تهی سازی طلا از فاز آلی فوق را دارد. همچنین برای تعیین تعداد مراحل تهی سازی، نمودار تعادلی ایزوترم تهی سازی طلا در حضور آمونیاک رسم شد.

واژگان کلیدی: استخراج حلالی، طلا، محلول کلریدی، لجن آندی مس، اکتانول، تهی سازی

## Purification of Gold from Chloride Leach Liquor of Copper Anode Slime by Octanol-Kerosene Organic Extractant

N. Sadeghi and E. Keshavarz Alamdari\*

Department of Mining and Metallurgical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

**Abstract:** *In the present study, the copper anode slime was leached in chloride media. Then, pregnant leach solution (PLS) was purified using solvent extraction method and Octanol-kerosene solution.  $\text{HAuCl}_4 \cdot 2\text{L}$  was determined as the extracted macromolecule, and separation of impurities, such as copper, iron and selenium was done in the presence of gold. McCabe-Thiele diagram of Au-HCl (3 M)- Octanol (40% v/v) in O/A=3/4 showed that Au concentration in aqueous phase decreased from the initial value of 200 to 7 mg/L, after 5 stages. Ammonia solution was proposed as the stripper and McCabe-Thiele diagram was presented to obtain the number of gold stripping steps by ammonia solution.*

**Keywords:** *Solvent extraction, Gold, Chloride solution, Copper anode slime, Octanol, Stripping*

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: alamdari@aut.ac.ir

## ۱- مقدمه

تاثیر انکارناپذیر طلا بر تفکر، اقتصاد، سیاست و زیست بشری برهیچ کس پوشیده نیست. نجیب بودن، کارپذیری عالی، وزن اتمی بالا، هدایت الکتریکی مناسب و دیگر خصوصیت‌های آن موجب گشوده شدن عرصه‌های جدید به‌کارگیری این فلز شده، باعث شده تا طلا به‌طور گسترده‌ای در تجهیزات روزمره از لوازم زینتی گرفته تا مدارهای الکترونیکی مجتمع و حتی صنایع خودروسازی به‌کار گرفته شود [۱]. استفاده روزافزون طلا چنان است که قیمت آن در بازارهای جهانی در ۱۰ سال اخیر بیش از پانصد درصد رشد نشان داده است. بنابراین امروزه نیاز به شناسایی منابع جدید و استفاده از منابع کم‌عیاری که در گذشته استخراج این فلز از آن‌ها مقرون به‌صرفه نبود، احساس می‌شود.

لجن آندی مس به‌عنوان یکی از منابع پرعیار برای استحصال طلا به حساب می‌آید. در فرایندهای هیدرومتالورژیکی، به‌واسطه غلظت بسیار پائین طلا در مواد اولیه حاوی این فلز، محلول به‌دست آمده از لیچینگ حاوی غلظت بسیار پایینی از این فلز و افزون‌بر آن دارای مقادیر قابل توجهی از ناخالصی‌های مختلف است. یکی از روش‌های بسیار کاربردی بازیابی طلا، استفاده از روش استخراج حلالی برای غنی‌سازی و تصفیه این فلز است. این روش براساس فرایند جداسازی مایع-مایع استوار است که شامل دو فاز آبی و آلی می‌باشد. عملیات استخراج و بازیابی (استریپ) طی دو مرحله جداگانه صورت می‌گیرند [۲]. در مرحله اول (مرحله استخراج) کمپلکس طلا که در فاز آبی وجود دارد، در تماس با محلول آلی قرار می‌گیرد و به فاز آلی منتقل می‌شود. در مرحله دوم (تهی‌سازی) فاز آلی باردار در تماس مجدد با محلول آبی دیگر قرار می‌گیرد و طلای خود را به محلول آبی باز می‌گرداند.

معروف‌ترین حلال‌های آلی که برای استخراج حلالی طلا استفاده می‌شوند، شامل ترکیب‌های آلی فسفین‌اکسیدی، کتونی، اتری، آمینی و حلال‌های پایه فسفری هستند. از ترکیب‌ها فسفین‌اکسیدی می‌توان به حلال‌هایی مانند Cyanex921 [۳]،

Cyanex923 [۴] و Cyanex471x [۵] اشاره نمود که طلا را با مکانیزم انحلالی استخراج می‌نمایند. از خانواده کتون‌ها می‌توان به حلال معروف MIBK اشاره کرد [۶]. اترها از جمله موادی هستند که در استخراج حلالی طلا استفاده شدند. از این گروه می‌توان به ترکیب DBC که برای استخراج طلا از محلول کلریدی پیشنهاد شده است [۷] اشاره نمود. معروف‌ترین حلال‌های آمینی Aliquat 304 [۸] و Alamin334 [۹] هستند که با مکانیزم تعویض آنیونی طلا را استخراج می‌نمایند. از تری‌بوتیل فسفات (TBP) برای استخراج طلا از محلول‌های کلریدی استفاده شده است [۱۰]. ترکیب‌های دیگری که در استخراج طلا می‌توانند مفید باشند و کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند، الکل‌ها هستند. نونیز (Nunes) و همکارانش [۱۱] در پژوهش‌های خود، استخراج طلا توسط گروه‌های مختلف از الکل‌های ساخته شده را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، اکتانول می‌تواند طلا را از محلول کلریدی استخراج نماید.

حلال‌های فسفین‌اکسیدی ترکیباتی سمی، گران و با دسترسی محدود برای تولیدکننده‌ها هستند. با وجود آنکه این گروه از حلال‌ها توانایی استخراج بالایی برای طلا از سیستم‌های کلریدی دارند ولی انحصار تولید این محصول توسط یک تولیدکننده خاص عملاً استفاده آن‌ها را برای مصارف صنعتی و پژوهشی در کشور غیرممکن کرده است. کتون‌ها با وجود استخراج انتخابی مطلوب، به‌علت ظرفیت بارگیری محدود و میزان انحلال بالای فاز آلی در فاز آبی عملاً برای استخراج طلا از منابع تقریباً پرعیار مانند لجن آندی مس مناسب نیستند. حلال DBC با وجود تمایل بالا برای استخراج طلا از محلول کلریدی، به‌علت قابلیت تهی‌سازی ناچیز توسط حلال‌های مختلف با استقبال چندانی روبرو نشده است. اکتانول ترکیبی آلی از خانواده الکل‌ها با فرمول شیمیایی  $C_8H_{18}O$  می‌باشد. قیمت نسبتاً پایین، دسترسی آسان، غیرسمی بودن و تولید بومی آن در صنایع شیمیایی کشور از مزایای آشکار آن برای استخراج حلالی یون‌های فلزی از محلول است.

جدول ۱- غلظت عناصر موجود در محلول باردار

Pt	Pd	Ag	Se	Ni	Fe	Cu	Au	یون
ناچیز	۱۶/۸۳	۳۱۴/۱۲	۲۵۸۹	۳۴/۲	۹۱۲/۲۸	۷۵۴/۶۲	۱۵۸/۱	غلظت (mg/l)

Merck، آلمان)، آمونیاک (تهیه شده از آزمایشگاه دکتر مجللی، ایران) و کلرید سدیم (ساخت آزمایشگاه دکتر مجللی، ایران) برای تهیه سازی طلا از محلول آلی باردار استفاده شد. محلول لیچینگ با لیچینگ لجن آندی مس و توسط اسید کلریدریک و گاز کلر ساخته شد. تحلیل عنصری محلول اولیه برای تعدادی از عناصر جدول ۱ گزارش شده است.

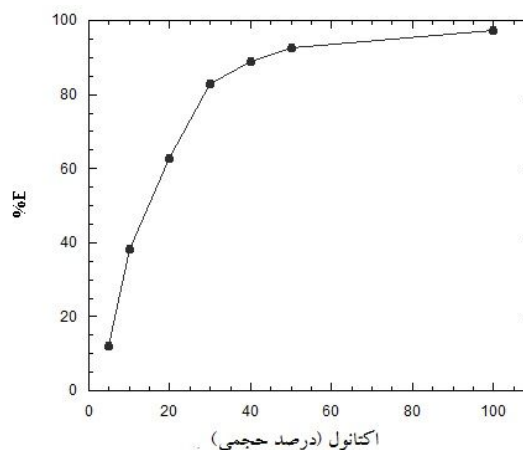
ماده اولیه حاوی طلا در حضور گاز کلر در محلول اسید کلریدریک با غلظت ۳ مول بر لیتر لیچ شد. محلول لیچینگ به دست آمده توسط فاز آلی دارای محلول اکتانول رقیق شده در کروزن، در ارلن مخلوط و با استفاده از یک همزن مکانیکی بازوئی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد هم زده می شود. سپس با استفاده از قیف جداکننده مخلوط دو فاز آلی و آبی از هم دیگر تفکیک می شود. در آزمایش های تهیه سازی، فاز آلی باردار در تقابل با محلول تهیه سازی قرار گرفت و در فرایندی شبیه به حالت استخراج، که جزئیات آن توضیح داده شده است، یون های طلا از فاز آلی تخلیه شد.

پس از جداسازی دو فاز آلی و آبی، غلظت یون های فلزی در فاز آبی توسط دستگاه جذب اتمی (Varian, A320) و فاز آلی به وسیله موازنه جرم طلا از فاز آبی اولیه و نهایی تعیین شد. برای تعیین غلظت اسید در محلول لیچینگ از تیترازول سود استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تاثیر غلظت اکتانول بر استخراج طلا

تاثیر غلظت اکتانول بر استخراج طلا از محلول لیچینگ با غلظت ۳ مول بر لیتر اسید کلریدریک بررسی شد. غلظت طلا در محلول اولیه برابر با ۱۵۸/۱ میلی گرم بر لیتر است. نتایج این بررسی ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در این



شکل ۱- تاثیر نسبت حجمی اکتانول/کروزن بر درصد استخراج

طلا در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد از محیط آبی حاوی اسید کلریدریک با غلظت ۳ مول بر لیتر و غلظت اولیه ۱۵۸/۱ میلی گرم بر لیتر

هدف اصلی مطالعه های انجام شده در این مقاله بررسی استخراج حلالی طلا پس از لیچینگ لجن آندی مس توسط محلول کلریدی است. با توجه به شرایط کاری تعیین شده در طی آزمایش های انجام شده، نمودارهای ایزوترم تعادلی استخراج و تهیه سازی (مک کیب تیلی) رسم شد. استخراج و تهیه سازی یون طلا از فاز آلی توسط محلول مناسب بررسی و شرایط تعادلی برای استخراج و تهیه سازی برای استفاده صنعتی از این حلال تعیین شد.

### ۲- مواد و روش پژوهش

اکتانول با خلوص آزمایشگاهی (ساخت شرکت Aldrich، آلمان) و کروزن (تهیه شده از پالایشگاه اصفهان، ایران) برای ساخت محلول آلی استفاده شدند. محلول آبی با انحلال نمونه معدنی در اسید کلریدریک (ساخت آزمایشگاه دکتر مجللی، ایران) و گاز کلر تهیه شد. ترکیبات هیدروکسید سدیم (ساخت

کـــه در آن  $a_{\text{HAuCl}_4.n\text{L}}$ ،  $x_{\text{HAuCl}_4.n\text{L}}$  و  $[\text{HAuCl}_4.n\text{L}]$  به ترتیب فعالیت (اکتیویته)، ضریب فعالیت و غلظت کمپلکس آلی تشکیل شده و  $a_{\text{AuCl}_4^-}$ ،  $\gamma_{\text{AuCl}_4^-}$  و  $[\text{AuCl}_4^-]$  به ترتیب فعالیت، ضریب فعالیت و غلظت کمپلکس آبی حاوی طلا و  $a_L$ ،  $\gamma_L$  و  $[L]$  به ترتیب فعالیت، ضریب فعالیت و غلظت فاز آلی استخراج کننده هستند. اگر نسبت ثابت تعادل به نسبت ضریب‌های فعالیت به صورت ثابت تعادل ظاهری به شکل رابطه ۳ تعریف شود:

$$K_{\text{app}} = \frac{K_p}{\frac{x_{\text{HAuCl}_4.n\text{L}}}{x_{\text{H}^+} x_{\text{AuCl}_4^-} x_{\text{L}}^n}} \quad (3)$$

در آن صورت با به کارگیری تعریف ثابت تعادل به صورت رابطه ۴:

$$D = \frac{[\text{HAuCl}_4.n\text{L}]}{[\text{AuCl}_4^-]} \quad (4)$$

ثابت تعادل ظاهری به شکل رابطه ۵ نشان داده می‌شود.

$$K_{\text{app}} = \frac{D}{[\text{H}^+][\text{L}]^n} \quad (5)$$

اگر از طرفین رابطه ۵ لگاریتم گرفته شود و رابطه به دست آمده برحسب  $\log D$  مرتب شود، می‌توان رابطه ۳ را به صورت رابطه ۶ بازنویسی کرد.

$$\begin{aligned} \log D &= \log K_{\text{app}} + \log[\text{H}^+] + n \log[L] \\ &= \log K_{\text{app}} - \text{pH} + n \log[L] \end{aligned} \quad (6)$$

بر اساس روش تحلیل شیب در صورتی که بررسی‌ها در شرایط هم‌دما و غلظت ثابت اسید کلریدریک، با غلظت‌های متفاوت استخراج کننده آلی انجام گیرد و تغییرات  $\log D$  برحسب  $\log[L]$  در روی یک منحنی رسم شوند، شیب منحنی نشان‌دهنده تعداد مولکول‌های درگیر در استخراج طلا از فاز آبی براساس واکنش شیمیائی ۱ خواهد بود.

در شکل ۲ تغییرات ضریب توزیع طلا،  $\log D$ ، برحسب غلظت اکتانول،  $\log[L]$ ، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد از محیط آبی حاوی اسید کلریدریک با غلظت ۳ مول بر لیتر و غلظت طلای اولیه ۱۵۷ میلی‌گرم بر لیتر رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود مقدار شیب خط برابر ۱/۹۹۷ است. از آنجایی که این مقدار باید یک عدد صحیح باشد،

شکل مشاهده می‌شود اکتانول توانایی استخراج طلا از محلول کلریدی را دارد. حضور ۱۰٪ اکتانول در کروزن منجر به استخراج بیش از ۳۵٪ از طلا در محلول اولیه شده است. افزایش بیش‌تر استخراج‌کننده در سیستم به شدت بر میزان استخراج طلا می‌افزاید. با افزایش غلظت اکتانول بیش‌تر از ۳۰٪، شیب تغییرات مقدار طلای استخراج شده به آرامی کاهش می‌یابد. در غلظت ۱۰٪ اکتانول، بیش‌تر از ۹۸٪ از طلا موجود در فاز آبی استخراج می‌شود. کاهش شیب منحنی با افزایش غلظت استخراج کننده، می‌تواند نشان‌دهنده تعادلی بودن واکنش استخراج و کاهش تاثیر استخراج کننده در این شرایط باشد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد اکتانول، حلال مناسبی برای استخراج طلا از محلول لیچ کلریدی است. افزایش غلظت استخراج کننده آلی (اکتانول) تاثیر محسوسی بر استخراج طلا دارد و افزایش غلظت آن درصد استخراج را به شدت افزایش می‌دهد اما به علت مشکلات محتمل در مرحله تهی‌سازی طلا از فاز آلی نمی‌توان استفاده از حلال خالص (بدون رقیق‌کننده) را به عنوان شرایط بهینه برای استخراج پیشنهاد نمود. بنابراین نیاز به بررسی برای تهی‌سازی طلا از حلال فوق وجود دارد.

### ۳-۲- مکانیزم واکنش استخراج طلا

برای تعیین مکانیزم واکنش استخراج طلا از محلول کلریدی توسط اکتانول از روش تحلیل شیب‌ها استفاده شد. برای این منظور واکنش استخراج طلا توسط حلال آلی (L) به صورت واکنش ۱ در نظر گرفته می‌شود:



اگر فرض شود که واکنش استخراج ۱ به صورت تعادلی انجام می‌شود، در آن صورت ثابت تعادل این واکنش به صورت رابطه ۲ نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{a_{\text{HAuCl}_4.n\text{L}}}{a_{\text{H}^+} a_{\text{AuCl}_4^-} a_{\text{L}}^n} \\ &= \frac{x_{\text{HAuCl}_4.n\text{L}}}{x_{\text{H}^+} x_{\text{AuCl}_4^-} x_{\text{L}}^n} \times \frac{[\text{HAuCl}_4.n\text{L}]}{[\text{H}^+][\text{AuCl}_4^-][\text{L}]^n} \end{aligned} \quad (2)$$

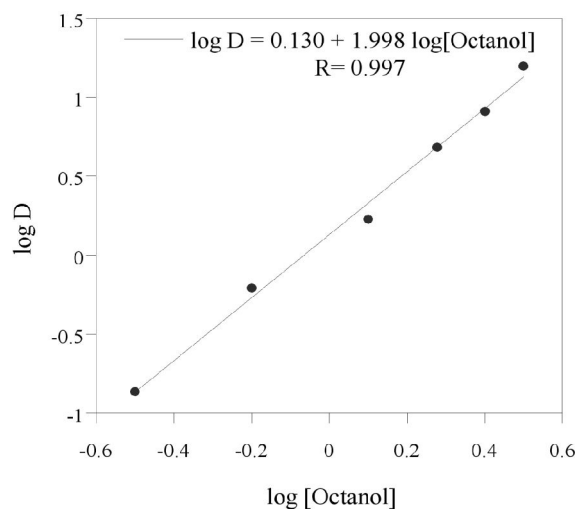
جدول ۲- نسبت تفکیک عناصر مختلف توسط ۴۰٪ حجمی اکتانول در کروژن

log S	فاکتور جدایش (S)	غلظت (mg/l)		ناخالصی
		پس از استخراج حلالی	پیش از استخراج حلالی	
۲/۶۳۶۹۵۷	۴۳۳/۴۶۷	۷۳۶/۱۲	۷۵۴/۶۲	مس
۲/۰۵۱۸۰	۱۱۲/۶۶۹	۸۳۳/۶۳	۹۱۲/۲۸	آهن
۳/۲۶۱۰۵	۱۸۲۴/۱۰۸	۲۵۷۴	۲۵۸۹	سلنیوم
۰/۷۷۰۴	۵/۸۹۳۲	۱۱۲/۳	۳۱۴/۱	نقره

با خلوص بالا، زدودن ناخالصی از سیستم ضروری است. اصلی ترین ناخالصی های موجود در محلول لیچینگ مس، آهن، سلنیوم، نقره پلاتین و پالادیوم است. برای بررسی استخراج این عناصر توسط اکتانول، محلول لیچینگ پیش و پس از استخراج حلالی تحت بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از بررسی فوق در جدول ۲ گزارش شده است. برای تعیین میزان توانایی جدایش عناصر مختلف از طلا توسط حلال آلی، معیاری با عنوان فاکتور جدایش در نظر گرفته شده، به صورت رابطه ۸ تعریف می شود.

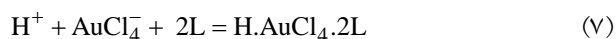
$$S = \frac{D_{Au}}{D_X} \quad (8)$$

در رابطه فوق اندیس D مربوط به نسبت توزیع فلز در دو فاز آلی و آبی و X بیانگر ناخالصی موجود در محلول است. همان طور که در جدول ۲ دیده می شود، اکتانول برای جداسازی فلزات مس و سلنیوم به صورت کاملاً انتخابی عمل نموده است. همچنین آهن و نقره به صورت قابل توجه از محلول زدوده شده اند. حذف نقره را نمی توان فقط به استخراج نقره توسط اکتانول نسبت داد. تلاطم ناشی از فرایند استخراج حلالی موجب خروج گاز اشباع شده کلر از محلول آبی می شود. با حذف کلر، نقره با یون کلر موجود واکنش می دهد و به صورت  $AgCl$  ته نشین می شود. ذرات ته نشین شده در حین استخراج حلالی مشاهده شد اما برای اطمینان از حذف نقره از سیستم پس از تهی سازی از نقره تحلیل شیمیایی گرفته شد. نتایج نشان دهنده عدم حضور نقره در محلول آبی پایانی است و نقره از سیستم تصفیه شده است.



شکل ۲- تغییرات log D نسبت به log [Octanol] در غلظت 3 mol/l HCl

بنابراین می توان نتیجه گرفت که مقدار ضریب استخراج اکتانول باید تقریباً برابر ۲ باشد. بر همین اساس واکنش ۱ را می توان به صورت رابطه ۷ بازنویسی کرد. براساس این رابطه نتیجه می شود که در ماکرومولکول تشکیل شده به ازای استخراج هر یک مولکول  $AuCl_4^-$ ، دو مولکول اکتانول وارد کمپلکس می شود.



### ۳-۳- جدایش ناخالصی فلزی

محیط به شدت اکسیدی لیچینگ موجب انحلال برخی از عناصر که همراه با طلا در لجن آندی مس وجود دارد، می شود. با وجود آن که بسیاری از ناخالصی ها می توانند به عنوان عناصر ارزشمند در عرصه های مختلف استفاده شوند اما برای تولید طلا

جدول ۳- تغییرات غلظت طلا در فرایند استخراج در جریان متقابل توسط ۰.۴۰ (v/v)٪ اوکتانول از ۳ mol/l مول بر لیتر اسید کلریدریک

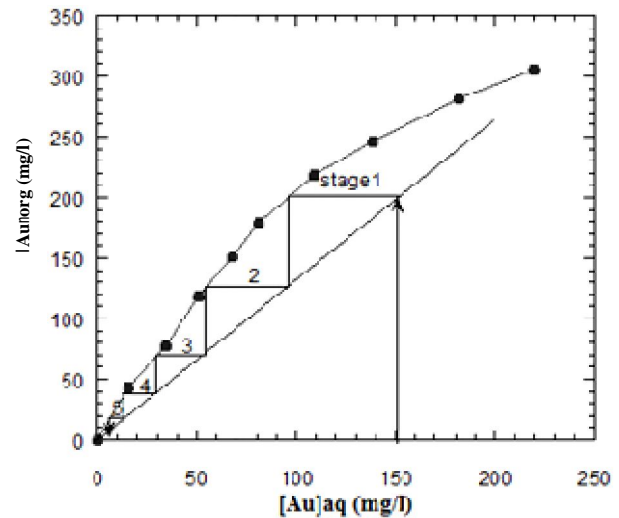
مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	مرحله ۴	مرحله ۵
غلظت طلا در فاز آبی (mg/l)	۹۸/۵	۶۲/۵	۳۴	۱۸
غلظت طلا در فاز آلی (mg/l)	۲۰۰	۱۲۸	۷۴/۵	۴۳
				۷
				۱۹

ناخالصی‌ها و بازیابی ساده‌تر طلا از محلول آلی باردار در مرحله تهی‌سازی است. این حلال آلی با توجه به شرایط تعادلی پیش‌بینی شده می‌تواند طلا را از محلولی با غلظت یک تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر به راحتی استخراج نماید.

بنابراین بر اساس آزمایش‌های استاندارد مرسوم، محاسبات مربوط به استخراج طلا در شرایط هم‌دما و اسیدیته (pH) ثابت انجام و نمودار ایزوترم استخراج طلا توسط اوکتانول در شکل ۳ رسم شد. براساس منحنی هم‌دما استخراج (مک‌کیب - تیلی) در شکل ۳، تغییر غلظت طلا منجر به افزایش یا کاهش مراحل استخراج خواهد شد. در این شرایط در صورتی که غلظت اولیه محلول ورودی به فرایند استخراج حلالی (غلظت اولیه محلول لیچینگ) برابر با ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر طلا باشد، در پنج مرحله و با نسبت حجمی آلی به آبی (V<sub>o</sub> / V<sub>a</sub>) برابر با ۰/۷۵، غلظت آن به کم‌تر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. در جدول ۳ تغییرات غلظت طلا در فرایند استخراج به صورت جریان متقابل، توسط ۰.۴۰ (v/v)٪ اوکتانول از ۳ mol/l مول بر لیتر اسید کلریدریک نشان داده شده است.

### ۳-۵- تهی‌سازی فاز آلی باردار

تهی‌سازی فاز آلی باردار پس از استخراج حلالی توسط حلال آلی، از مراحل مهم و لازم در فرایندهای تولید صنعتی است. براساس فرض‌ها اولیه، گونه یونی استخراج شده (AuCl<sub>4</sub><sup>-</sup>)، ترکیب‌های مختلفی نظیر کلرید سدیم، هیدروکسید سدیم، آب مقطر و آمونیاک توانایی تهی‌سازی فاز آلی باردار را دارند که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، غلظت طلا در فاز آلی اولیه برابر با ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است. از این رو، بررسی‌های مربوط به تهی‌سازی با محلول آلی حاوی ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر طلا



شکل ۳- نمودار هم‌دما و مک‌کیب-تیلی استخراج طلا توسط ۰.۴۰ (v/v)٪ حجمی اوکتانول از ۳ مول بر لیتر اسید کلریدریک

### ۳-۴- نمودار تعادلی استخراج طلا از محلول لیچینگ

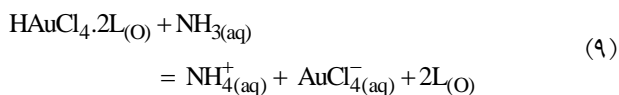
براساس واکنش تعادلی ۴ و مقدار ثابت تعادل واکنش استخراج، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که غلظت طلا در فازهای آبی و آلی به هم دیگر ارتباط دارند. برای تعیین غلظت‌های تعادلی طلا در دو فاز آبی و آلی، نمودار تعادلی برای واکنش استخراج استریپ رسم می‌شوند. این نمودارها شامل اطلاعاتی مانند ظرفیت بارگیری حلال، تعداد شرایط کاری و تعیین تعداد گام‌های مورد نیاز برای استخراج تعادلی (به صورت جریان متقابل) است.

براساس اطلاعات نشان داده شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت استخراج‌کننده آلی استخراج طلا از فاز آبی افزایش ولی شیب تغییرات درصد استخراج بعد از ۴۰ درصد حجمی اوکتانول به شدت کاهش می‌یابد بنابراین برای ادامه مطالعات از حلال آلی با غلظت ۰.۴۰ (v/v)٪ استفاده شد. علت اصلی انتخاب غلظت فوق برای فرایند، عدم استخراج

جدول ۴- تاثیر محلول‌های مختلف برای تهی‌سازی طلا از حلال آلی

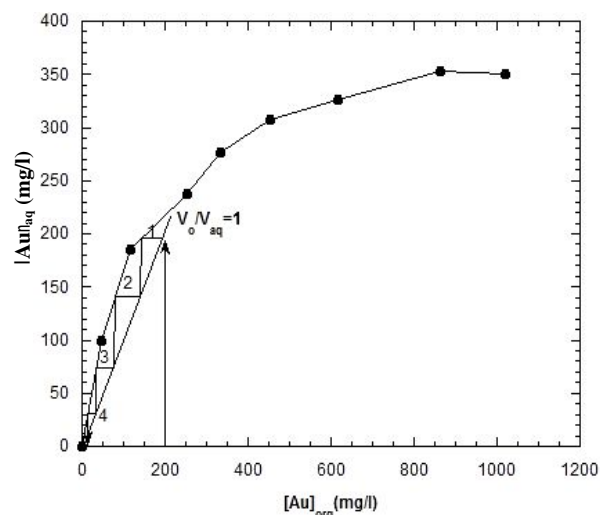
محلول تهی‌ساز	غلظت (mol/l)	درصد بازیابی (%)
آب مقطر	-	۶/۴
کلرید سدیم (NaCl)	۰/۲۵	۴/۲
	۰/۵	۴/۵
	۱	۳/۲
هیدروکسید سدیم (NaOH)	۰/۱	۱۰/۲
	۰/۲۵	۱۳/۸
	۰/۵	۱۵/۱
آمونیاک (NH <sub>3</sub> )	۰/۰۲۱	۵۸/۴
	۰/۰۴۳	۶۷/۲
	۰/۰۶	۲۴/۲
	۰/۰۸۵	۱۷/۲

غلظت ۰/۰۲۱ مول بر لیتر توانایی تهی‌سازی بیش از ۵۸٪ طلا را از حلال آلی دارد. افزایش غلظت آمونیاک تا ۰/۰۴۳ مول بر لیتر موجب افزایش بازیابی طلا می‌شود اما در غلظت‌های بیش‌تر از ۰/۰۶ مول بر لیتر آمونیاک، درصد بازیابی کاهش می‌یابد. مشاهده‌های تجربی نشان می‌دهد که با افزایش غلظت آمونیاک فاز سومی که ساختاری ژله‌ای دارد تشکیل می‌شود. تشکیل این فاز در فرایند تهی‌سازی می‌تواند از انتقال طلا از فاز آلی به آبی جلوگیری نماید. واکنش محتمل برای تهی‌سازی طلا از محلول آلی اکتانول-کروزن به‌صورت رابطه ۹ پیشنهاد شد.



### ۳-۶- نمودار تعادلی تهی‌سازی طلا از حلال آلی

پس از تشخیص ترکیب مناسب برای تهی‌سازی طلا از فاز آلی، نمودار همدم‌تعدادی برای تهی‌سازی رسم شد. غلظت انتخابی برای تهی‌سازی در این نمودار برابر با ۰/۰۲۱ مول بر لیتر در نظر گرفته شد. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص شده است. با



شکل ۴- نمودار تعادلی و مک‌کیب-تیلی تهی‌سازی طلا از ۰/۰۴۰ حجمی اکتانول توسط محلول ۰/۰۲۱ مول بر لیتر آمونیاک

صورت گرفت که نتایج حاصل شده از این بررسی در جدول ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازیابی طلا توسط آب مقطر، محلول هیدروکسید سدیم و کلرید سدیم ناچیز و درصد بازیابی کم‌تر از ۱۵٪ است. تهی‌سازی توسط محلول آمونیاک نتیجه دلخواه‌تری دارد. محلول با

#### ۴- نتیجه گیری

براساس پژوهش حاضر، اکتانول توانایی استخراج طلا از محلول‌های کلریدی را با کارایی مناسب دارد و ماکرومولکول استخراجی از محلول کلریدی به صورت  $\text{HAuCl}_4 \cdot 2\text{L}$  است. با به‌کارگیری روش استخراج حلالی توسط حلال اکتانول، ناخالصی‌هایی نظیر مس، سلنیوم، نیکل، آهن و نقره به‌میزان قابل ملاحظه‌ای از طلا جدا شدند. در این روش با استفاده از حلال ۴۰٪ حجمی اکتانول از محلولی حاوی ۱۵۰ میلی‌گرم بر لیتر طلا فرایند استخراج با نسبت حجمی آلی به آبی ۰/۷۵ به‌صورت جریان متقابل به‌طور کامل در پنج مرحله صورت گرفت. هم‌چنین محلول آمونیاک به‌عنوان یک تهی‌ساز مناسب طلا از اکتانول استفاده شد و از محلول آلی باردار با حدود ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر طلا با نسبت حجمی ۱ در چهار مرحله و به‌صورت جریان متقابل توسط محلول ۰/۲۱ مول بر لیتر آمونیاک بازیابی شد.

افزایش غلظت طلا در فاز آبی از ظرفیت تخلیه طلا کاسته می‌شود تا این‌که در ۳۵۰ میلی‌گرم بر لیتر ظرفیت تهی‌سازی طلا در مقدار ثابتی باقی می‌ماند. برای تهی‌سازی طلا از محلول‌هایی با غلظت بالاتر طلا، باید غلظت آمونیاک در سیستم افزایش یابد.

براساس نمودار مک‌کیب-تیلی رسم شده در شکل ۴ برای تهی‌سازی طلا، در صورتی‌که از سیستم تهی‌سازی به‌صورت جریان متقابل استفاده شود که در آن محلول آلی باردار با غلظت طلای معادل ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و نسبت حجمی فاز آبی به آلی ( $V_a/V_o$ ) برابر با یک باشد، طی چهار مرحله غلظت طلا در فاز آلی به حدود ۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. فاز آبی که دارای طلای جدا شده است، برای بازیابی طلا با استفاده از روش‌های متداول (الکترووینینگ یا سم‌تاسیون) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. فاز آلی تهی شده نیز قابلیت استفاده مجدد در فرایند استخراج حلالی را دارد.

#### مراجع

- Corti, C. and Holliday, R., *Gold: Science and Applications*, CRC Press, London, 2011
- Aguilar, M. and Cortina, J.L., *Solvent Extraction and Liquid Membranes*, CRC Press Pub, New York, pp. 14-25, 2008.
- Martinez, S., Sastre, A and Alguacil, A., "Gold Extraction Equilibrium in the System Cyanex 921-HCl-Au(III)", *Hydrometallurgy*, Vol. 46, pp. 205-214, 1997.
- Alguacil, F.J. and Caravaca, C., "Extraction of Gold from Cyanide or Chloride Media by Cyanex 923", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 72, pp. 339-346, 1998.
- Martinez, S., Navarro, P., Sastre, A.M. and Alguacil, F.J., "The Solvent Extraction System Au (III)- HCl-Cyanex 471X", *Hydrometallurgy*, Vol. 43, pp. 1-12, 1996.
- Kargari, A., Kaghazchi, T., Sohrabi, M. and Soleimani, M., "Batch Extraction of Gold (III) Ions from Aqueous Solutions Using Emulsion Liquid Membrane via Facilitated Carrier Transport", *Journal of Membrane Science*, Vol. 233, pp. 1-10, 2004.
- Jung, B.H., Park, Y.Y., An, W.J., Kim, S.J., Tran, T. and Kim, J.M., "Processing of High Purity Gold from Scraps using Diethylene Glycol Di-N-butyl Ether", *Hydrometallurgy*, Vol. 95, pp. 262-266, 2009.
- Argiropoulos, G., Cattrall, R.W., Hamilton, I.C. and Paimin, R., "An Equilibrium Study of the Extraction of Gold from Halide Solutions using Aliquat 336", *Proceedings of International solvent extraction conference (ISEC96)*, Vol. 1, pp. 123-131, 1996.
- Alguacil, F.J. and Caravaca, C., "Study of Gold (III)-HCl-amine Alamine 304 Extraction Equilibrium System", *Hydrometallurgy*, Vol. 34, pp. 91-98, 1993.
- Sadeghi, N., Alamdari, E.K., Fatmesari, D.H., Darvishi, D., Alamdari, A.K. and Kafash, A.B., "Solvent Extraction of Gold from Chloride Solution by Tri-butyl Phosphate (TBP)", *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Mining Congress & Exhibition of Turkey*, pp. 1353-1358, 2013.
- Nunez, M.E. and San Miguel, E.R.D., "Solvent Extraction Separation of Au (III) with Octanol", *Proceedings of 19<sup>th</sup> Solvent Extraction Conference*, Chapter 2, pp. 1-6, 2011.