



بررسی پارامترهای مؤثر در استخراج یون‌های کبالت از محیط غیرآبی با استفاده از استخراج‌کننده آلایکوات ۳۳۶

فاطمه بدیهی^۱، مهدی اسدالله‌زاده^{۲*}، علی حقیقی اصل^۱، رضوان ترکمان^۲

۱. دانشکده مهندسی شیمی، نفت، گاز، دانشگاه سمنان، صندوق پستی: ۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱، سمنان - ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

*Email: masadollahzadeh@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۷ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۸/۷ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۸/۱۴

چکیده

در این پژوهش، استخراج یون‌های کبالت از محیط غیرآبی با استفاده از استخراج‌کننده آلایکوات ۳۳۶ انجام گردید. اثر پارامترهای مختلف بر فرایند استخراج غیرآبی شامل غلظت اتیلن گلیکول، غلظت استخراج‌کننده، غلظت هیدروکلریک اسید و غلظت یون‌های کبالت در محلول آبی با استفاده از روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مطلوبیت یک و درصد استخراج بیشینه کبالت، شرایط بهینه شامل درصد حجمی آلایکوات ۳۳۶ (۱۹٫۲ درصد)، غلظت کبالت (۸۹۹٫۴ ppm)، درصد حجمی اتیلن گلیکول (۶۵٫۳ درصد) و غلظت هیدروکلریک اسید (۷٫۸۱ مولار) حاصل گردیدند. اعتبار داده‌ها با حداقل خطا بین داده‌های پیش‌بینی شده (۹۴٫۸۲ درصد) و داده‌های آزمایشگاهی (۹۹٫۳۶ درصد) مشاهده گردید.

کلیدواژه‌ها: محیط غیرآبی، کبالت، استخراج‌کننده آلایکوات ۳۳۶، اتیلن گلیکول، هیدروکلریک اسید، طراحی آزمایش

Investigation of effective parameters in the extraction of cobalt ions from non-aqueous medium using Aliquat336 extractant

F. Badihi¹, M. Asadollahzadeh^{2*}, A. Hghighi-Asl¹, R. Torkaman²

1. Faculty of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Semnan University, P.O.Box: 35131-19111, Semnan – Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Research Article

Received: 28.5.2023, Revised: 29.10.2023, Accepted: 5.11.2023

Abstract

Using Aliquat336 extractant, cobalt ions were extracted from a non-aqueous medium. The effect of different parameters on the non-aqueous extraction process including ethylene glycol concentration, extractant concentration, hydrochloric acid concentration, and cobalt ions concentration in aqueous solution was investigated using the experimental design approach. According to the desirability of one and the maximum extraction efficiency of cobalt ions, the optimal conditions include volume percentage of Aliquat336 (19.2%), cobalt concentration (899.4 ppm), volume percentage of ethylene glycol (65.3%) and hydrochloric acid concentration (7.81 M) were obtained. The validity of the data was observed with minimal error between the predicted data (94.82%) and the experimental data (99.36%).

Keywords: Non-aqueous medium, Cobalt, Aliquat336 extractant, Ethylene glycol, Hydrochloric acid, Experimental design



۱. مقدمه

با گسترش علم و فناوری و با شناسایی عناصر مختلف و خواص مربوط به آن، آلیاژهای کاربردی مختلفی تولید شده‌اند که نیاز انسان را روز به روز برآورده می‌نمایند. یکی از آلیاژهای کاربردی در دنیای مدرن امروزی، کبالت است که به شکل فلزی سخت، براق و شکننده به رنگ سفید-نقره‌ای یافت می‌شود. کبالت خالص به عنوان یک عنصر آلیاژی و یک منبع شیمیایی به عنوان یک فلز استراتژیک و مهم به حساب می‌آید [۱]. استفاده‌های مهم عنصر کبالت به عنوان یک عنصر آلیاژی، در سوپرآلیاژهای مورد استفاده در موتورهای هواپیما، آلیاژهای مغناطیسی، آلیاژهای سخت مورد استفاده در وسایل برش، کاربردهای سمانته، پوشش مقاوم آلیاژها و پوشش‌های رسوب الکتریکی برای مقاومت خوردگی آلیاژها است [۲]. ترکیبات شیمیایی کبالت نیز به عنوان رنگ‌دانه‌ها در شیشه، سرامیک و قطعات صنعتی استفاده زیادی دارند. استفاده دیگر کبالت را به عنوان کاتالیز در صنایع نفتی و به عنوان فلز نشانه، در صنایع کشاورزی و پزشکی می‌توان نام برد [۱].

کبالت ۶۰ با گسیل دو پرتو گاما یکی از رادیوایزوتوپ‌های پرکاربرد در صنعت پزشکی، تحقیقات علمی و کشاورزی است و در صنعت، ^{60}Co به همراه ^{192}Ir از پرکاربردترین ایزوتوپ‌ها برای رادیوگرافی صنعتی است. این رادیوایزوتوپ در آزمون‌های مخرب بررسی اتصالات در لوله‌ها، سازه‌هایی که از جنس استیل می‌باشد، دیگ‌های بخار، ساخت کشتی و هواپیما استفاده می‌شود. در تحقیقات شیمی و بیولوژی نیز به عنوان یک ردیاب از ^{60}Co استفاده می‌کنند [۳]. هم‌چنین جهت استرلیزه کردن غذاها با روش تابشی (پاستوریزه کردن سرد) و از بین بردن عوامل بیماری‌زا و بالا بردن زمان نگهداری مواد غذایی و از بین بردن آفات در میوه‌ها و حبوبات، زودباروری و به تأخیر انداختن جوانه زدن زودرس در پیاز و سیب‌زمینی و بسیاری کاربردهای دیگر در کشاورزی از پرتو گامای ^{60}Co استفاده می‌گردد [۴]. در سطح‌سنج و ارتفاع‌سنج‌های رادیواکتیو، از کبالت ۶۰ به منظور بررسی خوردگی لوله‌ها با پرتونگاری و تعیین عیوب قطعه از لحاظ وجود شیارها، حفره‌ها و ترک‌های ناشی از خوردگی، خستگی و تنش استفاده می‌کنند. چگالی‌سنجی یکی از پارامترهای مهم در بسیاری از فرایندهای صنعتی است، کبالت ۶۰ یکی از بهترین چشمه‌های گاما است که در گیج‌های هسته‌ای چگالی استفاده می‌شود و برای پایش چگالی نفت در لوله‌های با قطر زیاد بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بسیار مناسب است [۵].

با توجه به کاهش منابع اولیه عناصر فلزی با ارزش، رویکرد به بازیابی آن‌ها از منابع ثانویه امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین صنایع مختلف در صدد هستند تا بتوانند شیوه‌هایی با راندمان بالا را جهت افزودن بهره‌وری اقتصادی خود در راستای استحصال این فلزات به کار گیرند. از منابع ثانویه کبالت می‌توان به برخی سرباره‌های متالورژیکی، کیک کبالت کارخانه‌های روی، باتری‌های لیتیومی و آهنرباهای مستعمل شده اشاره نمود [۶-۹]. روش‌های مختلفی در بحث استخراج و خالص‌سازی فلز کبالت از محلول حاصل از فروشویی مانند رسوب‌دهی، استخراج حلالی، روش‌های استخراج به کمک غشاء از جمله، غشاهای تثبیت شده بر روی پایه، غشاهای پلیمری، جاذب‌ها و جلبک‌های طبیعی به کار گرفته شده‌اند، که استفاده از روش‌های ذکر شده به نوع کانی، نوع محلول اسیدی و ناخالصی‌های موجود در آن وابسته می‌باشد [۱۰-۱۷]. از میان روش‌های ذکر شده، روش رسوب‌دهی علی‌رغم کاربرد در موارد صنعتی برای استخراج کبالت چندان مناسب نمی‌باشد، به جهت آن‌که در صورت حضور آلومینیم و یا فلزات مشابه در محلول، رسوب‌دهی هم‌زمان فلزات به همراه کبالت اتفاق می‌افتد. استخراج حلالی روشی مؤثر و کارآمد بوده که هم اکنون به طور گسترده برای استخراج و خالص‌سازی فلز کبالت استفاده می‌شود [۱۸]. اما مهم‌ترین مسأله، پساب‌های رقیق صنعتی تولید شده است که امکان بازیابی فلز از آن‌ها با هزینه‌های زیادی همراه است. از دیگر معایب روش استخراج حلالی می‌توان به مسأله جداسازی فازها، اتلاف حلال، تشکیل امولسیون، ایجاد طغیان اشاره کرد [۱۹].

فرایند متالورژی حلالی^۱ در استخراج فلزات از سنگ معدن، باقی‌مانده فرایند صنعتی و پسماندها با استفاده از محلول‌های غیرآبی تعریف می‌شود. این فرایند به طور کامل بدون آب انجام نمی‌شود، اما میزان مصرف آب در آن بسیار ناچیز است [۲۰]. عملیات واحد به شرح زیر است: فروشویی حلال؛ جداسازی ترکیبات مانده؛ خالص‌سازی محلول لیچ‌لیکور با استخراج حلال غیرآبی یا تبادل یونی غیرآبی؛ و بازیابی فلز با رسوب‌دهی یا الکترولیز در الکترولیت‌های غیرآبی؛ دانش این فرایند شبیه هیدرومتالورژی است، به این دلیل که هر دو شاخه متالورژی استخراجی از فرایندهای دمای پایین استفاده می‌کنند، هر دو شاخه از حلال‌های آلی یا معدنی استفاده می‌کنند (به استثنای آب در مورد متالورژی حلالی). با این حال، برای پایدار بودن فرایندهای متالورژی حلالی، حلال‌های سبز مورد نیاز هستند تا



فسفات‌ها برای جداسازی Nd(III) و Dy(III) با استخراج از محلول‌های اتیلن گلیکول هستند [۲۵].

باچو و همکاران در تحقیقی دیگر از استخراج حلالی غیرآبی برای جداسازی نئودیمیم استفاده نمودند. آن‌ها استخراج نئودیمیم را در غلظت‌های مختلف استخراج‌کننده مورد بررسی قرار دادند. با توجه به یافته‌های آن‌ها درصد استخراج از ۱۳ درصد به ۹۸ درصد با افزایش غلظت استخراج‌کننده از ۰/۱ مولار به ۰/۱ مولار افزایش یافت [۲۶].

ریزک^۲ و همکاران، استخراج حلالی غیرآبی گادولینیم از محیط اتیلن گلیکول را با استخراج‌کننده سیانکس ۵۷۲ مطالعه کردند. آن‌ها از فاز آلی کمتر قطبی (LP) محلولی از سیانکس ۵۷۲ به عنوان یک استخراج‌کننده اسیدی محلول در نفت سفید و از فاز آلی قطبی‌تر (MP) اتیلن گلیکول با مقدار محدودی آب محلول در نمک‌های فلز نیترات و لیتیم نیترات به عنوان عامل نمک‌زدایی استفاده کردند [۲۷].

در تحقیقی دیگر باچو و همکاران، جداسازی مخلوطی از عناصر نادر خاکی با استخراج حلالی غیرآبی با دو فاز آلی غیرقابل اختلاط را مورد بررسی قرار دادند. فاز آلی قطبی‌تر، اتیلن گلیکول با لیتیم کلرید محلول و فاز آلی کمتر قطبی، استخراج‌کننده رقیق شده در n-دودکان بود. در این مطالعه؛ حلالیت متقابل فازهای آلی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که دو فاز آلی برای استخراج با فلزات نادر خاکی استفاده می‌شوند، تعیین حلالیت متقابل آن‌ها مهم است. آزمایش‌های حلالیت متقابل با مخلوط کردن حجم‌های مساوی اتیلن گلیکول و سیانکس n-۹۲۳-دودکان به عنوان تابعی از غلظت لیتیم کلرید، غلظت خوراک و غلظت استخراج‌کننده انجام گردید [۲۸، ۲۹].

در مطالعات استخراج نئودیمیم و گادولینیم از محیط غیرآبی با استخراج‌کننده Cyanex ۵۷۲ مشاهده گردید که جداسازی و گزینش‌پذیری در این محیط بالاتر از محیط آبی است. در محیط نیترات با غلظت بالا، یون‌ها از تشکیل کمپلکس‌های کاتیونی در محیط آبی خورداری می‌کنند. آب اثر منفی در استخراج از محیط غیرآبی می‌گذارد و این اختلاف به دلیل حلالیت محلول‌های آبی و اتیلن گلیکول است. در محیط آبی یون‌ها سریعاً توسط مولکول‌های آب احاطه می‌گردند، اما در محیط غیرآبی می‌توانند یون‌های نیترات نیز مشارکت نمایند. بنابراین، جداسازی با گزینش‌پذیری بالا در محیط غیرآبی فراهم می‌گردد [۲۷].

از ورود حلال‌های سمی یا مضر به محیط زیست جلوگیری شود [۲۱]. اما این روش جدید مزایای متعددی را ارائه می‌دهد. اولاً، مصرف آب بسیار محدود است و بنابراین می‌توان از تولید پساب جلوگیری کرد. دوم، شستشو و استخراج حلال می‌تواند با هم ترکیب شوند و یک مرحله را تشکیل دهند و در نتیجه دیگرام‌های فرایندی ساده می‌شوند. سوم، شستشوی حلال اغلب انتخابی‌تر از شستشو با محلول‌های آبی اسیدی است، که منجر به کاهش مصرف اسید و مراحل تصفیه کم‌تر می‌شود. چهارم، در پالایش سنگ معدن‌های غنی از سیلیس محلول بسیار مفید هستند، زیرا هیچ ژل سیلیکا در فرایند تشکیل نمی‌شود. به طور خلاصه در موقعیتی است که می‌تواند به توسعه فرایندهای متالورژی با پسماند نزدیک به صفر و با مقادیر مصرف انرژی کمک کند [۲۲].

مطالعات بسیار محدودی در زمینه استخراج کبالت با روش متالورژی حلالی انجام شده است و در تحقیقات محدودی، فرایند استخراج از محیط غیرآبی به منظور استخراج سایر یون‌های فلزی گزارش شده است [۲۳].

جداسازی کبالت از آهنرباهای ساماریم-کبالت مستعمل شده با تکنیک استخراج غیرآبی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که در حضور استخراج‌کننده‌های آلکوکات ۳۳۶ و سیانکس ۲۷۲، می‌توان به یک دیگرام مطلوب جهت جداسازی عناصر با خلوص کبالت ۹۸/۳٪ و ساماریم ۹۹/۴٪ دست یافت [۲۴].

باچو^۱ و همکاران استخراج حلالی غیرآبی عناصر نادر خاکی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مجموعه‌ای از استخراج‌کننده‌های آلی فسفره خنثی، شامل اکسیدهای فسفین، فسفینات‌ها، فسفونات‌ها و فسفات‌ها با زنجیره‌های آلکیل خطی و شاخه‌دار را مورد ارزیابی قرار دادند. مشاهده گردید که: (۱) بالاترین بازده استخراج عناصر نادر خاکی به ترتیب با استخراج‌کننده‌ها، اکسید فسفین < فسفینات < فسفونات < فسفات است؛ (۲) نوع استخراج‌کننده‌ها با زنجیره‌های آلکیل طولانی‌تر، راندمان استخراج فلزات بالاتری را نشان می‌دهند و زنجیره‌های شاخه‌دار مانع از استخراج می‌شوند؛ (۳) استخراج از محلول‌های اتیلن گلیکول فاکتورهای جداسازی بالاتری را برای همه انواع استخراج‌کننده‌های ارگانوفسفره خنثی نسبت به محلول‌های آبی ایجاد می‌کند؛ (۴) فسفینات‌ها و فسفونات‌ها استخراج‌کننده‌های بهتری نسبت به اکسیدهای فسفین و



استخراج شده یا راندمان استخراج (%E) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\%E = \frac{C_{LP}}{C_{Tot}} \times 100 \quad (1)$$

که در معادله بالا $(C)_{Tot}$ غلظت کلی یون‌ها در محلول و $(C)_{LP}$ غلظت فلز در فاز آلی کمتر قطبی است.

برای انجام آزمایش‌ها از روش طراحی آزمایش استفاده گردید که پارامترهای مختلف جهت آزمایش با استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶ در جدول ۱ نشان داده شده است. تمام آزمایش‌ها در دمای محیط با نسبت فازی یک به یک و حضور لیتیم کلرید با غلظت یک مولار انجام گردید. غلظت یون‌های کبالت در فاز اتیلن گلیکول با استفاده از روش اسپکتروفتومتری UV-Vis (مدل DR-۶۰۰۰؛ شرکت هک) و براساس دستورالعمل ارائه شده توسط مارکنکو^۱ اندازه‌گیری گردید [۳۲]. طی آزمایش‌های انجام شده با دستگاه مشاهده گردید که نتایج آنالیز در محیط اتیلن گلیکول مشابه آنالیز در محیط آبی است و با مطالعات صورت گرفته در مرجع [۳۳] مطابقت دارد.

۳. نتایج و بحث

جدول ۲، طراحی آزمایش پارامترهای مختلف را به همراه داده‌های تجربی نشان می‌دهد. بیش‌ترین درصد استخراج کبالت (۹۴/۶۴ درصد) با غلظت ۹۰۰ ppm، اتیلن گلیکول ۶۰ درصد، ۲۰ درصد حجمی غلظت آلکوات ۳۳۶ و هیدروکلریک اسید با غلظت ۸ مولار حاصل گردید، در حالی که کم‌ترین درصد استخراج (۱۳/۰۴ درصد) در ۱۵ درصد حجمی آلکوات ۳۳۶، غلظت کبالت ۸۰۰، اتیلن گلیکول ۷۰٪ و غلظت هیدروکلریک اسید ۲ مولار مشاهده گردید.

جدول ۱، پارامترها و سطوح بالا و پایین انتخاب شده برای طراحی آزمایش با استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶

متغیر	نماد	-α	-۱	۰	+۱	+α
غلظت آلکوات ۳۳۶ (%v/v)	A	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
غلظت هیدروکلریک اسید (M)	B	۲	۴	۶	۸	۱۰
غلظت اتیلن گلیکول (%v/v)	C	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰
غلظت کبالت در محلول آبی (ppm)	D	۶۰۰	۷۰۰	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۰۰

لیتیم کلرید به دلیل ثابت دی‌الکتریک پایین اتیلن گلیکول و حلالیت کم‌تر در اتیلن گلیکول، اثر نمک‌زدایی بسیار کم‌تری برای یون‌های ساماریم در اتیلن گلیکول نسبت به آب دارد. در نتیجه، ساماریم در فاز اتیلن گلیکول نمک زده نمی‌شود، که منجر به جداسازی بسیار مؤثر کبالت و ساماریم می‌شود. این اثر جداسازی را می‌توان برای جداسازی دیگر جفت‌های فلزات واسطه و فلزات خاکی کمیاب، از جمله آهن/نئودیمیم و روی/اروپیم نیز اعمال کرد [۳۰].

نتایج تحقیقات گزارش شده در جداسازی عناصر اروپیم و ایتیریم نشان می‌دهد که روش استخراج غیرآبی یک تکنیک ویژه جهت رسیدن به فاکتور جداسازی بالای دو فلز در مقایسه با روش استخراج حلالی است [۳۱].

در این پژوهش، با هدف دستیابی به پارامترهای اثرگذار در استخراج یون‌های کبالت از محیط غیرآبی، روش سطح پاسخ بر مبنای طرح مرکب مرکزی مورد استفاده قرار گرفت و اثر هم‌زمان پارامترها شامل غلظت استخراج‌کننده، غلظت یون‌های کبالت، اسیدیته محلول آبی و درصد حجمی اتیلن گلیکول مورد ارزیابی قرار گرفتند که به دلیل عدم اطلاعات در پژوهش‌های انجام شده در تحقیقات دیگران، از نوآوری‌های کار انجام شده است.

۲. روش انجام آزمایش‌ها

۱.۲ مواد

در این پژوهش از کبالت کلرید ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Merck) به عنوان منبع تأمین یون‌های فلزی محلول آبی استفاده گردید. نمک لیتیم کلرید ۹۹٪ و اتیلن گلیکول ۹۹٪ نیز به منظور تهیه محلول آلی تهیه شده از شرکت Merck مورد استفاده قرار گرفتند. جهت استخراج یون‌ها از فاز آلی حاوی استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶ (۹۹٪، Aliquat ۳۳۶، Merck) در حلال تولوئن استفاده گردید.

۲.۲ روش استخراج با محلول غیرآبی

برای آزمایش‌های استخراج با حلال غیرآبی، حجم‌های مساوی از فاز آلی کم‌تر قطبی (استخراج‌کننده در تولوئن) و فاز آلی قطبی‌تر (یون‌های فلزی در اتیلن گلیکول + لیتیم کلرید) در لوله‌های آزمایش ۱۵ میلی‌لیتری ترکیب می‌شوند. مخلوط به مدت ۱۰ دقیقه هم‌زده شد و به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید تا فازها جدا شوند. تمامی نمونه‌ها دو بار اندازه‌گیری گردیدند. کسر یون‌های فلزی



جدول ۲. شرایط ۳۰ آزمایش طراحی شده با استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶ و نتایج حاصل شده

رتبه واکنش	آلکوات ۳۳۶ (%) (v/v)	غلظت اسید (M)	اتیلن گلیکول (%) (v/v)	غلظت کبالت (ppm)	%E تجربی	%E پیش‌بینی شده
۱	۱۵	۶	۷۰	۶۰۰	۵۱٫۲۱	۵۲٫۵۳
۲	۱۰	۸	۶۰	۹۰۰	۹۱٫۹۳	۸۷٫۶۱
۳	۱۰	۴	۸۰	۹۰۰	۲۵٫۹۲	۲۶٫۶۰
۴	۱۵	۶	۷۰	۱۰۰۰	۷۳٫۹۲	۶۴٫۸۳
۵	۲۰	۸	۶۰	۷۰۰	۹۲٫۶۴	۹۰٫۵۸
۶	۱۵	۶	۷۰	۸۰۰	۷۱٫۴۶	۷۲٫۶۸
۷	۱۵	۶	۷۰	۸۰۰	۷۳٫۳۷	۷۲٫۶۸
۸	۱۵	۶	۵۰	۸۰۰	۷۹٫۶۴	۷۰٫۶۶
۹	۵	۶	۷۰	۸۰۰	۵۶٫۳۹	۵۸٫۳۱
۱۰	۱۵	۶	۷۰	۸۰۰	۷۱٫۱۵	۷۲٫۶۸
۱۱	۱۵	۶	۷۰	۸۰۰	۷۳٫۶۹	۷۲٫۶۸
۱۲	۱۰	۴	۶۰	۷۰۰	۳۳٫۷۹	۳۲٫۵۱
۱۳	۲۵	۶	۷۰	۸۰۰	۸۳٫۲۸	۷۳٫۷۹
۱۴	۱۰	۴	۶۰	۹۰۰	۴۱٫۵۴	۴۳٫۸۲
۱۵	۱۰	۸	۸۰	۷۰۰	۷۰٫۴۶	۶۶٫۱۵
۱۶	۲۰	۸	۸۰	۷۰۰	۷۸٫۱۸	۷۳٫۹۹
۱۷	۲۰	۴	۶۰	۹۰۰	۴۸٫۵۱	۵۱٫۴۶
۱۸	۱۰	۴	۸۰	۷۰۰	۲۷٫۹۸	۲۲٫۲۱
۱۹	۱۰	۸	۶۰	۷۰۰	۸۷٫۴۰	۸۷٫۱۰
۲۰	۲۰	۴	۸۰	۹۰۰	۴۰٫۲۳	۳۸٫۶۰
۲۱	۱۵	۶	۷۰	۸۰۰	۷۲٫۲۶	۷۲٫۶۸
۲۲	۱۵	۲	۷۰	۸۰۰	۱۳٫۰۴	۴٫۳۸
۲۳	۱۵	۶	۹۰	۸۰۰	۳۵٫۴۶	۳۶٫۸۶
۲۴	۲۰	۸	۸۰	۹۰۰	۷۵٫۰۷	۷۴٫۹۹
۲۵	۲۰	۴	۸۰	۷۰۰	۲۳٫۸۴	۲۶٫۸۰
۲۶	۲۰	۸	۶۰	۹۰۰	۹۴٫۶۴	۹۸٫۵۰
۲۷	۱۰	۸	۸۰	۹۰۰	۶۴٫۷۰	۵۹٫۷۴
۲۸	۲۰	۴	۶۰	۷۰۰	۲۹٫۷۰	۳۲٫۷۴
۲۹	۱۵	۱۰	۷۰	۸۰۰	۹۴٫۲۵	۹۵٫۳۵
۳۰	۱۵	۶	۷۰	۸۰۰	۷۲٫۹۰	۷۲٫۶۸

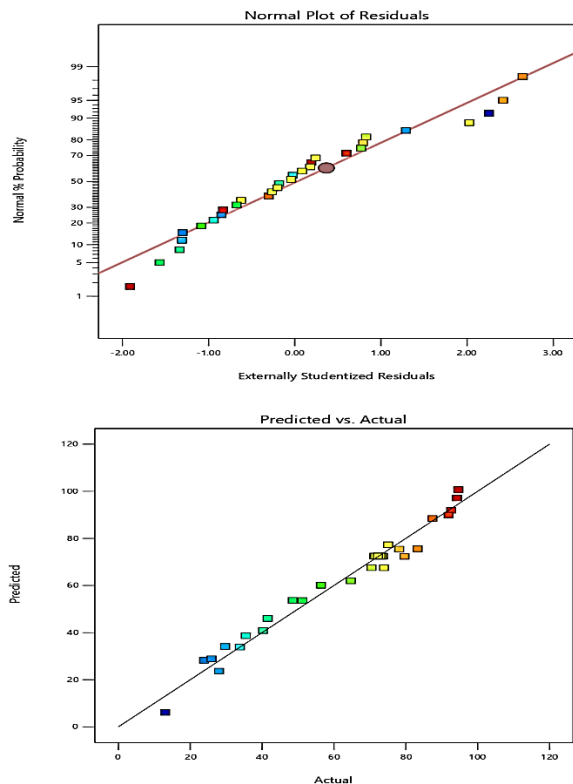
در معادله بالا، A ، B ، C و D به ترتیب متناظر با درصد حجمی استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶، غلظت هیدروکلریک اسید، درصد حجمی اتیلن گلیکول و غلظت یون‌های کبالت می‌باشند.

خلاصه تحلیل برازش مدل (تحلیل واریانس) در استخراج کبالت در جدول ۳ نشان داده شده است. مدل بر اساس بالاترین مقدار F (۵۵٫۰۰) و بالاترین مقدار همبستگی (R^2 ۰٫۹۸۰۹) انتخاب گردید. P -value یک مقدار آماری برای آزمون سطح معناداری مدل است. برای استخراج Co(II) ، مقادیر P برای آزمون عدم تطابق کمتر از ۰٫۰۰۰۱ بود که نشان می‌دهد، مدل درجه دوم بهترین مدل را در پیش‌بینی داده‌ها دارد. مقدار F

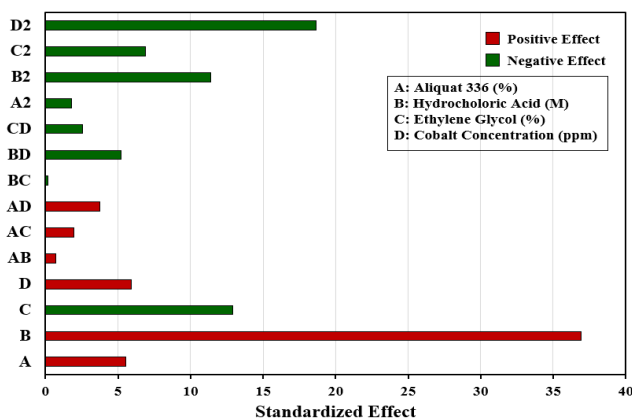
مدل درجه دوم به عنوان بهترین مدل (R^2 ۰٫۹۸۰۹)، $\text{Adjusted } R^2$ ۰٫۹۶۳۱) انتخاب گردید تا با تمام داده‌های تجربی جمع‌آوری شده برای استخراج یون‌های کبالت مطابقت داشته باشد. برای ایجاد پیوند بین متغیرهای مستقل و درصد استخراج (پاسخ)، می‌توان از رویکرد سطح پاسخ استفاده کرد. مدل درصد استخراج حاصل به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \%E = & ۸٫۱۵ + ۰٫۲۳۸۳ \times A + ۱٫۵۹ \times B - ۰٫۵۵۶۳ \times C + ۰٫۲۵۴۴ \times D \\ & + ۰٫۰۳۰۲ \times A \times B + ۰٫۰۸۳۸ \times A \times C + ۰٫۱۶۱۱ \times A \times D - ۰٫۰۸۰۰ \times B \times C \\ & - ۰٫۲۲۴۷ \times B \times D - ۰٫۱۰۹۸ \times C \times D - ۰٫۰۷۶۵ \times A^2 - ۰٫۴۹۱۰ \times B^2 \\ & - ۰٫۲۹۶۱ \times C^2 - ۰٫۱۸۶۷ \times D^2 \end{aligned} \quad (2)$$





شکل ۱. نمودار نرمال و نمودار پیش‌بینی با انحراف از داده‌های واقعی در طراحی آزمایش با استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶.



شکل ۲. نمودار پارتو و سهم پارامترها در استخراج یون‌های کبالت از محیط غیرآبی.

۱.۳ ارزیابی نمودارهای سه بعدی

غلظت استخراج‌کننده در محدوده ۵ تا ۲۵ درصد مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۳ آورده شده است، مقادیر بیش‌تر هر دو پارامتر (غلظت استخراج‌کننده و هیدروکلریک اسید) منجر به شرایط مناسب برای استخراج یون کبالت می‌شود.

عدم تناسب ۴۲/۵۴ به معنی عدم تناسب نسبت به خطای خالص است، ۰/۰۳ درصد احتمال دارد که یک مقدار F به این بزرگی عدم تناسب به دلیل نویز رخ دهد.

در شکل ۱، توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها با استفاده از نمودار نرمال نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که نقاط شکل خاصی ندارند و در اطراف خط ۴۵ درجه قرار دارند و این نمودار مدل را تأیید می‌کند. همچنین مقادیر به‌دست آمده از مدل با داده‌های واقعی مقایسه می‌شود. نتایج تقریباً در امتداد خط ۴۵ درجه قرار دارند و این بدان معنی است که مقادیر پیش‌بینی شده بسیار نزدیک به مقادیر تجربی هستند و اعتبار مدل با این نمودار تأیید می‌شود.

نمودار پارتو^۱ در شکل ۲ سهم پارامترها در استخراج کبالت از محیط غیرآبی را با استفاده از جدول ۳ و معادله به‌دست آمده نشان می‌دهد. مطابق با این نمودار مشاهده می‌گردد که هیدروکلریک اسید بیش‌ترین سهم را در استخراج یون‌های کبالت ایجاد می‌کند. زیرا یون کلرید در محلول موجب افزایش گونه‌های غالب CoCl_4^{2-} می‌گردد و در تشکیل کمپلکس و انتقال آن به فاز آلکوات ۳۳۶ اثرگذار است.

جدول ۳. داده‌های آنالیز واریانس (ANOVA) در طراحی آزمایش با استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار متوسط	ارزش F	ارزش P
مدل	۸۰/۹۲	۱۴	۵/۷۸	۵۵/۰۰	< ۰/۰۰۰۱
A	۱/۳۶	۱	۱/۳۶	۱۲/۹۷	۰/۰۰۲۶
B	۶۰/۶۴	۱	۶۰/۶۴	۵۷۷/۰۲	< ۰/۰۰۰۱
C	۷/۴۳	۱	۷/۴۳	۷۰/۶۸	< ۰/۰۰۰۱
D	۱/۵۵	۱	۱/۵۵	۱۴/۷۹	۰/۰۰۱۶
AB	۰/۱۴۶	۱	۰/۱۴۶	۰/۱۳۹۲	۰/۷۱۴۳
AC	۰/۱۱۲۲	۱	۰/۱۱۲۲	۱/۰۷	۰/۳۱۷۸
AD	۰/۴۱۵۵	۱	۰/۴۱۵۵	۳/۹۵	۰/۰۶۵۳
BC	۰/۱۰۲۳	۱	۰/۱۰۲۳	۰/۹۷۳۷	۰/۳۳۹۴
BD	۰/۸۰۷۵	۱	۰/۸۰۷۵	۷/۶۸	۰/۰۱۴۲
CD	۰/۱۹۲۸	۱	۰/۱۹۲۸	۱/۸۳	۰/۱۹۵۶
A ^۲	۰/۱۶۰۷	۱	۰/۱۶۰۷	۱/۵۳	۰/۲۳۵۲
B ^۲	۶/۶۱	۱	۶/۶۱	۶۲/۹۱	< ۰/۰۰۰۱
C ^۲	۲/۴۰	۱	۲/۴۰	۲۲/۸۸	۰/۰۰۰۲
D ^۲	۰/۹۵۶۲	۱	۰/۹۵۶۲	۹/۱۰	۰/۰۰۸۷
باقی‌مانده	۱/۵۸	۱۵	۰/۱۰۵۱		
عدم برازش	۱/۵۶	۱۰	۰/۱۵۵۸	۴۲/۵۴	۰/۰۰۰۳
خطای محض	۰/۰۱۸۳	۵	۰/۰۰۳۷		
خطای خالص	۸۲/۵۰	۲۹			

۱. Pareto Chart



جدول ۴. ثابت‌های تشکیل کمپلکس یون‌های کبالت با یون‌های کلرید در محیط آبی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد [۳۴]

log K	واکنش
۰٫۲۲	$Co^{2+} + Cl^- = CoCl^+$
-۳٫۹۵	$Co^{2+} + 2Cl^- = CoCl_2$
-۳٫۰۲	$Co^{2+} + 3Cl^- = CoCl_3^-$
-۹٫۰۶	$Co^{2+} + 4Cl^- = CoCl_4^{2-}$

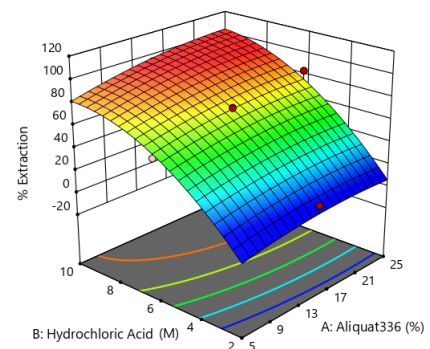
اتیلن گلیکول در محدوده ۵۰ تا ۹۰٪ در سیستم آبی بررسی گردید. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، افزایش غلظت آلیکوات ۳۳۶ و کاهش درصد اتیلن گلیکول کارایی استخراج را بهبود می‌بخشد. درصد بهینه اتیلن گلیکول برابر با ۶۵/۳ درصد حاصل گردید. روند کاهشی با افزایش غلظت اتیلن گلیکول با حلالیت یون‌های فلزی در محیط غیرآبی توصیف می‌گردد. فعالیت یون در یک محیط غیرآبی کاهش می‌یابد و بازده استخراج پایین‌تر در انتقال یون‌ها به فاز آلی با قطبیت کم‌تر مشاهده می‌گردد [۲۸].

اثر غلظت کبالت در محدوده ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ ppm در محلول آبی مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، افزایش هر دو پارامتر تا حدودی (غلظت کبالت و درصد حجمی آلیکوات ۳۳۶) به دلیل تمایل بیش‌تر برای تشکیل کمپلکس در فاز تولوئن مطابق با معادله (۳)، کارایی استخراج را بهبود می‌بخشد. غلظت بهینه یون کبالت برابر با ۸۹۹/۴ ppm حاصل گردید.

اثر غلظت هیدروکلریک اسید در محدوده ۲ تا ۱۰ مولار مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، افزایش غلظت کبالت و افزایش درصد هیدروکلریک اسید باعث بهبود راندمان استخراج یون کبالت می‌شود.

اثر غلظت کبالت در محدوده ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ و درصد اتیلن گلیکول در محدوده ۵۰ تا ۹۰ در شکل ۷ نشان داده شده است. روند تغییرات کم‌تری با افزایش پارامترها مشاهده می‌شود. اثر درصد اتیلن گلیکول و درصد هیدروکلریک اسید همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌کنید، مورد آزمایش قرار گرفت. افزایش درصد هیدروکلریک اسید و کاهش درصد اتیلن گلیکول باعث بهبود راندمان استخراج یون کبالت می‌شود.

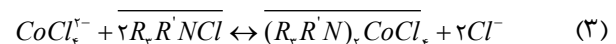
% Extraction
Design Points:
● Above Surface
○ Below Surface
13.043 94.64
X1 = A
X2 = B
Actual Factors
C = 70
D = 800



شکل ۳. نمودار سه بعدی برای استخراج کبالت در سیستم غیرآبی با بررسی درصد حجمی آلیکوات ۳۳۶ و غلظت هیدروکلریک اسید.

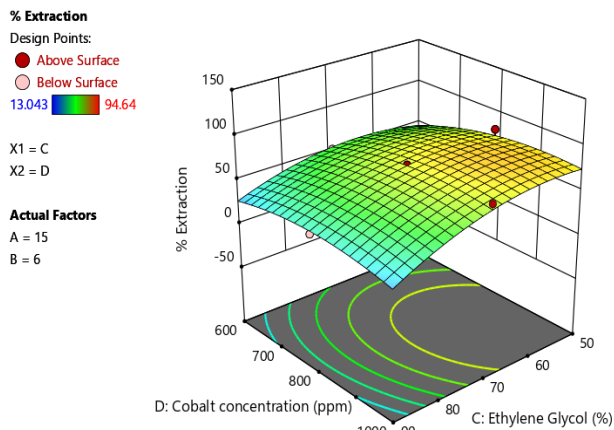
ثابت‌های تشکیل کمپلکس کبالت با یون‌های کلرید در محیط آبی و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در جدول ۴ آورده شده است. به رغم ثابت‌های تشکیل کوچک بین یون‌های کلرید و کبالت در محیط آبی (جدول ۴)، با این وجود به دلیل ثابت دی‌الکتریک کوچک‌تر فاز قطبی‌تر نسبت به آب به علت حضور اتیلن گلیکول در آن، پیش‌بینی می‌شود کمپلکس‌های پی‌درپی بین یون‌های کبالت و کلرید از ثابت‌های تشکیل بزرگ‌تری برخوردار باشند. البته وجود میزان بالای یون کلرید در محیط به واسطه حضور هیدروکلریک اسید در غلظت بالا و نیز تشکیل زوج یون $(R_4R'_N)_2CoCl_4$ در فاز کم‌تر قطبی، تعادل‌ها بین یون‌های کبالت و کلرید را در محیط فاز قطبی‌تر هرچه بیش‌تر در جهت تشکیل کمپلکس $CoCl_4^{2-}$ هدایت خواهد نمود.

در یک محلول آبی با غلظت بالای هیدروکلریک اسید، یون‌های کبالت دو ظرفیتی تمایل دارند که ساختارهای هشت وجهی مانند $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ را به ساختارهای چهاروجهی مانند $CoCl_4^{2-}$ یا $CoCl_3^-$ تبدیل کنند [۳۵، ۳۶]. در محلول اتیلن گلیکول، تمایل به تبدیل ساختارهای $[Co(H_2O)_6]^{2+}$ به $CoCl_4^{2-}$ بیش‌تر است و به کاهش فعالیت آب به دلیل اختلاف در ثابت دی‌الکتریک اتیلن گلیکول (۴۱/۰) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(1 \times 10^5 \text{ Hz})$ و آب (۷۸/۲) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، $(1 \times 10^5 \text{ Hz})$ نسبت داده می‌شود [۳۷]. بنابراین واکنش استخراج کبالت در محلول غیرآبی مطابق با واکنش زیر است [۳۸]:

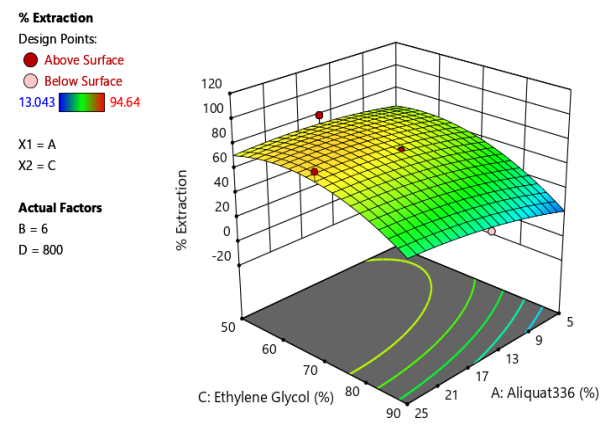


بنابراین مطابق با واکنش بالا، افزایش غلظت آلیکوات ۳۳۶ با تمایل واکنش به سمت راست و تشکیل کمپلکس و استخراج بیش‌تر همراه است. بنابراین، افزایش غلظت هر دو پارامتر موجب افزایش راندمان استخراج کبالت از محیط غیرآبی می‌گردد.

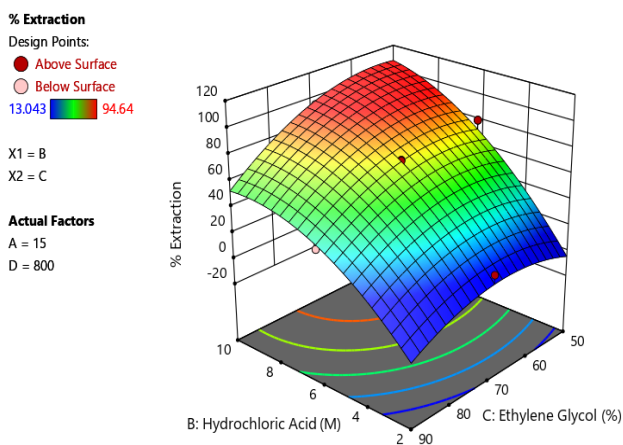




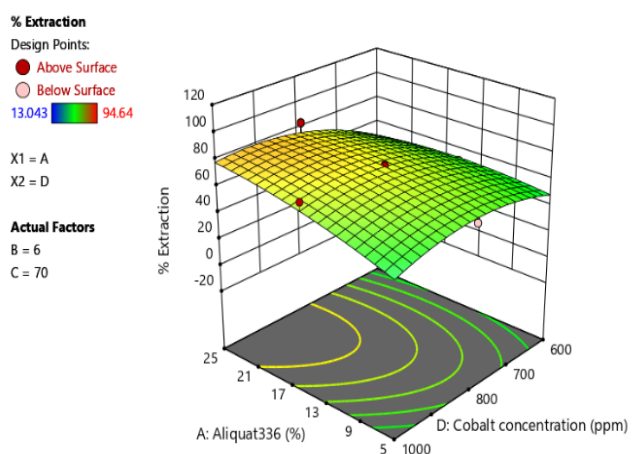
شکل ۷. نمودار سه بعدی برای استخراج کبالت در سیستم غیرآبی با بررسی درصد حجمی اتیلن گلیکول و غلظت یون‌های کبالت.



شکل ۴. نمودار سه بعدی برای استخراج کبالت در سیستم غیرآبی با بررسی درصد حجمی آلایکوات ۳۳۶ و درصد حجمی اتیلن گلیکول.



شکل ۸. نمودار سه بعدی برای استخراج کبالت در سیستم غیرآبی با بررسی غلظت هیدروکلریک اسید و درصد حجمی اتیلن گلیکول.



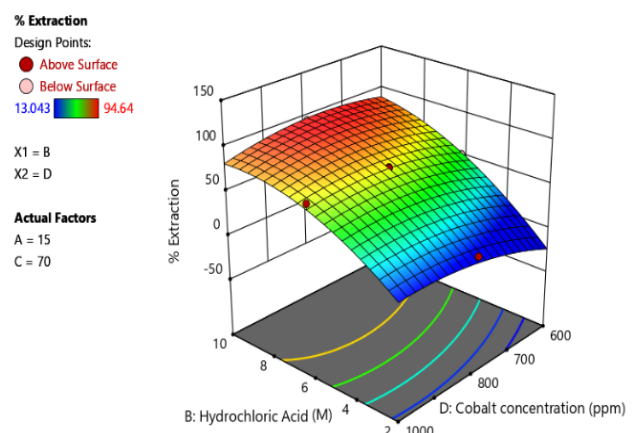
شکل ۵. نمودار سه بعدی برای استخراج کبالت در سیستم غیرآبی با بررسی درصد حجمی آلایکوات ۳۳۶ و غلظت یون‌های کبالت.

۲.۳ تعیین شرایط بهینه

با توجه به مطلوبیت یک و درصد استخراج ماکزیمم، شرایط بهینه درصد حجمی آلایکوات ۳۳۶ (۱۹/۲ درصد)، غلظت کبالت (۸۹۹/۴ ppm)، درصد حجمی اتیلن گلیکول (۶۵/۳ درصد) و غلظت هیدروکلریک اسید (۷/۸۱ مولار) تعیین گردید. اعتبار داده‌ها با حداقل خطا بین داده‌های پیش‌بینی شده (۹۴/۸۲ درصد) و داده‌های واقعی (۹۹/۳۶ درصد) مشاهده گردید.

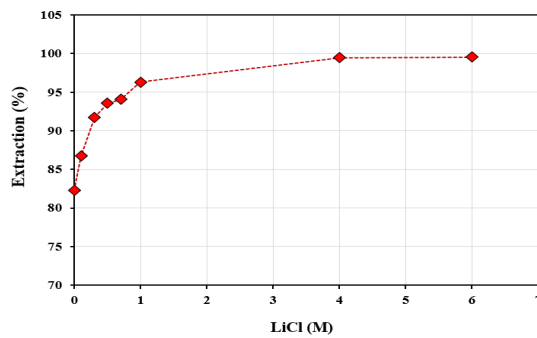
۳.۳ اثر دما در سیستم استخراج کبالت از محیط غیرآبی در شرایط بهینه

اثر دماهای مختلف (۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سانتی‌گراد) بر استخراج کبالت با استفاده از آلایکوات ۳۳۶ در تولون در شرایط بهینه در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش دما در بازه انتخابی اثر قابل توجهی بر استخراج یون کبالت در سیستم غیرآبی ندارد. بنابراین، استخراج کبالت در این سیستم وابسته به دما نمی‌باشد. در مطالعات انجام

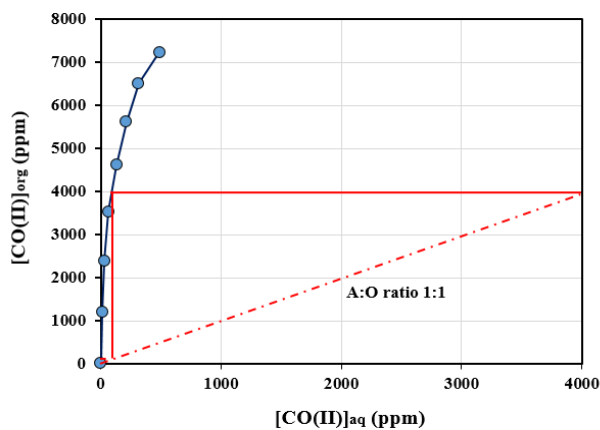


شکل ۶. نمودار سه بعدی برای استخراج کبالت در سیستم غیرآبی با بررسی غلظت هیدروکلریک اسید و غلظت یون‌های کبالت.





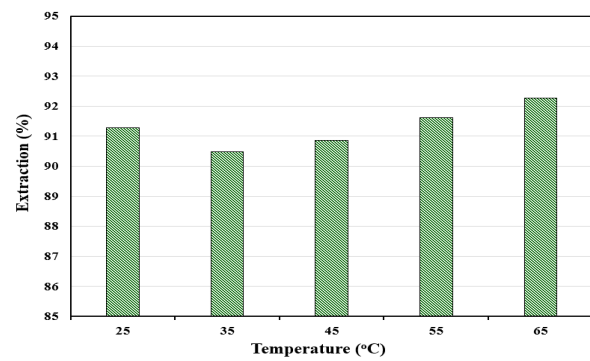
شکل ۱۰. اثر لیتیم کلرید در استخراج کبالت از محیط غیرآبی در شرایط بهینه با استخراج‌کننده آلیکوات ۳۳۶.



شکل ۱۱. ایزوترم تعادلی استخراج کبالت و نمودار مک‌کیب تحت شرایط بهینه.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم استخراج غیرآبی به منظور استخراج یون‌های کبالت در حضور دو فاز آلی یکی حاوی اتیلن گلیکول و نمک لیتیم کلرید و دیگری حاوی استخراج‌کننده آلیکوات ۳۳۶ در حلال تولوئن بررسی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که درصد استخراج از یک محیط آبی به یک محیط غیرآبی تا رسیدن به ۶۵/۳ درصد حجمی اتیلن گلیکول افزایش می‌یابد، اما بعد از این مقدار روند کاهشی در میزان استخراج یون‌های کبالت حاصل می‌گردد. شرایط بهینه استخراج با بررسی مطلوبیت یک و ماکزیمم درصد استخراج کبالت تعیین گردید و یک معادله چندجمله‌ای با اعتبارسنجی مطلوب برای پیش‌بینی داده‌ها حاصل گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در یک سیستم غیرآبی امکان استخراج یون‌های کبالت به دلیل اثرات اتیلن گلیکول و نمک‌زدایی لیتیم کلرید امکان‌پذیر است و می‌تواند به عنوان یک سیستم انتخابی در فرایندهای استخراج با هدف کاهش آب فرایندی جهت استخراج و جداسازی یون‌های فلزی مورد استفاده قرار بگیرد.



شکل ۹. اثر دما در سیستم استخراج کبالت از محیط غیرآبی در شرایط بهینه با استخراج‌کننده آلیکوات ۳۳۶.

شده توسط هفنی^۱ و همکاران، اثرات دما در بازده استخراج یون‌های گادولینیم و نفودیمیم از سیستم غیرآبی با استخراج‌کننده Cyanex۵۷۲ مشاهده نگردید [۲۷].

۴.۳ اثر غلظت لیتیم کلرید در سیستم استخراج کبالت از محیط غیرآبی در شرایط بهینه

در فرایند استخراج غیرآبی، معمولاً یک واکنش‌گر نمک‌زدا استفاده می‌گردد. این نمک‌های الکترولیتی حاوی آنیونی از اجزای استخراج‌کننده و کاتیون غیرقابل استخراج هستند. شدن آن‌ها در سیستم غیرآبی به دلیل افزایش امتزاج‌ناپذیری دو فاز، موجب بهبود فاز جداسازی و افزایش ضریب توزیع می‌شوند. اضافه کردن لیتیم کلرید به دو فاز اتیلن گلیکول و تولوئن موجب کاهش امتزاج‌پذیری دو فاز می‌گردد. غلظت ۴ مولار به عنوان غلظت اشباع لیتیم کلرید در اتیلن گلیکول گزارش شده است [۲۱]. اثر تغییر غلظت یون‌های کلرید در محلول اتیلن گلیکول از ۰ تا ۶ مولار در شرایط بهینه در شکل ۱۰ نشان داده شده است که مقادیر بیش‌تر لیتیم کلرید منجر به افزایش درصد استخراج یون کبالت در سیستم غیرآبی می‌گردد. افزایش غلظت LiCl موجب افزایش جفت یون‌های کبالت-کلرید می‌گردد و موجب کاهش فعالیت آب و اتیلن گلیکول می‌گردد.

۵.۳ نسبت فازها و نمودار مک‌کیب

محاسبه مراحل مورد نیاز برای استخراج پیوسته با استفاده از نمودار مک‌کیب امکان‌پذیر می‌باشد. این نمودار برای تعیین تعداد مراحل تئوری مورد نیاز جهت استخراج یون‌های کبالت از محیط غیرآبی با نسبت فاز انتخابی در شرایط پیوسته با میکسر-ستلر استفاده می‌گردد. نمودار مک‌کیب برای استخراج کبالت با استفاده از نسبت‌های فاز بین ۱:۴ تا ۴:۱ از A/O در شکل ۱۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که یک مرحله تماس ناهمسو در نسبت فاز A/O ۱:۱ برای رسیدن به حداکثر بازده و استخراج یون‌های کبالت مورد نیاز است.



مراجع

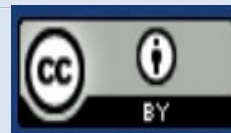
1. Rumbu R. Extractive Metallurgy of Cobalt. CreateSpace Independent Publishing Platform. [New York](#). 2018.
2. Crundwell F.K, Preez N.B.d, Knights B.D.H. Production of cobalt from copper-cobalt ores on the African Copperbelt—An overview. [Minerals Engineering](#). 2020;156:106450.
3. Crundwell F, Moats M, Ramachandran V, Robinson T, Davenport W.G. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. [Elsevier, New York](#). 2011.
4. Wang S. Cobalt—Its recovery, recycling, and application. [Jom](#). 2006;58:47-50.
5. Zhijian C, Yunjiang S, Chunchua Z, Maoling L. Recent status on cobalt-60 gamma ray radiation sources production and its application in China. [Radiation Physics and Chemistry](#). 1993;42:469-471.
6. Mohanty A, Devi N. A Review on Green Method of Extraction and Recovery of Energy Critical Element Cobalt from Spent Lithium-Ion Batteries (LIBs). [Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review](#). 2023;44:52-63.
7. Chandra M, Yu D, Tian Q, Guo X. Recovery of Cobalt from Secondary Resources: A Comprehensive Review. [Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review](#). 2022;43:679-700.
8. Alvial-Hein G, Mahandra H, Ghahreman A. Separation and recovery of cobalt and nickel from end of life products via solvent extraction technique: A review. [Journal of Cleaner Production](#). 2021;297:126592.
9. Huang Y, Zhang Z, Cao Y, Han G, Peng W, Zhu X, Zhang T.-a, Dou Z. Overview of cobalt resources and comprehensive analysis of cobalt recovery from zinc plant purification residue- a review. [Hydrometallurgy](#). 2020;193:105327.
10. Amjad R.S, Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M. An efficiency strategy for cobalt recovery from simulated wastewater by biphasic system with polyethylene glycol and ammonium sulfate. [Scientific Reports](#). 2022;12:17302.
11. Amjad R.S, Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M. Optimizing the extraction of cobalt ions under response surface methodology and without organic solutions. [Canadian Journal of Chemical Engineering](#). 2023;101:3532-3540.
12. Asadollahzadeh M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Saremi M. Experimental and modeling investigation of cobalt ion extraction in multistage extractor: Efficient evaluation of mass transfer coefficients using forward mixing approach. [International Communications in Heat and Mass Transfer](#). 2021;125:105359.
13. Maleki F, Gholami M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Asadollahzadeh M. Multivariate optimization of removing of cobalt(II) with an efficient aminated-GMA polypropylene adsorbent by induced-grafted polymerization under simultaneous gamma-ray irradiation. [Scientific Reports](#). 2021;11:18317.
14. Maleki F, Gholami M, Torkaman R, Torab-Mostaedi M, Asadollahzadeh M. Cobalt(II) removal from aqueous solution by modified polymeric adsorbents prepared with induced-graft polymerization: Batch and continuous column study with analysis of breakthrough behaviors. [Environmental Technology & Innovation](#). 2021;24:102054.
15. Torkaman R, Asadollahzadeh M. Study and Investigation of Process Parameters for Solvent Extraction of Cobalt from Chloride Solution by Using Mixture of Complexing Agents Cyanex272, TBP, TOPO. [Journal of Iranian Chemical Engineering](#). 2020;19:30-42.
16. Torkaman R, Asadollahzadeh M, Torab-Mostaedi M, Maragheh M.G. Reactive extraction of cobalt sulfate solution with D2EHPA/TBP extractants in the pilot plant Oldshue–Rushton column. [Chemical Engineering Research and Design](#). 2017;120:58-68.
17. Torkaman R, Asadollahzadeh M, Torab-Mostaedi M, Maragheh M.G. Recovery of cobalt from spent lithium ion batteries by using acidic and basic extractants in solvent extraction process. [Separation and Purification Technology](#). 2017;186:318-325.
18. Earl C, Shah I.H, Cook S, Cheeseman C.R. Environmental Sustainability and Supply Resilience of Cobalt Sustainability. 2022;14:4124.
19. Moskalyk R.R, Alfantazi A.M. Review of present cobalt recovery practice. [Mining, Metallurgy & Exploration](#). 2000;17:205-216.
20. Nguyen V.T, Riaño S, Aktan E, Deferm C, Franss J, Binnemans K. Solvometallurgical Recovery of Platinum Group Metals from Spent Automotive Catalysts. [ACS Sustainable Chemistry & Engineering](#). 2021;9:337–350.
21. Li Z, Dewulf B, Binnemans K. Nonaqueous Solvent Extraction for Enhanced Metal Separations: Concept, Systems, and Mechanisms. [Industrial & Engineering Chemistry Research](#). 2021;60:17285-17302.
22. Binnemans K, Jones P.T. Solvometallurgy: An Emerging Branch of Extractive Metallurgy. [Journal of Sustainable Metallurgy](#). 2017;3:570-600.
23. Badihi F, Asl A.H, Asadollahzadeh M, Torkaman R. Applied novel functionality in separation procedure from leaching solution of zinc plant residue by using non-aqueous solvent extraction. [Scientific Reports](#). 2023;13:1146.
24. Orefice M, Audoor H, Li Z, Binnemans K. Solvometallurgical route for the recovery of Sm, Co, Cu and Fe from SmCo permanent magnets. [Separation and Purification Technology](#). 2019;219:281-289.
25. Batchu N.K, Li Z, Verbelen B, Binnemans K. Structural effects of neutral organophosphorus extractants on solvent extraction of rare-earth elements from aqueous and non-aqueous nitrate solutions. [Separation and Purification Technology](#). 2021;255:117711.



26. Brecht Dewulf, Batchu N.K, Binnemans K. Enhanced Separation of Neodymium and Dysprosium by Nonaqueous Solvent Extraction from a Polyethylene Glycol 200 Phase Using the Neutral Extractant Cyanex 923. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020;8:19032-19039.
27. Rizk S.E, Gamal R, El-Hefny N.E. Insights into non-aqueous solvent extraction of gadolinium and neodymium from ethylene glycol solution using Cyanex 572. *Separation and Purification Technology*. 2021;275:119160.
28. Batchu N.K, Hoogerstraete T.V, Banerjee D. Non-aqueous solvent extraction of rare-earth nitrates from ethylene glycol to n-dodecane by Cyanex 923. *Separation and Purification Technology*. 2017;174:544-553.
29. Batchua N.K, Hoogerstraete T.V, Banerjeeb D, Binnemans K. Separation of rare-earth ions from ethylene glycol (+LiCl) solutions by non-aqueous solvent extraction with Cyanex 923. *RSC Advances*. 2017;7:45351-45362.
30. Dewulf B, Riaño S, Binnemans K. Separation of heavy rare-earth elements by non-aqueous solvent extraction: Flowsheet development and mixer-settler tests. *Separation and Purification Technology*. 2022;290:120882.
31. Batchu N.K, Dewulf B, Riaño S, Binnemans K. Development of a solvometallurgical process for the separation of yttrium and europium by Cyanex 923 from ethylene glycol solutions. *Separation and Purification Technology*. 2020;235:116193.
32. Marczenko Z, Balcerzak M. Separation, Preconcentration and spectrophotometry in inorganic analysis. *Elsevier, New York*. 2000.
33. Li Z, Li X, Raiguel S, Binnemans K. Separation of transition metals from rare earths by non-aqueous solvent extraction from ethylene glycol solutions using Aliquat 336. *Separation and Purification Technology*. 2018;201:318-326.
34. Wang M, Zhang Y, Muhammed M. Critical evaluation of thermodynamics of complex formation of metal ions in aqueous solutions III. The system Cu(I,II)-Cl--e at 298.15 K. *Hydrometallurgy*. 1997;45:53-72.
35. Rybka P, Regel-Rosocka M. Nickel(II) and Cobalt(II) Extraction from Chloride Solutions with Quaternary Phosphonium Salts. *Separation Science and Technology*. 2012;47:1296-1302.
36. Blitz-Raith A.H, Paimin R, Cattrall R.W, Kolev S.D. Separation of cobalt (II) and nickel (II) by solid-phase extraction into Aliquat 336 chloride immobilized in poly(vinyl chloride). *Talanta*. 2007;71:419-423.
37. Zahn M, Ohki Y, Fenneman D.B, Gripshover R.L, Gehman V.H. Dielectric properties of water and water/ethylene glycol mixtures for use in pulsed power system design. *IEEE*. 1986;74:1182-1221.
38. Sato T, Shimomura T, Murakami S, Maeda T, Nakamura T. Liquid-liquid extraction of divalent manganese, cobalt, copper, zinc and cadmium from aqueous chloride solutions by tricaprylmethylammonium chloride. *Hydrometallurgy*. 1984;12:245-254.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**

بدیهی، فاطمه، اسداله‌زاده، مهدی، حقیقی اصل، علی، ترکمان، رضوان. (۱۴۰۳). بررسی پارامترهای مؤثر در استخراج یون‌های کبالت از محیط غیرآبی با استفاده از استخراج‌کننده آلکوات ۳۳۶. *مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای*. ۱۰۹ (۳)، ۸۴-۹۴. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1611>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1611.html.

