

# مطالعه و بررسی سینتیک سمنتاسیون مس

مهدی ایران‌نژاد<sup>i</sup>، مهدی سالاری راد<sup>ii</sup>، میرزا آقا محمدی<sup>iii</sup>

## چکیده

سمنتاسیون یکی از روش‌های بازیابی مس از محلول فروشویی کانسنگ‌های اکسیدی در معادن کوچک مقیاس است. سینتیک سمنتاسیون به علت تأثیر در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این تحقیق، تأثیر عواملی از قبیل شدت همزنی، غلظت مس، pH، سطح آهن و زمان واکنش بر روی سینتیک سمنتاسیون مس از محلول حاصل از فروشویی کانسنگ کانسار چیده بررسی شده است. بدین منظور از طراحی آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل (۲<sup>k</sup> عاملی) استفاده شد. نتایج آزمون معنی داری نشان داد از بین عوامل اصلی، شدت همزنی، pH و غلظت مس و از بین اندرکنشها، اندرکنش بین غلظت مس و pH بیشترین تأثیر را بر روی سینتیک سمنتاسیون دارند. مقادیر عوامل مؤثر در شرایط بهینه در سطوح انتخاب شده و سطح اعتماد مورد نظر برای شدت همزنی، pH، غلظت مس و سطح آهن به ترتیب ۳۰۰ دور بر دقیقه، ۱، ۷ گرم بر لیتر و ۳۱/۲ سانتی‌متر مربع به دست آمد. در این شرایط ثابت سینتیک ۳-۷/۶۶×۱۰ بر دقیقه تخمین زده شد.

## کلمات کلیدی

کانسار چیده، سمنتاسیون مس، طراحی آزمایش‌ها، فاکتوریل کامل، شدت همزنی، غلظت مس، pH، سطح آهن،

زمان

## *Investigation of Copper Cementation Kinetics by Full Factorial Design*

M. Salari rad, M. Irannajad, M. Mohammadi

### ABSTRACT

Cementation is one of the processes employed for recovering Copper from leach liquors especially in small scale mines. The kinetics of cementation is important because of its effect on the capital and operating costs. In this research, the effect of agitation intensity, Cu-concentration, pH, iron surface and reaction time on the cementation kinetics of copper from Cheezeh ore leach liquors has been investigated. The experimental design method was carried out by using the 2<sup>k</sup> factorial approach. Experimental results showed that agitation intensity, Cu-concentration, pH and interaction between Cu-concentration and pH have the most significant effect on cementation kinetics. Optimum conditions were agitation intensity = 300 rpm, pH=1, Cu-concentration= 7 g/l and iron surface= 31.2 cm<sup>2</sup>. The kinetic constant under these conditions was estimated as 7.66\*10<sup>-3</sup> min<sup>-1</sup>.

### KEYWORDS

copper cementation, full factorial, agitation intensity, Cu-concentration, pH, retention time, iron surface

<sup>i</sup> عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

<sup>ii</sup> عضو هیأت علمی، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

<sup>iii</sup> کارشناس ارشد، فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

آن گذشته در هیچ یک از تحقیقات انجام شده از روش‌های آماری برای بررسی این فرآیند استفاده نشده است و در نتیجه اثر متقابل عوامل اصلی (اندرکنش) آنها به صورت جامع گزارش نشده است.

طراحی آزمایش‌ها روشی است که محقق را در مطالعه همزمان چندین فاکتور به طور اقتصادی یاری می‌کند. این روش تکنیک‌های مختلفی دارد. از جمله آنها طرح عاملی<sup>۱</sup> است که به دو دسته کلی طرح عاملی کامل<sup>۲</sup> و طرح عاملی کسری<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. یکی از طرح‌های خیلی مفید از طرح عاملی کامل، طرح<sup>۲</sup> عاملی است. از آنجا که سمناسیون مس بر روی آهن واکنش پیچیده‌ای است و عوامل مختلف در آن اندرکنش‌های پیچیده‌ای با یکدیگر دارند، روش‌های عامل کسری (مثل روش تاکوچی) کارایی لازم برای بررسی این فرآیند را ندارند [۱]. در این پژوهش با استفاده از روش<sup>۲</sup> عاملی کامل به بررسی عوامل مؤثر بر ثابت سینتیک سمناسیون مس از محلول حاصل از فروشویی کانسار چیده پرداخته می‌شود.

## ۲- روش، مواد و تجهیزات

### ۲-۱- شناسایی نمونه

#### تعیین کیفی کانی‌ها به روش XRD

برای شناسایی کیفی کانی‌شناسی نمونه از آنالیز XRD استفاده شد. نتایج آنالیز XRD برای نمونه معرف به شرح جدول (۱) است.

جدول (۱): نتایج آنالیز XRD

ترتیب اهمیت	کانی	ترکیب شیمیایی
۱	کوارتز	SiO <sub>2</sub>
۲	الکوکلاز	NaCaAl <sub>2</sub> Si <sub>7</sub> O <sub>8</sub>
۳	کلریت	FeMgAlSi <sub>9</sub> O <sub>9</sub> OH
۴	K فلدسپار	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
۵	مالاکیت	CuCO <sub>3</sub> Cu(OH)
۶	کلسیت	CaCO <sub>3</sub>

#### تعیین ترکیب شیمیایی نمونه بوسیله XRF

برای تعیین ترکیب شیمیایی نمونه از آنالیز XRF استفاده شد. نتایج این آنالیز در جدول (۲) آمده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که نمونه حاوی ۲/۷۶ درصد CuO معادل ۳ درصد مس می‌باشد. آنالیز تر به روش جذب اتمی نیز نشان داد که نمونه حاوی ۲/۰۲ درصد مس است.

ایران از نظر کانه زایی مس از پتانسیل‌های خوبی برخوردار است. کانسارهای مس طارم سفلی از مجموعه کانسارهایی است که در زون طارم قرار دارد و شامل چندین کانسار مس اکسیده است. از جمله معروف‌ترین آنها می‌توان به کانسار چیده اشاره کرد [۳] که تحقیق حاضر بر روی نمونه آن انجام شده است. این کانسار در ۹۰ کیلومتری شمال غرب قزوین و در ۴۰ کیلومتری شمال ابهر و ۳ کیلومتری جنوب غرب روستای چیده واقع شده است [۴]. میزان ذخیره آن ۵ میلیون تن کانسنگ با عیار متوسط ۲ درصد مس تخمین زده شده است [۱]، [۲]، [۵].

کانسارهای اکسیدی مس غالباً به روش هیدرومتالورژی فرآوری می‌شوند [۶]، [۸]. بر اساس مطالعات اولیه آزمایشگاهی، روش‌های فروشویی مخزنی<sup>۱</sup> و همزنی<sup>۲</sup> در محلول اسید سولفوریک برای استحصال مس این کانسار توصیه شده است [۲]، [۴]، [۵].

مرحله نهایی هر فرآیند هیدرومتالورژیکی بازیابی فلز از محلول فروشویی است. برای بازیابی مس از محلول فروشویی روش‌های مختلفی از جمله ترسیب<sup>۱</sup>، سمناسیون<sup>۲</sup>، احیای الکتریکی مستقیم<sup>۳</sup>، استخراج حلالی-احیای الکتریکی (SX-EW)<sup>۴</sup> پیشنهاد شده است [۶]، [۷]، [۸]. این کانسار با توجه به ذخیره آن در رده کانسارهای کوچک مقیاس قرار می‌گیرد؛ بنابراین سمناسیون به علت سهولت و عدم پیچیدگی فرآیند و پایین بودن میزان سرمایه‌گذاری اولیه و همچنین در دسترس بودن فراوان آهن قراضه و نیروی کار ارزان از جمله گزینه‌های مورد توجه است.

برای توسعه فرآیند استحصال مس ابتدا در مقیاس آزمایشگاهی تأثیر عوامل مختلف ارزیابی می‌شود. سمناسیون مس از جنبه‌های مختلفی قابل بررسی است؛ ولی در این بین سینتیک سمناسیون از اهمیت بیشتری برخوردار است. افزایش سینتیک واکنش باعث کاهش حجم رآکتور و در نتیجه باعث کاهش حجم سرمایه‌گذاری اولیه می‌شود. از طرف دیگر، یکی از علل مصرف زیاد آهن (بیشتر از مقدار استوکیومتری)، انحلال آن با اسید است که رابطه مستقیم با زمان ماند در رآکتور دارد. افزایش سینتیک باعث کاهش زمان ماند و در نتیجه کاهش مصرف آهن و هزینه عملیاتی خواهد شد [۱۱]، [۱۲].

سینتیک سمناسیون مس را محققین مختلف بررسی کرده‌اند [۹]–[۱۲]. اما در اکثر این تحقیقات از محلول‌های مس مصنوعی استفاده شده است. این محلول‌ها پیچیدگی خاص محلول‌های حاصل از فروشویی کانسارهای مس را ندارند. از

## ۲-۲- آماده سازی محلول باردار اولیه

یکی از عوامل مؤثر بر سینتیک سمنتاسیون ترکیب محلول باردار است که غلظت مس و pH محلول از پارامترهای مهم آن است. تهیه محلول با pH و غلظت‌های مختلف مس به روش فروشویی کاری مشکل و حتی غیر عملی است؛ بنابراین بهترین راه حل این است که ابتدا محلولی با غلظت زیاد مس و pH بالا تهیه کرد، سپس در مراحل بعد، محلول فوق را تا غلظت مورد نظر رقیق و همزمان pH آن را با اسید سولفوریک تنظیم کرد. عکس این موضوع، یعنی افزایش غلظت مس با تبخیر و یا خنثی‌سازی اسید و افزایش pH با آهک ممکن است اثر نامطلوب در فرآیند داشته باشد.

شرایط فروشویی برای تهیه محلول باردار اولیه؛ یعنی مقدار اسید مصرفی، دانه بندی ذرات، زمان فروشویی و سایر پارامترها بر اساس شرایط بهینه عملیات فروشویی در نظر گرفته شده است [۲]، [۴]، [۵].

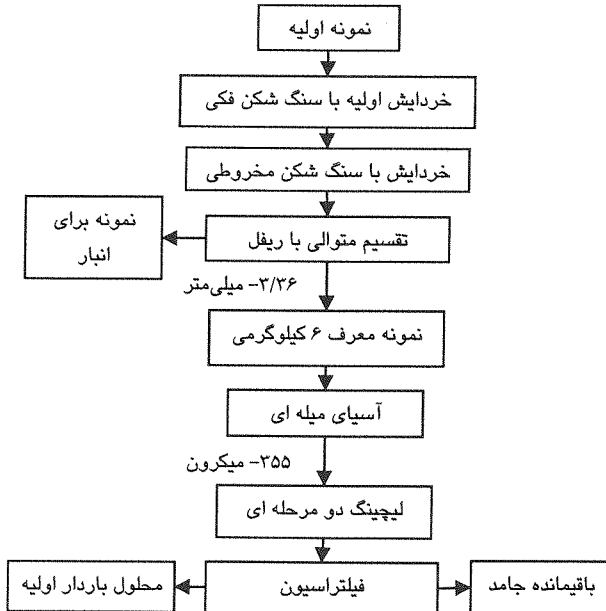
جدول (۲): نتایج آنالیز XRF

ردیف	عنصر یا اکسید عناصر	درصد وزنی
۱	Na <sub>2</sub> O	۲/۱۵
۲	MgO	۱/۹۶
۳	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵/۱۰
۴	SiO <sub>2</sub>	۵۷/۲۰
۵	K <sub>2</sub> O	۲/۱۳
۶	CaO	۲/۱۶
۷	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵/۸۰
۸	MnO	۰/۱۶۶
۹	CuO	۳/۷۶
۱۰	S	۰/۰۹۷
۱۱	ZnO	۰/۰۰۸
۱۲	بقیه عناصر	۲/۰۹۹
۱۳	L.O.I	۵/۳۷

آماده سازی نمونه طبق فلوشیت شکل (۱) انجام گرفت. برای تهیه محلول بار دار اولیه ۳ کیلوگرم نمونه با دانه بندی ۳۵۵- میکرون با ۲۸۰ گرم اسید طی دو مرحله فروشویی شد. بدین منظور، ابتدا ۱/۵ کیلوگرم نمونه با ۱/۵ لیتر محلول حاوی ۱۴۰ گرم اسید طی ۴ ساعت با روش همزنی با دور ۷۰۰ دور بر دقیقه اسید شویی شد؛ پس از فیلتراسیون و جداسازی فاز جامد از مایع، به محلول حاصل ۱۴۰ گرم اسید اضافه کرده و حجم آن به ۱/۵ لیتر رسانده شد. سپس مرحله دوم فروشویی با شرایط یاد شده تکرار شد. محلول حاصل از انحلال دو مرحله ای حاوی ۴۵/۶ گرم بر لیتر مس، ۲/۶ گرم بر لیتر آهن بوده و pH محلول نیز در حدود ۲ به دست آمد.

## ۳-۲- فرآیند سمنتاسیون

راکتور سمنتاسیون، استوانه‌ای به قطر ۶ و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر از جنس پلکسی گلاس بوده که برای همزدن آن از شیکر اریبتالی IKA استفاده شد. در این آزمایش‌ها از ورقه‌های آهنی به ابعاد ۵×۳×۰/۷ سانتی‌متر (با مساحت ۳۱/۲ سانتی‌متر مربع) و از نوع ST37 استفاده شد. اسید مصرفی نیز محصول شرکت پارس شیمی با غلظت ۹۸-۹۵ درصد بود.



شکل (۱): نمودار آماده سازی نمونه و فروشویی دو مرحله‌ای

با افزودن آب مقطر به مقدار معینی از محلول باردار اولیه و تنظیم هم زمان pH محلول، حجم آن به ۷۰ میلی لیتر رسانده شد؛ سپس بعد از ریختن محلول رقیق شده در رآکتور سمنتاسیون و قرار دادن ورقه آهنی به تعداد معین در آن با شیکر اریبتالی به مدت معین با شدت مشخص هم زده شد؛ سپس بعد از فیلتر شدن محلول مذکور نمونه ای از آن برای اندازه‌گیری مقدار مس و آهن به آزمایشگاه ارسال شد. با مشخص شدن مقدار مس موجود در محلول باردار اولیه، و بعد از سمنتاسیون، مقدار مس ترسیبی و در نتیجه، ثابت سینتیک سمنتاسیون با استفاد از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

## ۴-۴- طراحی آزمایش‌ها

برای بررسی سینتیک سمنتاسیون از روش طراحی آزمایش‌ها به روش ۲<sup>k</sup> عاملی کامل استفاده شده است. طراحی آزمایش‌ها به روش ۲<sup>k</sup> عاملی شامل هفت مرحله است که در بخش بحث و بررسی نتایج به توضیح آن پرداخته می‌شود. برای محاسبه عملیات ریاضی و تحلیل آماری در این تحقیق

از نرم‌فزار Design-Expert استفاده شد. این نرم افزار محصول شرکت Statease و از قابلیت‌های زیادی در محاسبات آماری و طراحی آزمایش‌ها برخوردار است [۱۳].

### ۳- بحث و بررسی نتایج

**مرحله اول (انتخاب متغیر پاسخ):** معیار ارزیابی فرآیند، متغیر پاسخ نامیده می‌شود. معیارهای ارزیابی سممتاسیون مس معمولاً سینتیک واکنش، بازیابی مس و مصرف آهن است. با توجه به مطالب عنوان شده سینتیک سممتاسیون از عوامل مؤثر در فرآیند استحصال مس و پارامترهای اقتصادی آن است و در نتیجه معیار مناسبی برای ارزیابی و بهینه‌سازی شرایط سممتاسیون است.

طبق تحقیقات زیادی؛ که محققین مختلف انجام داده‌اند [۴]، [۵]، [۶] اثبات شده است که سینتیک سممتاسیون از مرتبه اول است و طبق رابطه ۱ بیان می‌شود. در این رابطه،  $C_0$  غلظت اولیه مس،  $C_t$  غلظت مس بعد از طی زمان  $t$ ،  $A$  سطح آهن در معرض واکنش و  $k$  ثابت سینتیکی ویژه است.

$$\frac{dc}{dt} = kAc \implies k = -\frac{1}{tA} \ln \frac{C_t}{C_0} \quad (1)$$

**مرحله دوم (انتخاب عوامل و سطوح تغییرات):** عوامل زیادی بر سینتیک واکنش سممتاسیون تأثیرگذارند؛ اما آنچه به طور اقتصادی قابل کنترل است پنج عامل شدت همزنی، pH، غلظت مس، زمان و سطح آهن است. سطوح عوامل به شرح جدول (۳) انتخاب شدند. سطوح عوامل در محدوده‌ای انتخاب شده است که در آن محدوده، تغییرات عوامل یکنوا (صعودی یا نزولی) باشد.

**مرحله سوم (تشکیل جدول استاندارد):** در این طرح، ۵ عامل در دو سطح می‌بایست بررسی شود؛ بنابراین باید  $2^5 = 32$  آزمایش انجام داد که به تبع آن، ۳۲ ترکیب آزمایش نیز خواهیم داشت. جدول (۴)، جدول استاندارد این طرح را نشان می‌دهد.

جدول (۳): عوامل و سطوح تغییرات

عوامل	علامت	سطح پایین	سطح بالا
شدت همزنی (rpm)	A	۱۵۰	۳۰۰
pH	B	۱	۲/۵
غلظت مس (g/l)	C	۳	۷
سطح آهن (cm <sup>2</sup> )	D	۳۱/۲	۶۲/۴
زمان (min)	E	۵	۱۰

**مرحله چهارم (انجام آزمایش‌ها):** آزمایش‌ها طبق ترکیب آزمایش و همچنین برای حذف تأثیر عوامل غیر قابل کنترل بصورت تصادفی انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۴) سممتاسیون می‌شود.

درج شده است.

**مرحله پنجم (تشکیل جدول ANOVA):** جدول ANOVA شامل محاسبه اثر عوامل و درصد تأثیر آنها، مجموع مربعات و میانگین مجموع مربعات (واریانس) عوامل، اندرکنش‌ها و خطا و نسبت فیشر (F) است. در جدول (۴) طرح استاندارد و ANOVA اولیه مربوط به آزمایش‌ها آمده است.

بعلت عدم تکرار آزمایش‌ها، مجموع مربعات و میانگین مجموع مربعات خطا صفر است؛ بنابراین باید از روش دانبل برای محاسبه خطا استفاده کرد [۱۴]. شکل (۲) نتایج رسم اثرها را در روی نمودار نیم-نرمال نشان می‌دهد. از این شکل کلیه نقاطی که روی یک خط مستقیم قرار می‌گیرند انتخاب می‌شوند. این نقاط؛ که اثرهای عوامل با تأثیر ناچیز را نشان می‌دهد، به عنوان منبع خطا در نظر گرفته می‌شود. جدول (۵) نیز جدول ANOVA اصلاح شده را نشان می‌دهد.

**مرحله ششم (آزمون معنی‌داری):** برای آزمون معنی‌داری می‌بایست نسبت F را حساب کرد. نسبت F از تقسیم میانگین مجموع مربعات عوامل بر میانگین مجموع مربعات خطا به دست می‌آید. جدول (۵) نسبت F محاسبه شده و نتایج آزمون معنی‌داری را نشان می‌دهد. مقدار  $F_{(1, 20)} = 4/35$  نشان می‌دهد که در ۹۵ درصد عوامل و اندرکنش‌های معنی‌دار به ترتیب اهمیت A, B, C, BC, B, ADE, AD, ACE, AE, CD, C, BE, ABC هستند.

با تجزیه و تحلیل جدول ANOVA مشخص می‌شود که بیشترین تأثیر را شدت همزنی، pH، غلظت مس و اندرکنش pH و غلظت مس بر سینتیک سممتاسیون داشته‌اند.

شکل (۳) نمودار تأثیر شدت همزنی را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل سینتیک سممتاسیون با افزایش شدت همزنی افزایش می‌یابد. این مطلب حاکی از آن است که سینتیک سممتاسیون به وسیله انتقال جرم و دیفوزیون از لایه مرزی کنترل می‌شود. افزایش شدت همزنی باعث تسریع در انتقال یون‌های مس به این لایه و همچنین کاهش ضخامت لایه مرزی شده و در نتیجه باعث افزایش سینتیک سممتاسیون می‌شود.

شکل (۴) نمودار تأثیر pH را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است سینتیک واکنش با افزایش pH کاهش می‌یابد. علت این پدیده هنوز به خوبی مشخص نیست؛ ولی ممکن است علت آن کاهش شستشوی سطح آهن در اسیدیته پایین باشد.

شکل (۵) نمودار تأثیر غلظت مس را نشان می‌دهد. طبق این شکل سینتیک واکنش با افزایش غلظت مس در محلول افزایش می‌یابد. علت این پدیده افزایش رسوب مس در واحد زمان و در نتیجه افزایش سطح کاتدی است که باعث افزایش سینتیک سممتاسیون می‌شود.

تأثیر شدت همزنی در سطح آهن بالا کمتر از سطح آهن پایین است. این پدیده بخوبی در نمودار شکل (۶) نمایان است. علت آن را می‌توان به همزنی زیاد محیط در سطوح پایین آهن و در نتیجه انتقال جرم بالا نسبت داد.

تأثیر شدت همزنی در زمان‌های طولانی کمتر از زمان‌های کوتاه است. این پدیده در شکل (۷) نمودار اندرکنش زمان و شدت همزنی بخوبی مشخص است. علت آن احتمالاً ناشی از کاهش غلظت مس در طی زمان است، وجود اندرکنش بین شدت همزنی، زمان و غلظت مس درستی این فرض را تقویت می‌کند.

تأثیر pH بر روی سینتیک سمنتاسیون در غلظت بالای مس خیلی بیشتر است، این در حالی است که در غلظت پایین افزایش pH تأثیر چندانی در سینتیک ندارد. این پدیده در شکل (۸) نمودار اندرکنش pH و غلظت نشان داده شده است؛ بنابراین در سیستم‌هایی که بتوان از غلظت بالای مس استفاده کرد بهتر است pH محلول پایین باشد.

تأثیر pH بر روی سینتیک سمنتاسیون با افزایش زمان بیشتر است. این موضوع در نمودار شکل (۹) قابل مشاهده است. تأثیر غلظت مس در افزایش سینتیک سمنتاسیون با افزایش سطح آهن افزایش می‌یابد. این مطلب در شکل (۱۰) نمودار اندرکنش غلظت مس و سطح آهن نمایان است. علت این پدیده ممکن است افزایش رسوب مس در واحد زمان و در نتیجه افزایش سطح کاتدی باشد.

در سطح اعتماد ۹۵ درصد بین pH، غلظت مس و شدت همزنی اندرکنش وجود دارد. بر اساس این اندرکنش، تأثیر شدت همزنی در pH پایین در غلظت مس بالا بیشتر از غلظت مس پایین است؛ ولی تأثیر شدت همزنی در pH بالا برعکس این روند است. نمودار شکل (۱۱) این مطلب را به وضوح نشان می‌دهد؛ بنابراین بهتر است در سیستم‌های با همزنی بالا مثل استوانه گردان و تا اندازه‌ای مخروط کهنه‌کات<sup>۱</sup> از غلظت مس بالا و pH پایین استفاده کرد.

تأثیر شدت همزنی در زمان‌های طولانی در غلظت مس بالا بیشتر از غلظت مس پایین است، در حالی که در زمان‌های کوتاه برعکس است. شاید علت آن تشکیل لایه مس در طی زمان باشد که در شدت بالا این لایه از سطح آهن جدا می‌شود؛ ولی در شدت پایین جدا نمی‌شود. شکل (۱۲) این پدیده را نشان می‌دهد.

در زمان‌های کوتاه سطح آهن تغییری در تأثیر شدت همزنی ندارد. در حالی که در زمان‌های طولانی‌تر تأثیر شدت همزنی در سطح آهن پایین بیشتر از سطح آهن بالاست. این پدیده ممکن است ناشی از کاهش غلظت مس در طی زمان باشد. این پدیده در نمودار شکل (۱۳) قابل مشاهده است.

شرایط بهینه در این آزمایش‌ها مطابق با آزمایش ۲۲ است

و سینتیک سمنتاسیون در این نقطه با توجه به نمودار شکل (۱۴)  $7/66 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$  تخمین زده می‌شود.

مرحله هفتم (بازبینی تشخیص کفایت مدل): برای بررسی بازبینی کفایت مدل، نمودار مانده‌ها در کاغذ احتمال نرمال رسم می‌شود. در صورتی که مانده‌ها در امتداد یک خط راست توزیع شده باشند طرح آزمایش‌ها درست و اشتباهی در آزمایش‌ها رخ نداده است. شکل (۱۵) نمودار مانده‌های این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد که مؤید درستی طرح آزمایش‌ها است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

از بررسی پارامترها و عوامل مختلف مورد مطالعه نتایج زیر را می‌توان جمع بندی کرد.

نتایج طراحی آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سمنتاسیون مس بر روی آهن واکنش پیچیده‌ای است و اندرکنش‌های زیادی بین عوامل مؤثر بر سنتیک آن وجود دارد. بنابراین جامع‌ترین روش مؤثر برای بررسی آن، روش عاملی کامل است.

عوامل اصلی با تأثیر معنی‌دار در سطح اعتماد ۹۵ درصد به ترتیب اهمیت، شدت همزنی، pH و غلظت مس هستند. اندرکنش‌های معنی‌دار نیز به ترتیب اهمیت BC, AD, AE, CD, ACE, ADE, ABC و BE می‌باشند؛ ولی از این بین عوامل مختلف شدت همزنی، pH، غلظت مس و اندرکنش غلظت و pH بیشترین تأثیر را بر روی سینتیک سمنتاسیون دارند، به طوری که سینتیک سمنتاسیون با افزایش شدت همزنی و غلظت مس و کاهش pH افزایش می‌یابد. وجود اندرکنش بین غلظت و pH نشان می‌دهد که در شرایطی که غلظت مس محلول بالاست بهتر است pH محلول پایین باشد.

وجود اندرکنش بین شدت همزنی، سطح آهن و زمان نشان می‌دهد در موقع استفاده از رآکتورهای با شدت همزنی بالا و زمان ترسیب پایین می‌توان از قراضه آهن با دانه بندی درشت تر استفاده کرد. بدین ترتیب هزینه عملیاتی کاهش پیدا خواهد کرد. ولی در مورد رآکتورهایی مانند لاندرا با زمان ترسیب طولانی بهتر است از قراضه آهن با دانه بندی ریزتر استفاده شود.

با توجه به وجود اندرکنش بین pH، غلظت مس و شدت همزنی و نحوه تأثیر آن بهتر است در سیستم‌های با همزنی بالا مثل استوانه گردان و تا اندازه‌ای مخروط کهنه‌کات از غلظت مس بالا و pH پایین و در سیستم‌های با شدت همزنی پایین مثل لاندرا از غلظت مس پایین و pH بالا استفاده کرد.

شرایط بهینه در این آزمایش‌ها،  $\text{pH}=1$ ، شدت همزنی rpm ۳۰۰، غلظت مس  $7 \text{ g/l}$  و سطح آهن  $31/2 \text{ cm}^2$  به دست آمد. ثابت سینتیک در این شرایط  $7/66 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$  تخمین زده

می‌شود.

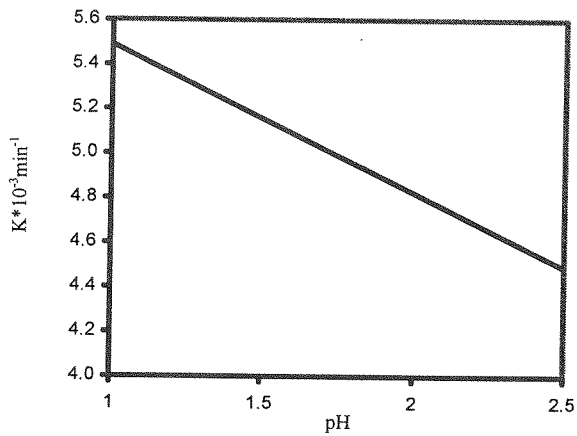
می‌دهد که بهینه سازی شرایط سم‌تاسیون برای سیستم‌های مختلف سم‌تاسیون مثل لاندروم، مخروط کنه کات و استوانه گردان باید بطور مجزا انجام شود.

اهمیت بیشتر عوامل شدت همزنی، pH و غلظت مس و همچنین وجود اندرکنش‌های پیچیده بین این سه عامل نشان

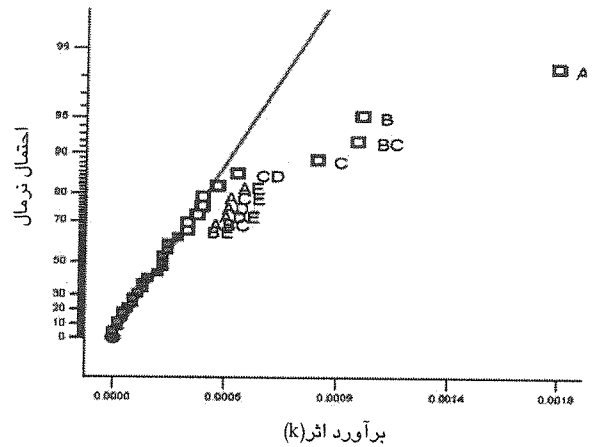
جدول (۴): ترکیب تیماری همراه با متغیر پاسخ و پارامترهای آماری

CP (%)	SS $\times 10^{-6}$	MS $\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2} K \text{ min}^{-1}$	زمان (min)	سطح آهن (cm <sup>2</sup> )	غلظت مس (g/l)	pH	شدت همزنی rpm	ترکیب	آزمایش
---	---	---	۲/۵۲	۵	۲۱/۲	۲	۱/۰۰	۱۵۰	i	۱
۴۴/۶۹	۲۶/۰۰	۱/۸۰	۵/۴۵	۵	۲۱/۲	۲	۱/۰۰	۲۰۰	a	۲
۱۲/۷۹۸	۸/۰۲	-۱/۰۰	۲/۵۲	۵	۲۱/۲	۲	۲/۵۰	۱۵۰	b	۳
۰/۵۵	۰/۲۲	-۰/۲۰	۷/۰۵	۵	۲۱/۲	۲	۲/۵۰	۲۰۰	ab	۴
۹/۲۷	۵/۴۰	-۰/۸۲	۴/۸۱	۵	۲۱/۲	۷	۱/۰۰	۱۵۰	c	۵
۰/۴۵	۰/۲۶	-۰/۱۸	۶/۷۳	۵	۲۱/۲	۷	۱/۰۰	۲۰۰	ac	۶
۱۲/۲۵	۷/۷۱	-۰/۹۸	۲/۲۱	۵	۲۱/۲	۷	۲/۵۰	۱۵۰	bc	۷
۱/۲۴	۰/۷۲	-۰/۲۰	۴/۸۱	۵	۲۱/۲	۷	۲/۵۰	۲۰۰	abc	۸
۰/۲۰	-۰/۱۲	-۰/۱۲	۲/۲۱	۵	۶۲/۴	۲	۱/۰۰	۱۵۰	d	۹
۱/۷۹	۱/۰۴	-۰/۳۶	۵/۹۳	۵	۶۲/۴	۲	۱/۰۰	۲۰۰	ad	۱۰
۰/۵۵	۰/۲۲	-۰/۲۰	۲/۰۴	۵	۶۲/۴	۲	۲/۵۰	۱۵۰	bd	۱۱
۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۴	۵/۹۳	۵	۶۲/۴	۲	۲/۵۰	۲۰۰	abd	۱۲
۲/۴۵	۲/۰۱	-۰/۵۰	۵/۶۱	۵	۶۲/۴	۷	۱/۰۰	۱۵۰	cd	۱۳
-۰/۰۱	-۰/۰۰	-۰/۰۲	۷/۶۹	۵	۶۲/۴	۷	۱/۰۰	۲۰۰	acd	۱۴
-۰/۶۷	۰/۳۹	-۰/۲۲	۴/۳۳	۵	۶۲/۴	۷	۲/۵۰	۱۵۰	bcd	۱۵
۰/۱۴	-۰/۰۸	-۰/۱۰	۵/۴۵	۵	۶۲/۴	۷	۲/۵۰	۲۰۰	abcd	۱۶
-۰/۰۵	-۰/۰۲	-۰/۰۶	۲/۵۲	۱۰	۲۱/۲	۲	۱/۰۰	۱۵۰	e	۱۷
۲/۴۲	۱/۴۲	-۰/۴۲	۵/۷۷	۱۰	۲۱/۲	۲	۱/۰۰	۲۰۰	ae	۱۸
۱/۲۴	۰/۷۲	-۰/۲۰	۲/۱۵۵	۱۰	۲۱/۲	۲	۲/۵۰	۱۵۰	be	۱۹
۰/۹۲	-۰/۵۴	-۰/۲۶	۵/۴۵	۱۰	۲۱/۲	۲	۲/۵۰	۲۰۰	abe	۲۰
۰/۵۵	۰/۲۲	-۰/۲۰	۴/۸۱	۱۰	۲۱/۲	۷	۱/۰۰	۱۵۰	ce	۲۱
۱/۷۹	۱/۰۴	-۰/۳۶	۸/۰۱	۱۰	۲۱/۲	۷	۱/۰۰	۲۰۰	ace	۲۲
-۰/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۰۸	۲/۵۲	۱۰	۲۱/۲	۷	۲/۵۰	۱۵۰	bce	۲۳
-۰/۰۹	-۰/۰۵	-۰/۰۸	۴/۸۱	۱۰	۲۱/۲	۷	۲/۵۰	۲۰۰	abce	۲۴
۰/۲۷	۰/۱۶	-۰/۱۴	۴/۲۳	۱۰	۶۲/۴	۲	۱/۰۰	۱۵۰	de	۲۵
۱/۵۹	۰/۹۳	-۰/۳۴	۴/۹۷	۱۰	۶۲/۴	۲	۱/۰۰	۲۰۰	ade	۲۶
-۰/۰۱	-۰/۰۰	-۰/۰۲	۲/۶۹	۱۰	۶۲/۴	۲	۲/۵۰	۱۵۰	bde	۲۷
۰/۶۷	۰/۳۹	-۰/۲۲	۴/۰۱	۱۰	۶۲/۴	۲	۲/۵۰	۲۰۰	abde	۲۸
۰/۲۰	۰/۱۲	-۰/۱۲	۶/۰۹	۱۰	۶۲/۴	۷	۱/۰۰	۱۵۰	cde	۲۹
۰/۰۲	۰/۰۱	-۰/۰۴	۷/۳۷	۱۰	۶۲/۴	۷	۱/۰۰	۲۰۰	acde	۳۰
-۰/۰۰	-۰/۰۰	-۰/۰۰	۴/۳۳	۱۰	۶۲/۴	۷	۲/۵۰	۱۵۰	bcde	۳۱
-۰/۰۰	-۰/۰۰	-۰/۰۰	۴/۸۱	۱۰	۶۲/۴	۷	۲/۵۰	۲۰۰	abcde	۳۲

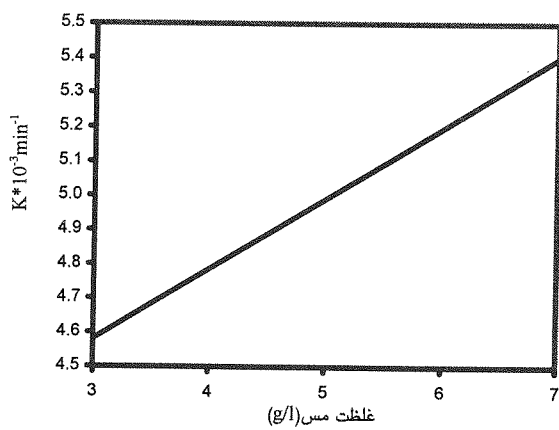
MS = تأثیر متوسط؛ SS = مجموع مربعات؛ CP = سهم تأثیر



شکل (۴): تأثیر pH بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



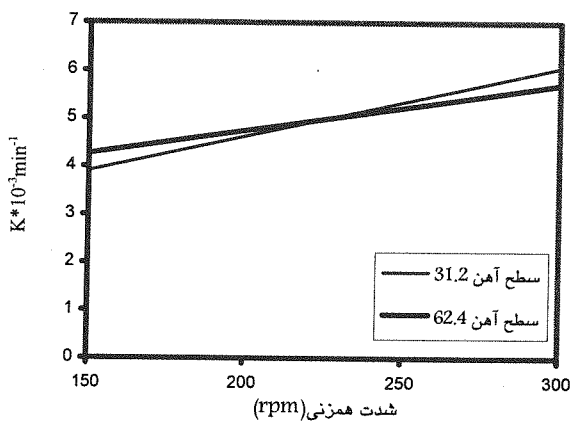
شکل (۲): اثرها بر روی کاغذ نیم نرمال و انتخاب عوامل معنی دار



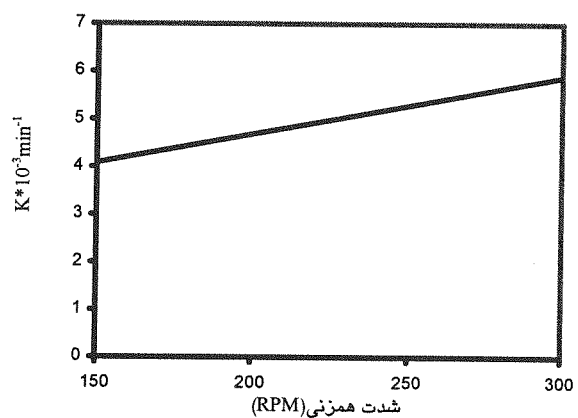
شکل (۵): تأثیر غلظت مس بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)

جدول (۵): جدول ANOVA و آزمون معنی داری

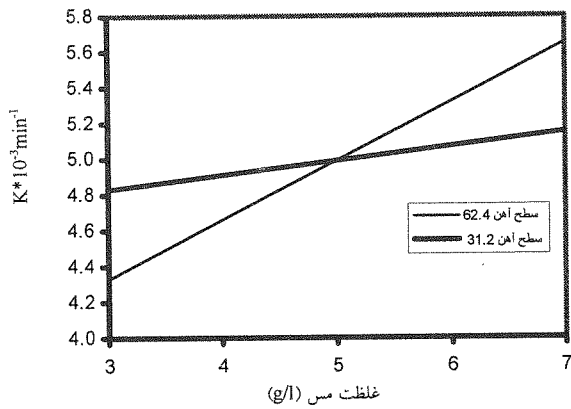
عوامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات میانگین	نسبت F
مدل	۵۵/۰۱	۱۱	۵/۰۰	۳۱/۵۰
A	۲۶/۰۰	۱	۲۶/۰۰	۱۶۳/۸۰
B	۸/۰۳	۱	۸/۰۳	۵۰/۵۶
C	۵/۴۰	۱	۵/۴۰	۳۳/۹۹
AD	۱/۰۴	۱	۱/۰۴	۶/۵۵
AE	۱/۴۲	۱	۱/۴۲	۸/۹۲
BC	۷/۷۱	۱	۷/۷۱	۴۸/۵۵
BE	۰/۷۲	۱	۰/۷۲	۴/۵۵
CD	۲/۰۱	۱	۲/۰۱	۱۲/۶۴
ABC	۰/۷۲	۱	۰/۷۲	۴/۵۵
ACE	۱/۰۴	۱	۱/۰۴	۶/۵۵
ADE	۰/۹۳	۱	۰/۹۳	۵/۸۴
خطا	۳/۱۷	۲۰	۰/۱۶	



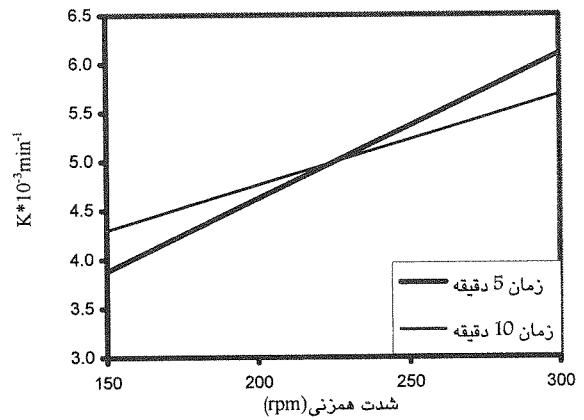
شکل (۶): تأثیر اندرکنش AD بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



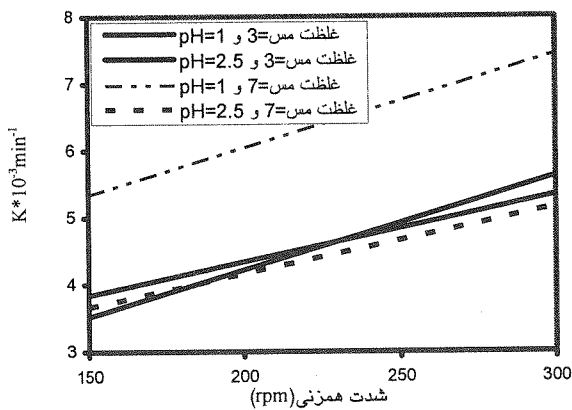
شکل (۳): تأثیر شدت همزنی بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



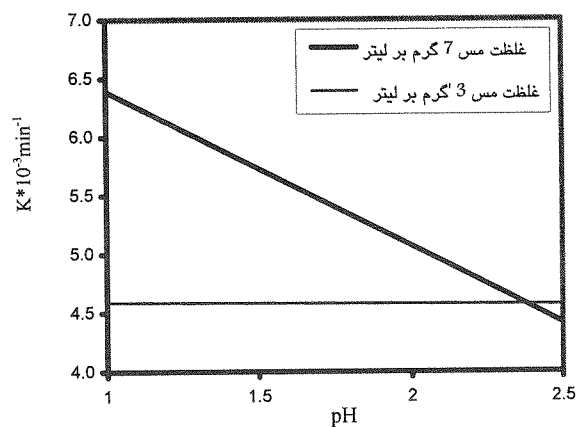
شکل (۱۰): تأثیر اندرکنش CD بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



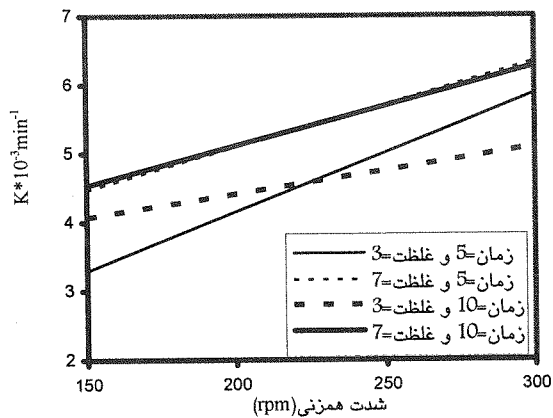
شکل (۷): تأثیر اندرکنش AE بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



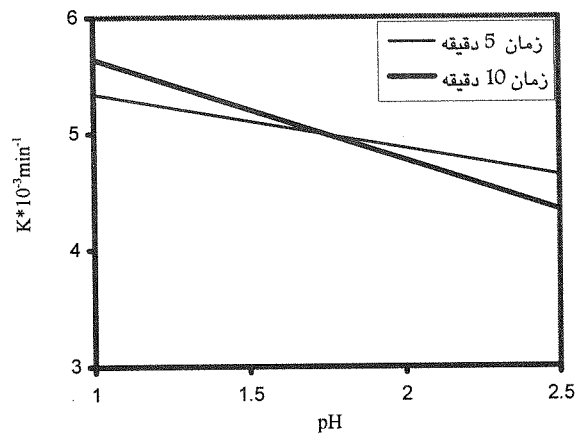
شکل (۱۱): تأثیر اندرکنش ABC بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



شکل (۸): تأثیر اندرکنش BC بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



شکل (۱۲): تأثیر اندرکنش ACE بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)

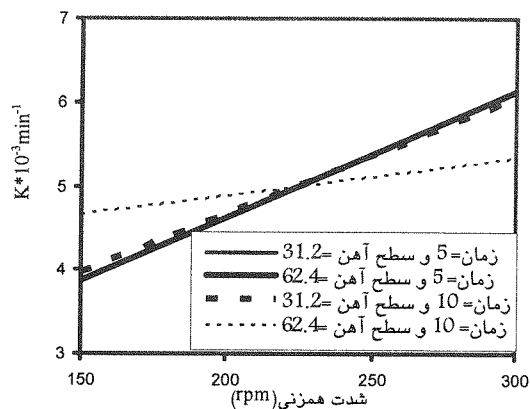


شکل (۹): تأثیر اندرکنش BE بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)

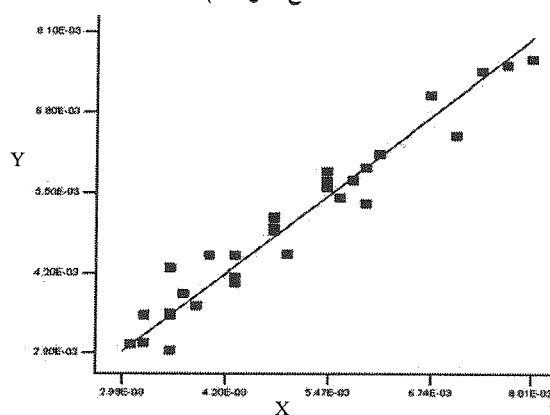


## ۶- مراجع

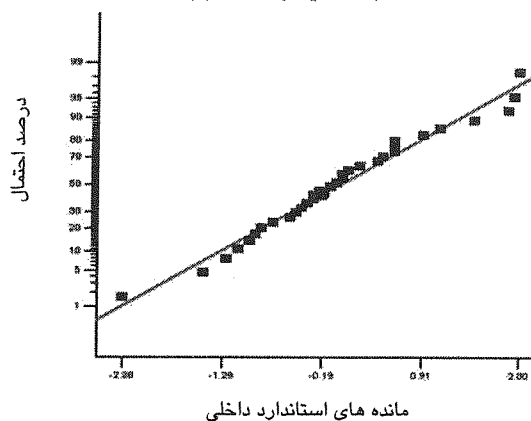
- [۱] محمدی، میرزاآقا؛ مطالعات امکان سنجی بازیابی مس از محلول لیچ کانسارهای اکسیده مس طارم سفلی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۱.
- [۲] ایران نژاد، مهدی؛ "مطالعات سیستماتیک فرآوری کانسنگ منطقه طارم برای بهینه سازی فرآیند لیچ مس و افزایش راندمان"، گزارش نهایی طرح تحقیقات صنعتی، آموزش و اطلاع رسانی(تاوا)، وزارت صنایع و معادن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- [۳] گزارش‌های شرکت توسعه معادن مس ماهین، ۱۳۷۸.
- [۴] شاهوردی، اکبر؛ مطالعه امکان سنجی لیچینگ کانسارهای اکسیده مس طارم سفلی، پروژه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- [۵] ایران نژاد، مهدی؛ شاهوردی، اکبر؛ سالاری‌راد، مهدی؛ "لیچینگ کانسنگ اکسیده مس چیده"، مجموعه مقالات کنفرانس مهندسی معدن، جلد دوم، ۱۳۸۳.
- [۶] Fathi Habashi. , A Text Book Of Hydrometallurgy. John Wiley & Sons. 1998
- [۷] Jackson E. Hydrometallurgical extraction and reclamation. ELLIS Wood Limited and John Wily & Sons. 1986.
- [۸] Biswas A.K. Davenport W.G. Extractive Metallurgy of Copper. Pergamon Press. 1980.
- [۹] Stefanowicz Tadeusz. Copper recovery by the cementation method. International journal of hydrometallurgy, pp 69-90. 1997.
- [۱۰] Balberyszski T. Optimization of process for a continuous copper cementation system. symposium on solution mining, pp 1095-1124, 1974.
- [۱۱] Schlitt W.J. and Richrds k.J. Chemical Aspects of Copper Cementation. Symposium of Solution Mining, pp 401 – 421. 1973.
- [۱۲] Biswas A.K. Investment Of The Cementation Of Copper On Iron. prc.Aust.inst.min.met. pp 37-45. 1972.
- [۱۴] www. Statease.com. 2005
- [۱۵] Montgomery Douglas C. Design and analysis of experiments. Third Edition. John Wiley & Sons. 1991.



شکل (۱۳): تأثیر اندرکنش ADE بر ثابت سینتیک (سایر عوامل در سطح متوسط)



شکل (۱۴): مقایسه سینتیک سمنتاسیون اندازه‌گیری شده (x) در مقابل تخمین زده شده (y)



شکل (۱۵): نمودار مانده‌ها بر روی کاغذ نرمال

## ۵- تقدیر و تشکر

این مقاله از نتایج طرح تحقیقاتی منعقد بین وزارت صنایع و معادن و دانشگاه صنعتی امیر کبیر به نگارش در آمده است. بدین وسیله از تأمین مالی آن توسط طرح تاوا تشکر و قدردانی می‌شود.

- ۱ Vat leaching
- ۲ Agitation leaching
- ۳ Precipitation
- ۴ Cementation
- ۵ Direct electro wining
- ۶ Solvent extraction-electrowining
- ۷ Factorial design
- ۸ Full factorial
- ۹ Fractional factorial
- ۱۰ Kennecott