

## بهینه‌سازی فرآیند فلوتاسیون انتخابی کانه مس و روی معدن تکنار با استفاده از نرم‌افزار طراحی آماری آزمایش DX7

سید محمد جواد کلینی<sup>۱\*</sup>؛ فراز سلطانی<sup>۲</sup>؛ محمود عبداللهی<sup>۳</sup>

۱-دانشیار گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس؛ koleini@modares.ac.ir  
۲-دانشجوی دکترای فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس؛ minereng2005@gmail.com  
۳-استاد گروه فرآوری مواد معدنی، دانشگاه تربیت مدرس؛ minmabd@modares.ac.ir

(دریافت ۳۰ بهمن ۱۳۹۰، پذیرش ۶ خرداد ۱۳۹۱)

### چکیده

در این پژوهش، بهینه‌سازی و مدل سازی فرآیند فلوتاسیون انتخابی کالکوپیریت، اسفالریت و پیریت از کانسنگ مس - روی معدن تکنار با ۲/۹۱٪ روی و ۱/۲۶٪ مس با استفاده از روش طراحی آماری D-Optimal انجام شد. در مرحله اول از فلوتاسیون انتخابی، کالکوپیریت شناور شده و پیریت و اسفالریت بازداشت شدند. در مرحله دوم نیز، اسفالریت فعال شده که موضوع این مقاله نبوده است. در مرحله اول (فلوتاسیون کالکوپیریت) عوامل متغیر فرآیند شامل: الف) چهار نوع مخلوط کلکتوری شامل: MC1، MC2، MC3 و MC4، ب) دو نوع سیستم بازدارندگی شامل: سیستم ZnSO<sub>4</sub>-CuCN و سیستم دکسترین - ZnSO<sub>4</sub> و ج) pH بین ۸ تا ۱۲ بوده اند. مدل‌های درجه دوم، درجه دوم و خطی، به ترتیب بر پاسخ های بازیابی مس، روی و میزان پیریت در کنسانتره مس برآزش شد. مؤثرترین عوامل برای بازیابی مس و بازیابی روی در کنسانتره مس، نوع مخلوط کلکتوری و برای میزان پیریت، pH بوده اند. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که با بیشینه کردن بازیابی مس و کمینه کردن دو پاسخ دیگر، بازیابی مس، بازیابی روی و میزان پیریت به ترتیب برابر بود با ۸۹/۰۴٪، ۲۵/۳٪ و ۲/۰۲٪ با MC2 و دکسترین به ترتیب به عنوان مخلوط کلکتوری و بازداشت‌کننده پیریت، میزان مصرف سولفات روی ۵۰۰ g/t و pH برابر با ۱۱/۳۵ با کمینه کردن مصرف ZnSO<sub>4</sub> (۲۰۰ g/t)، بازیابی مس، بازیابی روی و میزان پیریت به ترتیب برابر بود با ۸۸/۹۴٪، ۳۱/۲۴٪ و ۱/۴۵٪ در pH برابر با ۱۱/۹۳. MC3 با این که در ایجاد حالت انتخابی بین کالکوپیریت - اسفالریت به اندازه MC2 مؤثر نبوده است، اما در بازیابی مس، عملکرد بهتری از MC2 داشته و سبب بهبود بازیابی مس به میزان ۲٪ شده است. علاوه بر این، کلکتور جدید TC1000 (در مخلوط کلکتوری MC3) که در هیچیک از مطالعات قبلی مورد استفاده قرار نگرفته است، سبب بازیابی و ایجاد حالت انتخابی قابل قبولی برای کالکوپیریت نسبت به اسفالریت و پیریت شد.

(MC4=SIPX+X231 و MC3=SIPX+TC1000، MC2=SIPX+Aero238، MC1=SIPX+Aero3477)

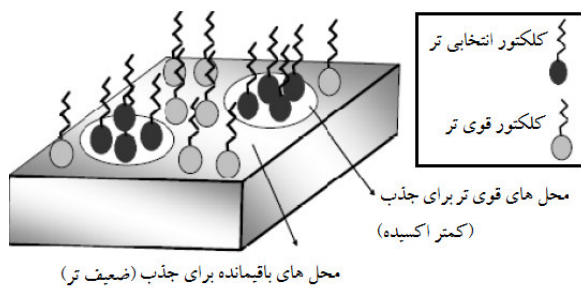
### کلمات کلیدی

فلوتاسیون انتخابی، کانسنگ مس - روی، تکنار، بهینه‌سازی، D-optimal.

## ۱- مقدمه

اغلب در کانسنگ های حاوی اسفالریت و پیریت، سیستم بازدارندگی شامل استفاده از ترکیبی از  $ZnSO_4$  و  $CuCN$  است که استفاده از  $CuCN$ ، نگرانی های زیست محیطی را سبب شده است [۲]. از این نظر، بازدارنده های غیر سمی همچون پلی ساکاریدها می توانند جایگزین مناسبی برای سیانید در بازداشت پیریت و اسفالریت فعال شده با مس باشند. لیو و لاکووسکی (۱۹۸۹)، از دکسترین در جدایش گالن - کالکوپیریت بهره بردند [۶]. درزیمالا و همکاران (۲۰۰۳)، از دکسترین برای جدایش گالن از کانی های مس و والدیوسو و همکاران (۲۰۰۴)، از آن برای بازداشت پیریت استفاده کردند [۱].

نرم افزارهای طراحی آزمایش، امکان ارائه مدل بر پاسخ های سیستم و همچنین بهینه سازی فرآیندها را میسر می سازند. از جمله روش های پرکاربرد در طراحی آزمایش ها می توان به روش های تاگوچی، فاکتوریل و روش سطح - پاسخ (Response Surface Methodology) اشاره نمود [۷]. روش سطح - پاسخ یا RSM، مجموعه ای از تکنیک های ریاضیاتی و آماری است که برای مدل سازی و آنالیز مسائلی که در آن متغیر پاسخ متاثر از چندین متغیر ورودی است، استفاده می شود. هدف RSM بهینه سازی پاسخ یا پاسخ های مورد نظر است [۸].



شکل ۱: پوشش سطحی بهتر ایجاد شده با استفاده از مخلوطی از کلکتورها [۹]

در کنار مزایای روش RSM برای بهینه سازی، ذکر این نکته ضروری است که مدل های ارائه شده به روش سطح - پاسخ، از جمله مدل های غیرسینتیکی (با سینتیک فلوتاسیون ارتباطی ندارند) هستند که برای محدوده ای از متغیرهای ورودی که مورد آزمایش واقع شده است، کاربرد دارند و قابلیت برون یابی ندارند. علاوه بر این، به علت فقدان اطلاعاتی همچون دانش حاکم بر آزمایش ها و ویژگی هایی همچون خواص خوراک در

امروزه بیش از ۹۰٪ از سولفید فلزات پایه به روش فلوتاسیون پرعیار می شوند. روش های فلوتاسیون (تفریقی - تجمعی - نیمه تجمعی)، اغلب برای تولید کنسانتره های مجزای مس، سرب و روی از کانسنگ های سولفیدی مس - سرب - روی استفاده می شوند. در روش فلوتاسیون تفریقی مس - روی که در آن کانی های سولفیدی مس و روی اغلب به صورت کالکوپیریت و اسفالریت هستند، ابتدا مس و سپس روی به طور انتخابی از پیریت و پیروتیت که اصلی ترین کانی مزاحم در این کانسنگ ها هستند، جدا می شوند [۱].

واکنشگرها، بخش مهمی از فرآیند فلوتاسیون هستند. اولین مرحله در توسعه فرآیند فلوتاسیون، پیشرفت های اصلی به واسطه استفاده از واکنشگرهای بهتر حاصل شده است. بنابراین در توسعه فرآیند فلوتاسیون، انتخاب مناسب واکنشگرها برای دستیابی به جدایش مؤثرتر و کنسانتره بیشتر ضروری است. در کارخانجات صنعتی، کنترل مواد شیمیایی افزودنی یک بخش مهم در استراتژی فلوتاسیون است که رسیدن به این هدف مهم می تواند از طریق بهینه سازی نوع و میزان واکنشگرها حاصل شود [۲].

استفاده از مخلوط های کلکتوری به جای کلکتورهای تکی، سبب پوشش سطحی بهتر کلکتور روی سطح کانی های سولفیدی می شود و اگر پیریت یا پیروتیت جزء کانی های گانگ باشند، مخلوط های کلکتوری سبب ایجاد حالت انتخابی نسبت به آنها می شوند. اغلب کلکتورهای با خاصیت انتخابی بیشتر (مانند دی تیوفسفات ها)، اغلب در ترکیب با گزنتات ها به عنوان مخلوط استفاده می شوند [۳]. دلیل پوشش سطحی بهتر سولفیدها توسط مخلوطی از کلکتورها این است که زمانی که کلکتور ضعیف تر، زودتر از کلکتور دیگر وارد پالپ می شود، در محل های با انرژی بیشتر جذب می شود. جزء دوم مخلوط کلکتوری (کلکتور قوی تر) که به عنوان دومین کلکتور وارد پالپ می شود، روی محل های باقیمانده که بیشتر اکسیده شده اند جذب می شود (شکل ۱). بگسی و همکاران (۲۰۰۷)، از مخلوط سدیم دی ایزوبوتیل دی تیوفسفات و سدیم ایزوپروپیل گزنتات برای فلوتاسیون کالکوپیریت استفاده کردند [۴]. هنگون و همکاران (۲۰۰۵)، از مخلوط تیول های مختلف برای فلوتاسیون کانسنگ حاوی مس بهره بردند [۵].

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- کانسنگ سولفید توده ای مس- روی تکنار

پس از تهیه ی نمونه ی معرف از معدن تکنار واقع در ۲۸ کیلومتری شهرستان بردسکن از طریق مجتمع صنعتی ایرانکوه، تجزیه های XRF، XRD و جذب اتمی به منظور تعیین عیار نمونه و همچنین تعیین فازهای موجود در نمونه ی سولفید توده ای مس - روی انجام شد (جدول ۱ و شکل ۲). داده های موجود در شکل ۲ نشان می دهد که مهمترین فازهای سولفیدی موجود در نمونه عبارتند از پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت به همراه مقادیر ناچیزی از گالن. برای آنالیز میزان مس و روی در نمونه های خوراک، کنسانتره و باطله از روش جذب اتمی و برای آنالیز سایر عناصر و ترکیبات نمونه ها از آنالیز XRF استفاده شده است. بر این اساس، میزان کل عناصر روی و مس در نمونه به ترتیب ۲/۹۱٪ و ۱/۲۶٪ می باشد (درصد عناصر روی و مس توسط روش های دقیق تر جذب اتمی و شیمی تر نیز اندازه گیری شده است). نتایج بررسی های میکروسکوپی نشان می دهد که ۸۰٪ ذرات کالکوپیریت در ابعاد زیر ۹۵ میکرون آزاد می باشند. با توجه به کار ملک زاده و همکاران [۱۸]، نتیجه بررسی مقاطع میکروسکوپی و همانطور که از نتایج XRD (شکل ۲) نیز مشاهده می شود، کانسنگ سولفیدی توده ای مس - روی تکنار، نوع جدیدی از کانسنگ های سولفیدی توده ای است که غنی از مگنتیت است.

جدول ۱: نتایج آنالیز XRF خوراک فلوتاسیون (%).

ترکیبات		عناصر	
SiO <sub>2</sub>	۴۴/۳۳	Zn	۲/۹۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۰/۳۳	S	۶/۳۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۲/۸۵	L.O.I	۵/۴۱
CaO	۰/۲۷	Cu	۱/۲۶۶
Na <sub>2</sub> O	۰/۸۷	Ba	۳۹۱ ppm
K <sub>2</sub> O	۲/۶۴	Sr	۸ ppm
TiO <sub>2</sub>	۰/۳۸۱	Pb	۴۷۶ ppm
MnO	۰/۱۵۳	Ni	۴۱ ppm
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	۰/۱۳۴	Cr	۲۸ ppm

مدل های ارائه شده به این روش، می توان بیان نمود که مدل های ارائه شده به روش سطح - پاسخ، تفاوت های زیادی با مدل های پایه ای دارند. از این جهت، اطلاق واژه مدل به روابط بین متغیرها نمی تواند حکایت از جامعیت مدل داشته باشد [۱۰].

روش های استاندارد سطح - پاسخ، CCD (Central Composite Design) و BBD (Box-Behken Design)، به سبب انعطاف در طراحی، به طور گسترده ای در مدل سازی و بهینه سازی فرآیند های مهندسی استفاده شده اند. از طراحی BBD در ارزیابی و بهینه سازی اثرات متغیرهای فرآیند و برهم کنش های آنها در خردایش فسفات استفاده شده است [۱۱]. در بهینه سازی عوامل خردایش نمونه های زغال از روش BBD استفاده شده است [۱۲]. بهینه سازی پارامترهای تولید کنسانتره گرافیت توسط روش CCD انجام شده است [۱۳]. در مدل سازی و بهینه سازی فرآیند استخراج اسید بوریک از کلمانیت از روش CCD استفاده شده است [۱۴]. مهربانی و همکاران [۱۵]، برای مدل سازی و بهینه سازی فلوتاسیون اسفالریت از کانسنگ کم عیار سرب - روی از روش CCD استفاده نموده اند.

روش های طراحی آزمایش حاصل از محاسبات یا CGD (Computer Generated Designs)، می تواند در مواردی که روش های CCD و BBD نیاز آزمایشگر را به علت تعداد آزمایش های بالا جهت بهینه سازی مرتفع نسازند، روش جایگزین مناسبی باشد. مشخص شده است که از میان روش های CGD، روش D-Optimal، بیضی پراکندگی مربوط به تخمین ضرایب معادله رگرسیون را کمینه می سازد [۱۶]. چرنگ (۲۰۱۱)، برای مدلسازی جریان میکرو کانال با ۳ متغیر عددی در ۵ سطح و یک متغیر اسمی در ۲ سطح، از روش d-optimal استفاده کرده است [۱۷].

اهداف اصلی این تحقیق به شرح زیر می باشند: الف) یافتن رابطه بین متغیرهای ورودی فرآیند (نوع مخلوط کلکتوری، نوع سیستم بازدارندگی پیریت - اسفالریت، میزان سولفات روی و pH) و متغیرهای پاسخ (بازایی مس، بازایی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس)، ب) یافتن فاکتورهای معنادار و مؤثر بر فرآیند فلوتاسیون و ج) بهینه سازی نوع و مصرف واکنشگرها از طریق بیشینه کردن پاسخ های فلوتاسیون و کمینه کردن مصرف واکنشگرها.

پیریت و اسفالریت استفاده شد. زمان آماده‌سازی برای سیانید سدیم، سولفات روی و دکسترین سفید به عنوان بازداشت کننده به ترتیب، ۸، ۸ و ۴ دقیقه بوده است. همچنین زمان آماده‌سازی برای کلکتور اولیه و ثانویه به ترتیب ۵ و ۳ دقیقه بوده است. برای بازدارندگی گانگ آبران نیز از محلول ۵٪ CMC (کربوکسی متیل سلولز) استفاده شده است. گستره ی pH در آزمایش‌ها بین ۸ تا ۱۲ متغیر بوده است [۲].

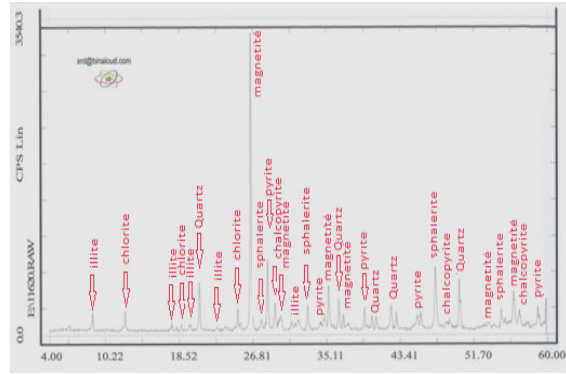
### ۲-۳- طراحی آزمایش D-Optimal

از میان روش‌های طراحی سطح - پاسخ CGD، روش طراحی آزمایش زمانی از نوع D-Optimal است که حجم بیضی پراکندگی تخمین ضرایب معادله رگرسیون کمینه شود. ویژگی طراحی G-Optimal در جهت حداقل کردن ماکزیمم تغییرات مقادیر پاسخ‌های پیش‌بینی شده در ناحیه ی مورد تحقیق است. اغلب سه وضعیت وجود دارد که روش D-Optimal مورد استفاده قرار می‌گیرد: الف) زمانی که محدوده مورد مطالعه برای آزمایش، استاندارد (مکعب یا کره) نباشد (مثلاً حداقلی را برای میزان مصرف کلکتور+کفساز در شروط اولیه اعمال نموده باشیم که مطمئنیم کمتر از این مقدار بازایی بسیار کم خواهد بود). در چنین شرایطی روش‌های طراحی RSM کمتر کاربرد دارند. ب) مدل غیر استاندارد (مثلاً: مدل درجه دوم کاهش یافته - با جملات کمتر) باشد. زمانی که آزمایشگر تشخیص داده باشد که مدل‌های تجربی از درجات یک یا دو برای پاسخ مناسب نباشند. در این شرایط، آزمایشگر دارای دانش خاصی در مورد فرآیند مورد مطالعه است. ج) محدودیت در تعداد آزمایش‌ها، زمانی که آزمایشگر تشخیص می‌دهد که تعداد آزمایش‌ها با توجه به فاکتورهای موجود بسیار هزینه بر و زمان بر است [۷].

دلیل استفاده از طراحی آزمایش d-optimal در این پژوهش، ترکیبی از دلایل ب و ج بوده است. علاوه بر این، کاربرد این روش طراحی در مواقعی که فاکتورهای اسمی (نوع واکنشگرها) وجود دارند، بهتر از سایر روش‌های RSM است.

رابطه عمومی مدل‌های مورد استفاده در روش‌های سطح - پاسخ بصورت رابطه ی ۱ است. در این مدل،  $y$ ، ماتریس پاسخ‌ها،  $X$ ، ماتریس مشاهدات یا سطوح متغیرهای ورودی،  $\varepsilon$ ، خطای محاسبه شده در مدل و  $\beta$  ماتریس ضرایب مدل است [۷].

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (1)$$



شکل ۲: آنالیز XRD

علاوه بر اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت و مگنتیت، کانی‌های کلریت، ایلیت و کوارتز نیز در کانسنگ موجود می‌باشند.

### ۲-۲- آزمایش‌های فلوتاسیون

بر اساس نوع و درصد کانی‌ها و همچنین وجود نداشتن کانی‌های ثانویه ی مس در نمونه، پرعیارسازی نمونه توسط روش فلوتاسیون تفریقی کالکوپیریت - اسفالریت - پیریت انجام شده است. پس از تنظیم دور روتور روی ۹۰۰ دور در دقیقه، ۵۵۰ گرم از نمونه ی خوراک (درصد جامد ۳۰٪ وزنی)، به آرامی به سلول ۱/۶ لیتری که حاوی حدود ۱۲۸۰ میلی لیتر آب است، اضافه شد. پس از آن مراحل تنظیم pH، افزودن بازداشت کننده ها و در نهایت افزودن کلکتورها انجام شد (ابتدا کلکتور انتخابی تر و سپس کلکتور قوی تر افزوده شده اند). کف فلوتاسیون پس از جمع آوری توسط کاردک مخصوص و باطله فیلتر شده و در دستگاه خشک کن، خشک و سپس توزین و عیار سنجی شده اند که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. از ۴ نوع کلکتور انتخابی شامل: Aero3477 (دی ایزوبوتیل دی تیوفسفات سدیم)، Aero238 (دی بوتیل ثانویه دی تیوفسفات سدیم)، TC1000 (تیونوکربامات اصلاح شده) و X231 (اتیل ایزونوپروپیل تیونوکربامات سدیم) در ترکیب با SIPX (سدیم ایزونوپروپیل گزنتات) به عنوان کلکتور قوی با نسبت ۲ به ۱ برای کلکتور انتخابی نسبت به کلکتور قوی و مجموع مصرف مخلوط ۳۰، ۴۸، ۱۵ و ۳۵ گرم بر تن به ترتیب برای (SIPX+Aero3477)، (SIPX+Aero238)، (SIPX+TC1000) و (SIPX+X231)، به عنوان ۴ نوع مخلوط کلکتوری استفاده شد. دو سیستم بازدارندگی سیانید سدیم (۶۰ g/t) - سولفات روی (۲۰۰ - ۵۰۰ g/t) و دکسترین (۳۰۰ g/t) - سولفات روی، بعنوان بازداشت کننده

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2$$

(۲)

تحمین پارامترهای مدل نیز، از طریق کمینه کردن حداقل مربعات خطا (L) در رابطه ۲ است [۷].

جدول ۲: آزمایش های طراحی شده و پاسخ های متناظر با آن

Std	اجرا	فاکتور ۱	فاکتور ۲	فاکتور ۳	فاکتور ۴	پاسخ ۱	پاسخ ۲	پاسخ ۳
		A: میزان سولفات روی	pH : B	C: نوع مخلوط کلکتوری	D: نوع بازداشت کننده پیریت	بازیابی مس %	بازیابی روی %	میزان پیریت %
۵	۱	۲۵۰	۱۰/۹	SIPX+Aero3477	سیانید	۸۶/۷۳	۳۰/۵	۳
۱۳	۲	۳۱۵	۹/۷	SIPX+ Aero 3477	سیانید	۸۷/۲۱	۳۰/۱	۳/۵
۲۵	۳	۲۰۰	۹	SIPX+TC 1000	دکسترین	۸۹/۹۱	۴۰/۱	۲/۵
۲۳	۴	۳۵۰	۸	SIPX+ Aero 238	دکسترین	۹۰/۹	۳۳/۰۹	۳/۵
۱۴	۵	۳۵۵	۱۰/۶	SIPX+ Aero 238	سیانید	۸۸/۸۷	۲۹/۲	۲
۲۱	۶	۲۰۵	۱۱/۵	SIPX+ Aero 3477	سیانید	۸۶/۳	۲۹/۹	۳
۱۶	۷	۳۶۰	۱۲	SIPX+TC 1000	سیانید	۹۰/۳۳	۳۶/۸	۱/۵
۴	۸	۳۴۵	۱۰	SIPX+TC 1000	دکسترین	۹۰/۲	۳۸/۱۶	۲/۵
۱۹	۹	۳۸۵	۱۰/۱	SIPX+X 231	دکسترین	۸۹	۳۷/۷۲	۳/۵
۶	۱۰	۲۶۰	۸/۵	SIPX+ Aero 238	سیانید	۸۹/۸۸	۳۴/۱۲	۲/۵
۱۵	۱۱	۴۷۰	۱۰/۵	SIPX+X 231	سیانید	۸۹/۲	۳۵/۳۳	۳
۳۰	۱۲	۳۵۵	۱۰/۶	SIPX+ Aero 238	سیانید	۸۸/۱۳	۲۸/۹۸	۲
۲۴	۱۳	۵۰۰	۸	SIPX+X 231	دکسترین	۸۸/۸	۳۵/۸۲	۴
۹	۱۴	۳۳۰	۹/۶	SIPX+ Aero 3477	دکسترین	۸۸/۳۵	۳۲/۳۱	۴
۸	۱۵	۵۰۰	۸	SIPX+TC 1000	سیانید	۸۸/۸۷	۳۸	۳
۷	۱۶	۲۸۰	۹/۸	SIPX+X 231	سیانید	۸۹/۹	۳۸/۳۳	۳
۲	۱۷	۵۰۰	۹/۳	SIPX+ Aero 238	دکسترین	۹۱/۱۳	۳۰/۲	۲/۵
۲۰	۱۸	۴۶۰	۹	SIPX+TC1000	دکسترین	۸۹/۸۹	۳۷/۳	۲/۵
۲۶	۱۹	۴۹۵	۹/۳	SIPX+ Aero 3477	سیانید	۸۷	۲۷/۱۶	۳/۵
۳۱	۲۰	۴۷۰	۱۰/۵	SIPX+X 231	سیانید	۸۸/۹۸	۳۵/۱۴	۲/۵
۱۰	۲۱	۲۶۰	۹/۹	SIPX+ Aero 238	دکسترین	۹۰/۵	۳۵/۳	۲/۵
۱۱	۲۲	۲۵۰	۱۲	SIPX+X231	دکسترین	۸۷/۹	۳۵/۵	۲
۲۹	۲۳	۳۶۰	۱۲	SIPX+TC1000	سیانید	۹۰/۲۸	۳۶/۶۹	۱/۵
۲۷	۲۴	۵۰۰	۸	SIPX+TC 1000	سیانید	۸۹/۰۱	۳۷/۷۸	۳
۱	۲۵	۳۹۰	۱۰/۵	SIPX+ Aero 3477	دکسترین	۸۶/۹	۲۹/۲۳	۴
۱۸	۲۶	۲۹۰	۱۰	SIPX+ Aero 238	دکسترین	۹۰/۴۶	۳۴/۴	۲/۵
۳	۲۷	۳۳۵	۹/۵	SIPX+X 231	دکسترین	۸۹/۷	۳۹/۲۸	۳
۱۷	۲۸	۵۰۰	۱۱/۵	SIPX+ Aero 3477	دکسترین	۸۶/۳۲	۲۵/۱۳	۳/۵
۲۸	۲۹	۲۶۰	۸/۵	SIPX+ Aero 238	سیانید	۸۹/۷۹	۳۴/۰۴	۲/۵
۲۲	۳۰	۲۰۰	۸	SIPX+ Aero 3477	دکسترین	۸۹/۳	۳۵/۸	۴
۱۲	۳۱	۴۳۰	۱۱/۲	SIPX+TC 1000	دکسترین	۹۰/۵	۳۷	۲

$$\text{Pyrite Content}(\%) = 2.88 + 0.18A - 0.69B + 0.87C[1] - 0.55 C[2] - 0.49 C[3] + 0.14D - 0.22A^2 \quad (7)$$

در مدل‌های فوق، تمامی فاکتورها بصورت کددار بوده و A، B، C و D به ترتیب عبارتند از میزان سولفات روی، pH، نوع مخلوط کلکتوری و نوع بازداشت کننده پیریت. همچنین AB، AC، BC، CD و AD برهم کنش بین پارامترهای اصلی هستند. نتایج آنالیز واریانس مدل‌های ساخته شده در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که مدل‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪ (مقادیر P کمتر از ۰/۰۵) معنادار هستند. در هریک از مدل‌ها، معنادار نبودن آماری نقصان در برازش (Lack Of Fit) نشانگر تکرارپذیر بودن آزمایش‌ها می‌باشد.

### ۳-۱-۱-۱ اعتبار سنجی مدل‌ها

یکی از ابزارهای سنجش مدل‌های برازش شده، نمودار مقادیر پیش بینی شده توسط مدل در مقابل مقادیر حقیقی است که در شکل ۳ (بخش‌های الف، ب و ج) به ترتیب برای مدل‌های بازیابی مس، بازیابی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس نشان داده شده است. نتایج بررسی این اشکال، مناسب بودن برازش‌ها را تأیید می‌کند. در این اشکال همچنین مقادیر  $R^2$  (ضریب همبستگی داده‌ها) و  $R^2$  Adjusted (ضریب همبستگی حقیقی) حاکی از مناسب بودن برازش‌ها است.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که برای مدل‌های بازیابی مس، بازیابی روی و میزان پیریت، مقادیر F به ترتیب عبارتست از ۳۹/۷۳، ۵۸۷/۳۱، ۳۹/۹۱ و ۳۹/۷۳.

در روش‌های طراحی آزمایش سطح - پاسخ، عموماً از معادلات ۳ و ۴ جهت بدست آوردن معادلات استفاده می‌شود که رابطه ۳ مربوط به فرآیندی است که تغییرات در آن به صورت خطی باشد. اگر در سیستم انحنا وجود داشته باشد، چندجمله‌ای از درجات بالاتر مانند آنچه که در رابطه ۴ برای مدل درجه دوم نشان داده شده است، استفاده می‌شود [۷].

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{i=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

### ۳-۲ بحث و نتایج

#### ۳-۱-۱-۲ ساخت معادلات مدل‌ها

همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است، تعداد ۳۱ آزمایش شامل ۵ تکرار (۷-۲۳، ۱۰-۲۹، ۱۱-۲۰، ۵-۱۲، ۱۵-۲۴)، برای فلوتاسیون کالکوپیریت به روش D-Optimal طراحی شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها در نرم افزار طراحی آزمایش DX7 (Design Expert 7) وارد شده و از میان مدل‌های موجود، مدل درجه دوم برای بازیابی مس و بازیابی روی در کنسانتره مس و همچنین مدل خطی برای میزان پیریت در کنسانتره مس انتخاب شد. مدل‌های حاصله در روابط ۵ تا ۷ نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} \text{Cu Recovery}(\%) = & 89.19 - 0.33A - 0.7B - \\ & 1.77C[1] + 1.16C[2] + 0.49C[3] + 0.22D - \\ & 0.71BC[1] + 1.42BC[2] - 0.68BC[3] + \\ & 0.2C[1]D - 0.31C[2]D + 0.49 C[3]D + \\ & 0.29A^2 - 0.79B^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Zn Recovery}(\%) = & 34.61 - 2.72A - 2.07B - \\ & 4.44C[1] + 4.51C[2] - 3.14C[3] + 0.5D - \\ & 1.12AC[1] + 2AC[2] - 1.01AC[3] - 0.52AD \\ & + 2.01BC[2] - 1.74BC[3] + 0.66C[1]D - \\ & 1.29C[2]D + 0.36C[3]D + 1.2A^2 - 3.08B^2 \end{aligned} \quad (6)$$

جدول ۳: نتایج آنالیز واریانس مربوط به مدل‌های ساخته شده

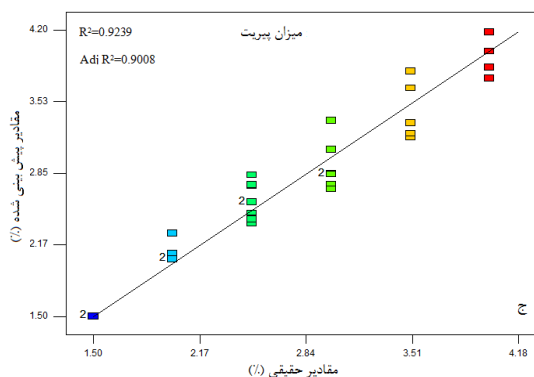
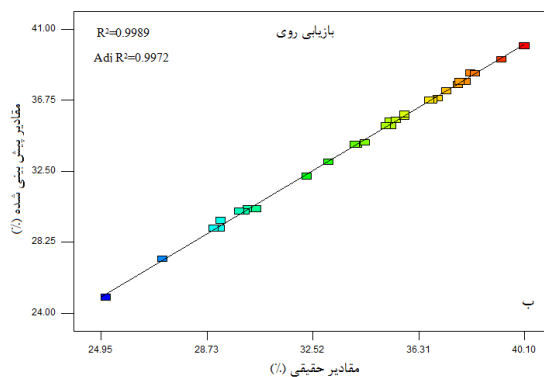
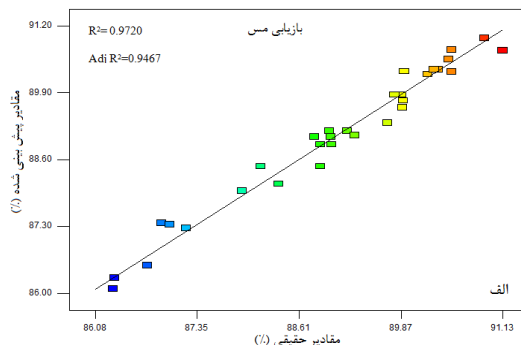
مدل	مجموع مربعات		درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
بازیابی مس	مدل	۵۶/۱۱	۱۴	۴/۰۱	۳۹/۷۳	<۰/۰۰۰۱
	باقیمانده	۱/۶۱	۱۶	۰/۱		
بازیابی روی	مدل	۴۵۱/۶۸	۱۸	۲۵/۰۹	۵۸۷/۳۱	<۰/۰۰۰۱
	باقیمانده	۰/۵۱	۱۲	۰/۰۴۳		
میزان پیریت	مدل	۱۴/۰۴	۷	۲/۰۱	۳۹/۹۱	<۰/۰۰۰۱
	باقیمانده	۱/۱۶	۲۳	۰/۰۵		

### ۳-۲- بررسی اثرات متغیرها

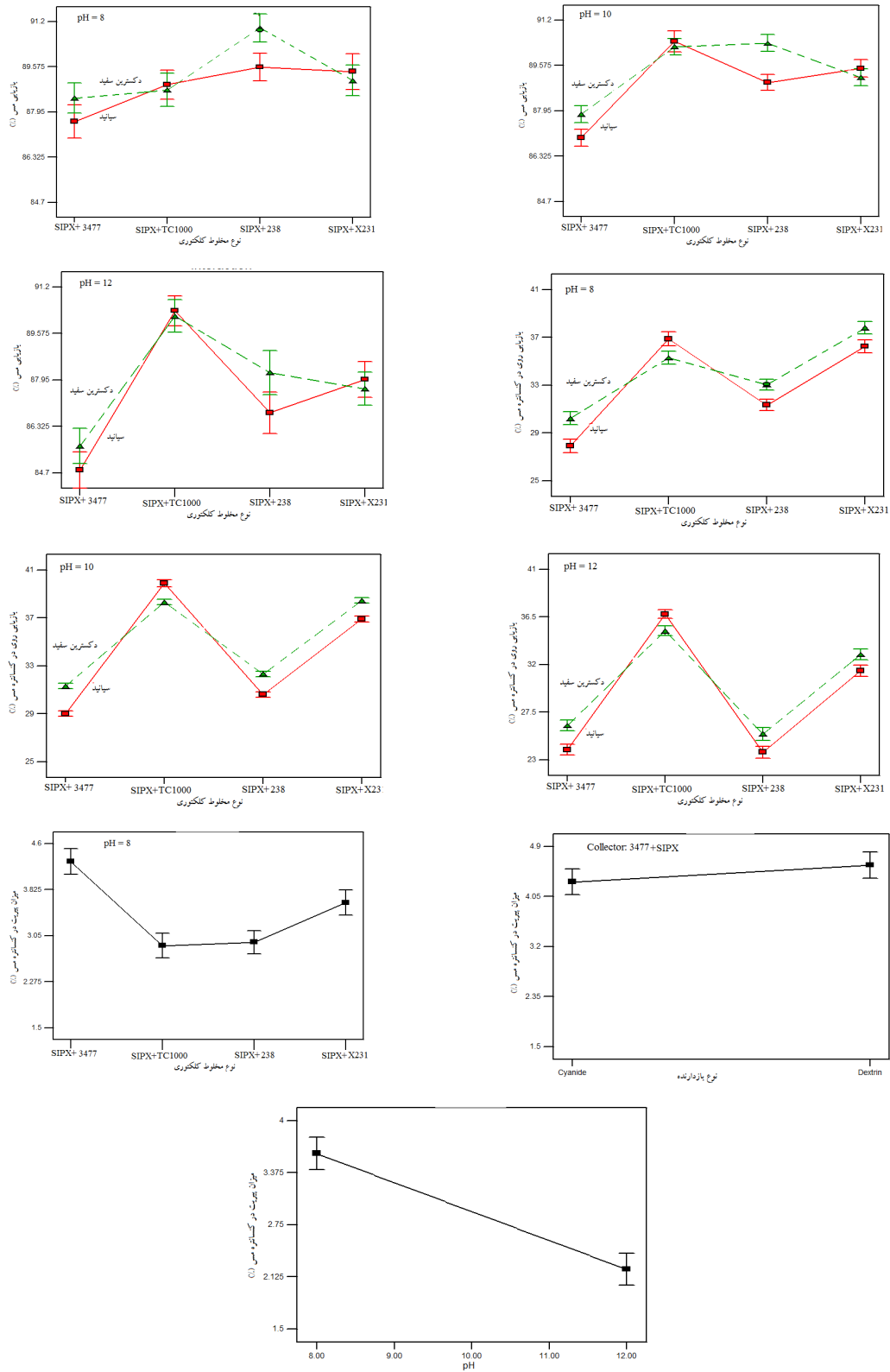
با توجه به اثرات بهتر مخلوط‌های کلکتوری در پوشش سطحی کانی‌های سولفیدی از مخلوط‌های کلکتوری استفاده شده است [۱۹]. در شکل ۴، اثر نوع واکنشگر (مخلوط‌های کلکتوری و سیستم‌های بازدارندگی) بر بازیابی مس و همچنین بازیابی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس نشان داده شده است. اثر مخلوط‌های کلکتوری در pH های مختلف متفاوت بوده است به طوری که مخلوط‌های کلکتوری SIPX+Aero238، SIPX+TC1000 و SIPX+TC1000 به ترتیب در pH های ۸، ۱۰ و ۱۲ بهترین بازیابی مس را حاصل نموده اند. گونه های مسئول آبرانی سطحی کالکوپیریت در ارتباط با کلکتورهای بکار رفته در پژوهش حاضر، شامل: گزنتات مس (CuX)، دی گزنتوزن (X<sub>2</sub>)، فسفوژن (Cu(DTP)<sub>2</sub>) و دی تیوکربامات مس ((Cu(DTC)) هستند که گونه های دی تیولات در مقادیر pH های بالا (به ویژه بیشتر از ۱۱) پایدار نیستند [۲]. باید تاکید نمود که گونه های مسئول آبرانی کلکتور TC1000، که کلکتوری جدید برای فلوتاسیون سولفیدهای فلزات پایه است، هنوز به طور کامل شناخته شده نیست.

بازداشت پیریت در فلوتاسیون تفریقی کانسنگ تکنار، علاوه بر اینکه می تواند از طریق استفاده از بازدارنده های مناسب حاصل شود، از طریق استفاده از مخلوط‌های کلکتوری نیز می تواند بهبود یابد. استفاده از سیانید سدیم به منظور بازداشت پیریت در مقایسه با دکسترین سفید به علت حساسیت کالکوپیریت و پایداری بهتر سیانید مس نسبت به ترکیب کلکتور - فلز [۱۹]، سبب کاهش بازیابی مس شده است. این کاهش به نوع مخلوط کلکتوری مورد استفاده بستگی داشته است. نتایج نشان داد که، عملکرد مخلوط کلکتوری SIPX+TC1000 در بازیابی مس برای هر دو نوع بازداشت کننده سیانید سدیم و دکسترین سفید، در گستره وسیعی از pH مطلوب بوده است. مکانیسم بازداشت پیریت توسط سیانید، تشکیل گونه فروسیانید، به ویژه در pH های بالا بوده و مکانیسم بازداشت اسفالریت توسط ترکیبات سیانیدی، حل شدن مس موجود در سطح اسفالریت و همچنین حل شدن گزنتات توسط سیانید است [۲]. در حالیکه، مکانیسم بازداشت کنندگی دکسترین به علت برهم کنش گروه های هیدروکسیل و هیدروکسید فلز روی سطح کانی سولفیدی می باشد.

مقدار بالای F و همچنین پایین بودن مقدار P، بیانگر معتبر بودن مدل‌های ارائه شده است. مجموع مربعات باقیمانده پیش بینی شده (PRESS)، که مناسب بودن برازش مدل‌ها به داده های حاصل از آزمایش را نشان می دهد عبارتست از: ۱۰/۶۷ برای بازیابی مس، ۹۲/۸۹ برای بازیابی روی و ۲۴/۹۹ برای میزان پیریت در کنسانتره مس.



شکل ۴: نمودار مقادیر حقیقی در برابر مقادیر پیش بینی شده توسط مدل برای مدل‌های ساخته شده ی پاسخ‌ها: الف: بازیابی مس، ب: بازیابی روی، ج: میزان پیریت



شکل ۴: اثر نوع واکنشگر در بازیابی مس و همچنین بازیابی روی و مقدار پیریت در کنسانتره مس



دوم بدست آمده برای دو متغیر  $X_1$  و  $X_2$  به صورتی که در رابطه ۸ نشان داده شده است، بعنوان مثال ذکر شده است [۱۵]. در این پژوهش، روش بهینه سازی پیوسته جهت بهینه سازی سه پاسخ موجود (بازیابی مس و بازیابی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس) توسط نرم افزار طراحی آزمایش  $DX7$  انجام شده است. هدف بهینه سازی می تواند در برای بهینه کردن پاسخها همزمان با کاهش میزان مصرف واکنشگرها (در اینجا میزان سولفات روی) یا صرفاً بهینه کردن پاسخها باشد که هر دو حالت در جدول ۵ نشان داده شده است.

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 \quad (8)$$

$$\partial y / \partial X_1 = b_1 + 2b_{11}X_1 + b_{12}X_2 = 0$$

$$\partial y / \partial X_2 = b_2 + 2b_{22}X_2 + b_{12}X_1 = 0$$

نتایج بهینه سازی پاسخها در جدول ۵ نشان داده شده است. حداکثر میزان بازیابی مس در حالت اول برابر با ۸۹/۰۴٪ با استفاده از مخلوط کلکتوری SIPX+Aero238، دکسترین به عنوان بازداشت کننده پیریت، میزان ۵۰۰ گرم بر تن مصرف سولفات روی جهت بازداشت اسفالریت و pH برابر با ۱۱/۳۵ (بازیابی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس به ترتیب برابرند با ۲۵/۳٪ و ۲/۰۲٪). در حالت دوم که میزان مصرف سولفات روی کمینه شده (۲۰۰ گرم بر تن)، حداکثر بازیابی مس برابر با ۸۸/۹۴٪ با استفاده از دکسترین و SIPX+Aero238، به ترتیب به عنوان بازداشت کننده پیریت و مخلوط کلکتوری در pH برابر با ۱۱/۹۳ حاصل شده است (بازیابی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس به ترتیب برابرند با ۳۱/۲۴٪ و ۱/۴۵٪).

انجام آزمایشهای تأیید شرایط حاصل از بهینه سازی را تأیید می نماید (به ترتیب در حالات ۱ و ۲ بهینه سازی در جدول ۵، نتایج آزمایشهای تأیید عبارت بود از: ۸۸/۵٪ - ۸۸٪ برای بازیابی مس، ۲۶٪ - ۳۱/۷٪ برای بازیابی روی و ۲٪ - ۱/۵٪ برای میزان پیریت.

همانطور که در شکل ۴ به خوبی مشاهده می شود، SIPX+Aero238 بهترین مخلوط کلکتوری در تمامی pHها در جهت عدم بازیابی روی در کنسانتره مس (ایجاد حالت انتخابی بین کالکوپیریت و اسفالریت) بوده است. در مورد سایر مخلوطهای کلکتوری، اثر دکسترین سفید بعنوان بازداشت کننده برای اسفالریت، بهتر از سیانید سدیم بوده است. مخلوط کلکتوری SIPX+X231 سبب بیشترین بازیابی برای روی و کمترین حالت انتخابی بین کالکوپیریت - اسفالریت شده است. برای تمامی پاسخها، مقادیر F و P مربوط به هر یک از فاکتورهای اصلی، در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به این مقادیر مشخص شده است که نوع مخلوط کلکتوری مؤثرترین فاکتور (مقدار F بالا و P کم) بر میزان بازیابی مس و بازیابی روی در کنسانتره مس بوده است. همچنین برای پاسخ پیریت، نوع مخلوط کلکتوری، بعد از فاکتور pH مهمترین فاکتور بوده است.

با بررسی عوامل مؤثر در بازداشت پیریت در شکل ۴، می توان به این نتیجه رسید که مخلوطهای کلکتوری SIPX+Aero238 و SIPX+TC1000 به ترتیب سبب کمترین بازیابی پیریت در کنسانتره مس شده اند. سیانید سدیم نسبت به دکسترین سفید بازداشت کنندهی بهتری برای پیریت بوده است. افزایش pH اثر مشخصی در بازداشت پیریت دارد چراکه افزایش pH (به ویژه pHهای بیش از ۱۰/۵) سبب عدم پایداری گونه های دی تیولات می شود [۲۰].

### ۳-۳- بهینه سازی

نظر به اینکه بهینه سازی در روشهای سطح - پاسخ، یافتن شرایط بهینه برای پاسخها در فضای طراحی است، بنابراین بهینه سازی نسبت به اهداف می تواند در جهت کمینه یا بیشینه کردن یک یا چند پاسخ باشد [۱۶]. برای مدلها، نقاط بیشینه و کمینه از میان نقاط بحرانی بدست می آیند که نقاط بحرانی از طریق مشتق اول معادلات مدل حاصل می شوند. مدل درجه

جدول ۴: مقادیر F و P برای متغیرهای اصلی پاسخها

فاکتور	میزان پیریت		بازیابی روی		بازیابی مس	
	مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F	مقدار P	مقدار F
نوع مخلوط کلکتوری	<۰/۰۰۰۱	۶۲/۶۱	<۰/۰۰۰۱	۲۴۱۱/۶	<۰/۰۰۰۱	۹۵/۳
بازداشت کننده پیریت	۰/۰۱۹	۱۲/۲۴	<۰/۰۰۰۱	۱۵۶/۷۲	۰/۰۰۰۹	۱۶/۶۵
میزان سولفات روی	۰/۰۲۹۹	۵/۳۶	<۰/۰۰۰۱	۱۷۳۹/۳۶	۰/۰۱۱۸	۸/۰۷
pH	<۰/۰۰۰۱	۸۸/۶۷	<۰/۰۰۰۱	۶۳۱/۹۹	۰/۰۰۰۲	۲۲/۷۲

جدول ۵: شرایط بهینه انجام آزمایش‌ها

شماره	پاسخ	اهداف	ZnSO <sub>4</sub> (g/t)	نوع بازداشت کننده پیریت	نوع مخلوط کلکتوری	pH	بازیابی مس (%)	بازیابی روی در کنسانتره مس (%)	میزان پیریت در کنسانتره مس (%)	عیار مس (%)
۱	بازیابی مس	بیشینه	۵۰۰	دکسترین	SIPX+Aero238	۱۱/۳۵	۸۹/۰۴	۲۵/۳	۲/۰۲	۱۰/۲۵
	بازیابی روی	کمینه								
	میزان پیریت	کمینه								
۲	بازیابی مس	بیشینه	۲۰۰	دکسترین	SIPX+Aero238	۱۱/۹۳	۸۸/۹۴	۳۱/۲۴	۱/۴۵	۹/۴۷
	بازیابی روی	کمینه								
	میزان پیریت	کمینه								
	واکنشگر	کمینه								

کنسانتره مس بعد از pH مؤثرترین فاکتور بوده است. بهینه‌سازی فرآیند فلوتاسیون در دو حالت انجام شد. در حالت اول با بیشینه کردن بازیابی مس و کمینه کردن دو پاسخ دیگر نتایج زیر حاصل شده است. بازیابی مس، بازیابی روی و میزان پیریت به ترتیب برابر بود با ۸۹/۰۴٪، ۲۵/۳٪ و ۲/۰۲٪. با SIPX+Aero238 و دکسترین به ترتیب به عنوان مخلوط کلکتوری و بازداشت کننده پیریت با میزان مصرف سولفات روی ۵۰۰ گرم بر تن و در pH برابر با ۱۱/۳۵. در حالت دوم بهینه‌سازی که میزان مصرف سولفات روی کمینه شد، پاسخ‌ها به ترتیب برابر با ۸۸/۹۴٪، ۳۱/۲۴٪ و ۱/۴۵٪ بود. با SIPX+Aero238 و دکسترین به ترتیب به عنوان مخلوط کلکتوری و بازداشت کننده پیریت با میزان مصرف سولفات روی ۲۰۰ گرم بر تن و در pH برابر با ۱۱/۹۳ متغیرهای ورودی در شرایط بهینه بودند. مخلوط کلکتوری SIPX+TC1000، با این که در ایجاد حالت انتخابی بین کالکوپیریت و اسفالریت به اندازه مخلوط SIPX+Aero238 مؤثر نبوده است، اما در بازیابی مس، عملکرد بهتری از SIPX+Aero238 داشته و سبب بهبود بازیابی مس به میزان ۲٪ شده است.

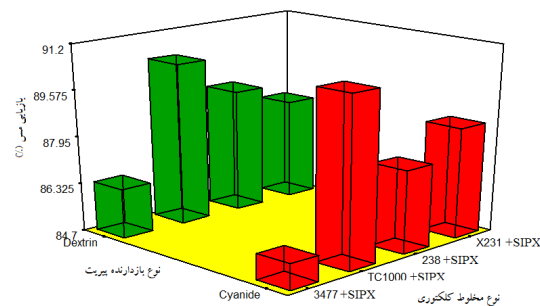
#### ۵- تقدیر و تشکر

محققین بدینوسیله از آزمایشگاه فرآوری مواد معدنی دانشگاه تربیت مدرس و مجتمع صنعتی ایرانکوه به دلیل حمایت‌هایشان و در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی تشکر می‌کنند.

#### مراجع

[1] Soltani, F; 2011; "Investigation of reagent type effect on the selective flotation of Cu-Zn sulphide ore". MSc. Thesis, Tarbiat Modares University.

با بررسی عملکرد سایر مخلوط‌های کلکتوری (مطابق آنچه که در شکل ۵ نشان داده شده است)، در شرایط بهینه از نظر pH و میزان مصرف سولفات روی، مخلوط کلکتوری SIPX+TC1000 حتی عملکرد بهتری نسبت به مخلوط SIPX+Aero238 داشته است. همچنین این مخلوط کلکتوری حساسیت کمتری نسبت به نوع بازداشت کننده پیریت داشته و بازیابی مس در حضور سیانید سدیم با استفاده از مخلوط کلکتوری SIPX+TC1000 به میزان ۲٪ نسبت به مخلوط SIPX+Aero238 بیشتر بوده است.



شکل ۵: اثر نوع واکنشگر (مخلوط کلکتوری و بازداشت کننده) بر بازیابی مس در شرایط بهینه

#### ۴- نتیجه‌گیری

براساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، سه مدل بر پاسخ‌های بازیابی مس، بازیابی روی و میزان پیریت در کنسانتره مس برآزش شده است. مدل درجه دوم برای پاسخ‌های بازیابی مس و روی و مدل خطی برای پاسخ میزان پیریت انتخاب شده است. نوع مخلوط کلکتوری برای بازیابی مس، بازیابی روی در کنسانتره مس مؤثرترین فاکتور و برای میزان پیریت در

pp. 35-42.

[12] Aslan, N. and Cebeci, Y.; 2007; "Application of Box-Behenken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals", Fuel, No. 86, pp. 769-776.

[13] Aslan, N., Cifci, A. and Yanb, D.; 2008; "Optimization of process parameters for pruding graphite concentrate using response surface methodology", Separ. Purif. Technol, No. 59, pp. 9-16.

[14] Ekin, Z., Sayan, E., Bese, A. V. and Nuri Ata, O.; 2007; "Optimization and modeling of boric acid extraction from colemanite in water saturated with carbon dioxide and sulphur dioxide gases", Int. J. Miner. Process, No. 82, pp. 187-194.

[15] Mehrabani, J. V., Noaparast, M., Mousavi, S. M., Dehghan, R. and Ghorbani, A.; 2010; "Process optimization and modeling of sphalerite flotation from a low - grade Zn-Pb ore using response surface methodology", Separ. Purif. Technol, No. 72, pp. 242-249.

[16] Iazic, R.; 2004; *Design of Experiments in Chemical Engineering*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

[17] Chen, C. C.; "The application of D-optimal design for modeling micro channel flow with different dispensing pattern", No. 38, pp. 1061-1066.

[18] Malekzadeh Shafaroudi, A. and Karimpour, M.H.; 2005; "Taknar Polymetal (Cu-Zn-Au-Ag-Pb) Deposit: A New Type Magnetite-Rich VMS Deposit, Northeast of Iran. Iranian Journal of Sciences", Vol. 3. pp. 239-254.

[19] Loter, N. O. and Bradshaw, D.J.; 2010; "The formulation and use of mixed collectors in sulphide flotation", Minerals Engineering, No. 23, pp. 945-951.

[20] Fuerstenau, M. C; ,Martin, J. D. and Kuhn, C; 1985; "Chemistry of flotation", Society for Mining Metallurgy.

[2] Bulatovic, S. M.; 2007; *Handbook of Flotation reagents: chemistry, Theory and practice: Flotation of sulphide ores*, Vol. 1, ELSEVIER.

[3] Gu'lera, T., Hic,yVlmazb, C., Gfkag'ac, G. and Ekmekci, Z.; 2005; "Electrochemical behaviour of chalcopyrite in the absence and presence of dithiophosphate", Int. J. Miner. Process, No. 75, pp. 217-228.

[4] Bicak, O., Ekmekci, Z., Bradshaw, d. J. and Haarris, P. J.; 2007; "Adsorption of guar gum and CMC on pyrite"; Minerals Engineering, No. 20, pp. 996-1002.

[5] Hangone, G., Bradshaw, D. J. and Ekmekci, Z.; 2005; "Flotation of a copper sulphide ore from Okiep using thiol collectors and their mixtures"; The Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, No. 105, pp. 199-206.

[6] Liu, Q. and Lakowski, J. S.; 1989; "The role of metal hydroxides at mineral surfaces in dextrin adsorption, II. Chalcopyrite - galena separations in the presence of dextrin"; Int. J. Miner. Process, No. 27, pp. 147-155.

[7] Montgomery, D. C.; 2001; *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, New York.

[8] Aghaie, E., Pazouki, M., Hosseini, M.R., Ranjbar, M. and Ghavipankeh, F.; 2008; "Response Surface Methodology (RSM) analysis of organic acid production for kaolin beneficiation by *Aspergillus niger*"; Chemical Engineering Journal, No. 147, pp. 17-28.

[9] Bagci, E., Ekmekci, Z. and Bradshaw, D.; 2007; "Adsorption behaviour of xanthate and dithiophosphinate from their mixtures on chalcopyrite"; Minerals Engineering, No. 20, pp. 1047-1053.

[10] Tuteja, R. K., Spottiswood, D. J. and Misra, V. N.; 1994; "Mathematical models of the column flotation process : A review"; Minerals Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 1459-1472.

[11] Chen, G. L., Tao, D. and Parekh, B. K.; 2006; "A laboratory study of high chromium alloy wear in phosphate grinding mill", Int. J. Miner. Process, No. 80,