نشریه علوم و مهندسی جداسازی
دوره سیزدهم ، شماره دوم، سال ۱۴۰۰ ، صفحه ۱-۱۲

Journal of Separation Science and Engineering
Vol. 13, No. 2, (2022), pp. 1-12

# تاثیر pH و مواد شیمیایی بر پایداری کف در فلوتاسیون مس؛ مطالعه موردی: کارخانه فرآوری مس محمد آباد دلیجان

**محمود برفه‌ای ، غلامعباس پارساپور ***

گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران

**مشخصات مقاله**

**تاریخچه مقاله:**
**دریافت: ۱۸ اسفند ۱۳۹۹**
**دریافت پس از اصلاح: ۲۴ شهریور ۱۴۰۰**
**پذیرش نهایی: ۴ ابان ۱۴۰۰**

**کلمات کلیدی:**
فلوتاسیون
آهک
pH
پایداری کف

**چکیده**

در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی، تنظیم pH و میزان مصرف مواد شیمیایی بسیار مهم است. در بیشتر مدارهای فلوتاسیون مس، pH با توجیه افزایش پایداری کف بسیار بیشتر از حالت استاندارد است. در این تحقیق با هدف تعیین تاثیر pH و مواد شیمیایی بر پایداری کف، آزمون‌های فلوتاسیون با خوراک تهیه شده از کارخانه فرآوری مس محمدآباد دلیجان با روش تاگوچی طراحی و پایداری کف با تعیین نیمه عمر کف بررسی گردید. نتایج نشان داد که بر خلاف نظر معمول در بیشتر کارخانه‌ها، تاثیر pH بر پایداری کف بارز نیست. در مقابل تاثیر بارز کلکتورهای Z11 و TC15 بر پایداری کف نشان داده شد. همچنین مشخص شد که در محدوده مصرف عملیاتی، تاثیر کف ساز Dowfroth250 بر خلاف کف ساز MIBC بر پایداری کف بارز می‌باشد. در نهایت بالاترین پایداری کف در pH برابر ۱۱/۲، ۲۰g/t کلکتور Z11، ۱۵g/t کلکتور TC15، ۲۰g/t کف‌ساز MIBC و ۱۵g/t کف‌ساز Dowfroth250 حاصل شد.

* عهده دار مکاتبات

G.parsapour@vru.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

## ۱-مقدمه

فلوتاسیون یکی از مهمترین و متداولترین روش های فرآوری مواد معدنی است. این روش در سال۱۹۰۶ پایه‌گذاری و برای نخستین بار به طور صنعتی در استرالیا و ایالات متحدهٔ آمریکا مورد استفاده قرار گرفت [۱]. فلوتاسیون بر مبنای خواص شیمی‌فیزیکی سطوح جامدات برای فرآوری ذرات در یک محیط سیال و جریان هوا برای ایجاد حبابهای مناسب بنا شده است. فرایند فلوتاسیون به پارامترهای مختلفی مانند اندازه ذرات، دانسیته پالپ، میزان مواد شیمیایی، کیفیت آب و pH وابسته است. این عوامل تاثیر پذیری بسیار زیادی از پایداری کف و آبرانی ذرات دارند [۲, ۳]. در فلوتاسیون پس از آبران شدن سطح کانی توسط کلکتور، کانی‌ها به حباب‌های هوا متصل شده و به سطح پالپ منتقل و در سطح پالپ یک لایه کف ایجاد می‌کنند. پایداری نسبی مناسب لایه کف، امکان انتقال ذرات با ارزش متصل شده به حباب‌ها را به کانال کنسانتره فراهم می‌کند. در صورت پایداری پایین کف، ذرات قبل از انتقال به کانال کنسانتره از حباب‌ها رها شده و مجدداً به درون سلول فلوتاسیون برگشت می‌کنند. لازمه پایداری کف، پایدار کردن حباب‌ها بوده که با پایدارکردن لایه نازک مایع در سطح حباب انجام می‌شود. همچنین ناپایداری کف به دلایلی مانند پاره شدن لایه نازک آب، به هم پیوستگی حباب‌ها و کم شدن حجم کف حاصل می‌شود [۴].

برای پایدار کردن حباب‌ها از کف‌سازها که در فصل مشترک مایع و گاز عمل می‌کنند، استفاده می‌شود [۵-۷]. مولکول‌های کف ساز پایداری در اطراف حباب را با افزایش تدریجی کشش سطحی در اطراف حباب افزایش می‌دهند [۷]. کف سازها نه تنها کف نسبتا پایداری ایجاد کرده بلکه حبابهای ریز و کروی هم تولید می‌کنند. با کاهش اندازه حبابها و کروی شدن آن‌ها، ثابت سرعت فلوتاسیون افزایش می‌یابد [۸-۱۰]. علاوه بر این، پایداری کف (با استفاده از کف‌ساز) امکان ایجاد کف‌های عمیق را فراهم می‌کند [۱۱, ۱۲].

### ۱-۱- کف

کف با دو اصطلاح Foam و Froth بیان می شود. اصطلاح اول برای کف‌هایی به کار می‌رود که در محیط دو فازی شامل آب و گاز تولید شده و عموماً پایداری کمی دارند [۷] و اصطلاح دوم برای کف‌هایی که در محیط سه فازی جامد، مایع و گاز تولید می شوند، کاربرد دارد. مقایسه این دو اصطلاح نشان می دهد که پایداری Foam کمتر از پایداری Froth است. به دلیل این‌که پایداری Foam بیشتر به مواد شیمیایی موجود در محیط بستگی داشته و پایداری Froth بیش از مواد شیمیایی به ذرات جامد وابسته است [۱۳]. همچنین نشان داده شده که ضخامت لایه بین حباب‌ها که نشان دهنده پایداری بیشتر است در Froth بیش از Foam می‌باشد [۱۳]. لازم به ذکر است که منظور از اصطلاح کف در سیستم‌های فراوری مواد معدنی، Froth می‌باشد.

رفتار کف تاثیر بسیار زیادی بر کارایی کلی سلول‌های فلوتاسون دارد، زیرا کنترل کف، میزان آب راه‌یافته به کنسانتره و در نتیجه دنباله روی، که تاثیر زیادی در عملکرد متالورژیکی مدار دارد را کنترل می‌کند [۱۴]. ساختار و پایداری کف (شامل به هم پیوستن حباب‌ها و ترکیدن آن‌ها در سطح کف) نقش اصلی و تعیین کننده‌ای در عیار و بازیابی در فلوتاسیون دارند. در حقیقت در سلول‌های فلوتاسیون صنعتی فاز کف تاثیر اصلی در کارایی متالورژیکی را دارد [۱۳, ۱۴]. کف بسیار پایدار علاوه بر افزایش بازیابی، باعث کاهش عیار به دلیل افزایش بازیابی ذرات باطله (به واسطه افزایش دنباله روی) می شود. همچنین مشکلات بسیاری را در انتقال به وجود می‌آورد؛ در حالی که پایداری بسیار کم کف باعث کاهش شدید بازیابی می‌شود. بنابراین در هر شرایط عملیاتی و هر سلول فلوتاسیونی پایداری کف بهینه‌ای مورد نظر است [۷, ۹, ۱۳]. از این رو پایداری کف موضوع بسیار مهمی در فلوتاسیون بوده و پارامترهای موثر بر پایداری کف توسط محققین مختلفی بررسی شده‌اند [۴, ۱۳-۲۱].

### ۱-۲-پایداری کف

مقاومت حباب‌ها در برابر اتصال به یکدیگر و یا ترکیدن در منطقه کف که با تشکیل لایه مقاومی در اطراف حباب برای پایدار کردن لایه نازک آب دور حباب انجام می‌شود، پایداری کف نامیده می‌شود [۱۳]. به عبارت دیگر کف پایدار، کفی است که از حباب‌های ریز تشکیل شده و ترکیدن و یا به هم پیوستن حباب ها در آن بسیار کم است.

تا به امروز هیچ معیار ویژه‌ای به عنوان پایداری کف معرفی نشده و بلکه چندین پارامتر به عنوان نشان دهنده پایداری کف معرفی شده‌اند. این پارامترها عبارت از زمان نیمه عمر کف، حداکثر ارتفاع کف در حالت پایدار، رشد حباب‌ها در منطقه کف، بازیابی هوا، میزان جامد حمل شده توسط حباب‌ها در بالای منطقه کف، سرعت کف و سرعت رشد کف می‌باشند [۷, ۱۰, ۱۳, ۱۶, ۲۲]. همچنین یکی دیگر از متغیرهای مورد استفاده برای نمایش پایداری کف، زمان ماند کف است که وابسته به ارتفاع کف و سرعت ظاهری گاز می‌باشد. این پارامتر

میانگین زمان اقامت یک حباب در فاز کف را نشـــان می‌دهد [۱۳, ۱۹]. علاوه بر این با توجه به ارتباط مستقیم بین بازیابی آب و پایداری کف، در برخی از تحقیقات از بازیابی آب به عنوان مشخصه پایداری کف استفاده شده است [۲۳-۲۶]. اهمیت پایداری کف به اندازه‌ای اســت که پیشــنهاد شــده برای بهبود بازیابی، پایداری کف در بیشترین مقدار باشد [۲۶].

پایداری کف با دو روش اســتاتیکی و دینامیکی محاســبه می‌شــود [۱۳, ۱۶, ۱۷]. پایداری کف دینامیکی با اندازه گیری بیشترین ارتفاع کف و یا نسبت حجم کف به دبی هوا [۱۳, ۱۶] و اســتاتیکی با زمان از بین رفتن کف بعد از قطع جریان هوا تعیین می‌شوند [۱۳, ۱۹]. پایداری کف دینامیکی که به عنوان ارتفاع کف تعادلی در یک پالپ هوادهی شــده نیز تعریف می شــود، به اندازه ذرات بســتگی دارد. به گونه ای که نشــان داده شــده که ذرات ریزتر ارتفاع کف تعادلی بیشــتر و در نتیجه پایداری کف دینامیکی بیشتری حاصل می‌کنند [۱۳].

### ۱-۳-تاثیر کف‌ساز و کلکتور بر پایداری کف

در حالت کلی پایداری کف وابســته به کف‌ســاز (نوع و غلظت)، مقدار و خواص کانی‌ها (به ویژه میزان آبرانی و اندازه ذرات) می‌باشــد. هر چند پارامترهای دیگری مانند کیفیت آب فرایند، میزان گاز در پالپ و همچنین زاویه تماس بین ذرات و حباب‌های هوا نیز بر پایداری کف تاثیر دارند [۱۳, ۲۱].

افزایش مصــرف کف ســاز باعث افزایش ســطح تماس بین ذره و حباب شــده و در نتیجه احتمال جدایش ذره از حباب را کاهش می‌دهد. از این رو به هم پیوستن حباب‌ها کم شده و در نتیجه پایداری کف افزایش می یابد [۱۱, ۱۹, ۲۷]. علاوه بر این افزایش وزن ملکولی کف ساز باعث افزایش میزان و مقاومت کف می‌شود. البته نشان داده شده که وزن ملکولی تا یک مقدار بهینه‌ای باعث افزایش پایداری کف شــده و بعد از آن باعث کاهش پایداری کف می‌شود [۱۳].

آبرانی ذرات تاثیر غیر قابل انکاری در پایداری کف دارد [۶, ۱۶, ۲۲]. البته مکانیزم های این تاثیر هنوز به خوبی شناخته نشده‌اند. در تحقیقی در یک سیستم شامل کوارتز و کالکوپیریت نشان داده شده که مقدار ذرات آبران (که وابسته به عیار مس و میزان جامد می‌باشــد) بیش از عیار مس و غلظت کف‌ســاز باعث افزایش پایداری کف می‌شــود [۱۳]. همچنین نشان داده شده است که ذرات با آبدوستی زیاد با هر اندازه‌ای بدون توجه به نوع کف ســاز باعث ناپایداری کف می‌شــوند (این نوع از ذرات بخشــی از کف ســاز را حذب می‌کنند). ذرات با آبرانی بســیار زیاد نیز به دلیل پاره کردن لایه نازک آب در اطراف حباب باعث کاهش پایداری کف می‌شــوند. در حالی که ذرات با آبرانی متوسط در لایه آب اطراف حباب معلق شده و در نتیجه پایداری کف را افزایش می‌دهند [۱۱]. آبرانی بسیار زیاد در تحقیق‌های مختلف با زاویه تماس‌های بین ۹۰ تا ۱۱۰ درجه مشخص شده و آبرانی متوسط نیز با زاویه تماس‌های بین ۵۰ تا ۹۰ درجه تعیین شــده و زاویه تماس کمتر از ۴۰ درجه نیز به عنوان آبرانی ضعیف شناخته می‌شود [۱۳, ۱۶, ۲۱]. از این رو نشــان داده شــده که در برخی از موارد افزایش مقدار کلکتور به دلیل افزایش درجه آبرانی ذرات باعث افزایش پایداری کف می شــود [۱۶, ۱۹]. البته برخی از محققین پایداری کف را نتیجه افزایش ویسکوزیته به دلیل وجود ذرات جامد می‌دانند [۷]. در نهایت به این موضــوع باید توجه داشــت که چنانچه در مجموع قدرت اتصال ذرات زیاد باشد، لایه نسبتاً ضعیفی از ذرات در فصل مشترک حباب‌ها تشکیل شده که نتیجه آن پایدار کردن کف است [۲۸].

### ۱-۴-تاثیر اندازه ذرات بر پایداری کف

در مورد تاثیر اندازه ذرات بر پایداری کف موارد مختلفی بیان شده است. بیشتر محققین نشان داده اند که ذرات ریز پایداری کف را افزایش می‌دهند [۱۶, ۱۹]. علاوه بر این نشــان داده شده که اندازه ذرات مستقیماً بر پایداری کف تاثیر نداشته ولی با توجه به تاثیر متقابل با پارامترهای عملیاتی مانند نرخ هوا می‌تواند بر پایداری کف تاثیر داشــته باشــد. به عنوان مثال در نرخ هوای کم در محدوده ابعادی ۳۰-۴۰ میکرون ذرات باعث افزایش پایداری کف می‌شوند [۲۰]. همچنین در تحقیقی بیان شده که رابطه خطی فقط بین سطح ویژه ذرات و پایداری کف وجود دارد [۴]. علاوه بر این نشــان داده شــده که ذرات بزرگ و ذرات نرمه نسبت به ذرات با اندازه متوسط تاثیر کمتری بر پایداری کف دارند [۶, ۲۹].

### ۱-۵-تاثیر pH بر پایداری کف

فاکتور دیگری که در پایداری کف تاثیر دارد pH می‌باشد. pH باعث تغییر رفتار کانی‌ها در پالپ با تغییر میزان بار سطحی ذرات می‌شود [۱۹]. نشان داده شده که در فلوتاسیون مس به دلیل رسیدن به بالاترین بازیابی، توازن بین pH و مواد شیمیایی در pH حدود ۱۱ رخ می‌دهد [۲]. در فلوتاســیون مس کاهش pH باعث افزایش جذب کلکتورهای سولفیدریل مانند گزنتات‌ها به پیریت و کالکوپیریت می‌شــود. از این رو با کاهش pH نرخ جذب کلکتور افزایش می‌یابد [۲۴].

در تحقیقی در فرآوری روی نشـــان داده شـــده که کاهش pH باعث افزایش نیمه عمر کف به دلیل کاهش پتانســـیل زتا و افزایش ویســکوزیته پالپ می‌شـود [۱۹]. در تحقیق دیگری در فراوری سنگ آهن نشان داده شده که افزایش pH باعث افزایش پایداری کف می‌شـود [۱۵]. همچنین در تحقیقی نشـان داده شـــده که pH و یون‌هایی مانند $Mg^{2+}$ و $Na^{+}$ بر پایداری کف تاثیر دارند. در این تحقیق نشـان داده شـده اسـت که در pH حدود ۱۰/۵ بالاترین پایداری کف در حالت نبودن یون‌ها (آب تازه) نسبت به وجود یون‌ها (آب دریا) حاصل شده است [۱۸]. در تحقیقی دیگر [۳۰] عنوان شده که pH نسبتا بالا در فراوری مس فقط برای بازدا شت پیریت نیست، بلکه برای تنظیم کف و پایدارتر کردن کف نیز می‌باشـد. در این تحقیق در حقیقت pH بالا باعث پایدارتر شـدن حباب‌ها و بهتر شـدن قدرت حمل در کانسنگ‌های مس پورفیری شده است. از این رو در بسیاری از کارخانه‌های فلوتاســیون مس این عقیده وجود دارد که افزایش pH باعث افزایش پایداری کف می‌شود.

### ۱-۶- ضرورت پژوهش

در اکثر مدارهای فلوتاســیون مس برای جدایش مناســب بین کالکوپیریت و پیریت، pH در دامنه ۱۰ تا ۱۲ اسـت [۱۰]. در این مدارها عموماً از آهک برای تنظیم pH ا ستفاده می شود. همچنین آ هک به عنوان بازداشـــت کننده پیر یت در مرحله شستشو نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

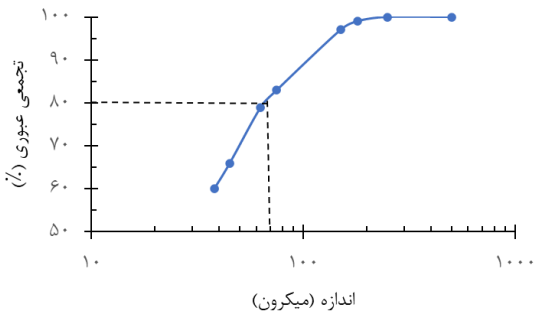
یکی از پارامترهای بسـیار مهم در کنترل نوسـانات تولید، ا ضافه کردن و توزیع منا سب مواد شیمیایی ا ست. در برخی از عملیات‌های فلوتا سیون مس، شیر آهک علاوه بر تنظیم pH، با اســتدلال پایداری بیشــتر کف و در نتیجه رســیدن به عیار و بازیابی بالاتر، به خصـوص در مدار پرعیارکنی اولیه، بیش از حد اســتفاده می‌شـود. از این رو میزان مصــرف آهک در برخی از کار خانه ها مانند کار خانه فرآوری مس محمدآ باد دلیجان و مجتمع مس سرچشمه تقریبا ۲ برابر مقدار استاندارد است. در حالی که میزان مصرف کلکتور و کفساز تقریبا ۵۰ درصد مقدار استاندارد است. با توجه به این‌که توجیه اصلی در مورد این نوع راهبری، رســیدن به پایداری مناســب کف می‌باشـد، در این تحقیق برای تعیین تاثیر pH بر پا یداری کف، با اســتفاده از طراحی آزمایش یک سری آزمون در مقیاس آزمایشگاهی انجام و با اندازه‌گیری پایداری کف علاوه بر تعیین نقش هر عامل در پایداری کف، شرایط منا سب برای ر سیدن به بالاترین پایداری کف پیشنهاد شده است.

## ۲ مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- تهیه نمونه و روش انجام آزمایش

با توجه به تاثیر دانه‌بندی بر فلوتاســیون و برای نزدیک شـــدن نتایج به نتایج کار خانه، نمو نه مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های فلوتاســیون از ســریز هیدروســیکلون‌های اولیه (خوراک وا حد فلو تاســیون) کار خانه فرآوری مس محمدآ باد دلیجان تهیه گردید. دانه‌بندی نمونه نشـان داد که ۸۰ درصـد ماده کوچکتر از ۷۰ میکرون بوده ( شکل ۱) و کالکوپیریت کانی ا صلی حاوی مس می‌با شد. همچنین در تحقیق صورت گرفته، از مواد شیمیایی معمول مورد ا ستفاده در این کارخانه ا ستفاده شـد. کلکتورهای مورد اسـتفاده با نام‌های تجاری Z11 (نوعی کلکتور با ترکیب شیمیایی سدیم ایزوپروپیل گزنتات) و TC15 (نوعی کلکتور با ترکیب شیمیایی دی تیو ف سفات) و همچنین کف سازهای مورد ا ستفاده MIBC (متیل ایزو بوتیل کربینول) و Dowfroth250 (CH3(OC3H6)4OH) می‌باشـد. pH پالپ نیز توسط آهک تنظیم گردید.

از ســلول آز مایشــ گاهی دنور برای ان جام آزمون های فلوتاسیون استفاده شد. آزمایش‌های فلوتاسیون در سلول ۲/۴ لیتری با حجم مفید ۱/۹۳ لیتر انجام گرفت. غلظت جامد پالپ م شابه کارخانه برابر ۲۸ در صد انتخاب گردید. به منظور تعیین پایداری کف، بعد از شــروع آزمایش و رســیدن کف به حالت تعادل، هوادهی قطع شده و از لحظه قطع هوا، زمان اندازه‌گیری و ارتفاع کف نیز به صورت پیوسته اندازه‌گیری شد.




شکل (۱) دانه‌بندی نمونه استفاده شده در آزمایش‌های فلوتاسیون

زمان لازم برای کاهش ارتفاع کف به نصــف مقدار اولیه به عنوان شــاخص پایداری کف ثبت گردید. در این آزمایش‌ها، با توجه به ثابت بودن حجم مواد در سلول فلوتا سیون ارتفاع پالپ م شخص بوده و با ا ستفاده از یک خط کش به صورت پیو سته ارتفاع کل مواد درون سلول (پالپ و کف) تعیین شده و با توجه

به مشخص بودن ارتفاع پالپ، ارتفاع کف محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به نقش ماندگی گاز در ارتفاع پالپ، ارتفاع پالپ در هر آزمایش باید بعد از باز شدن شیر هوا اندازه‌گرفته شود. بعد از تعیین ارتفاع کف حالت پایدار، شیر هوا بسته شده و زمان لازم تا نصف شدن ارتفاع کف به عنوان پایداری کف تعیین می‌شود.

### ۲-۲- طراحی آزمایش

اصلی ترین متغیرهایی که در عمل در مدارهای فلوتاسیون قابل دستکاری بوده و بر پایداری کف موثرند عبارت از pH، میزان و نوع کلکتور و کف‌ساز می‌باشند. از طرفی با توجه به استفاده همزمان از دو کلکتور Z11 و TC15 و همچنین دو کف‌ساز MIBC و Dowfroth250، در بیشتر مدارهای فلوتاسیون، این مواد شیمیایی به علاوه pH به عنوان عوامل قابل تغییر در آزمایش‌های فلوتاسیون انتخاب شدند. میزان مصرف مواد شیمیایی نیز در سه سطح و با توجه به حداقل و مقدار معمول و حداکثر میزان مورد استفاده در کارخانه محمدآباد دلیجان انتخاب گردید (جدول ۱). لازم به ذکر است که در کارخانه‌های فلوتاسیون بزرگ مس مانند مجتمع مس سرچشمه نیز همین مواد شیمیایی و در همین محدوده استفاده می‌شوند.

بهبود کیفیت و افزایش بهره¬وری زمانی میسر است که تحقیقات کاربردی در جهت بهینه سازی سیستم، جزئی جدا ناپذیر از فرایند تولید باشد. استفاده از روشهای طراحی آزمایشها در مراحل مختلف یکی از کارا ترین روشهای رسیدن به این هدف است. استفاده صحیح از روشهای طراحی آماری آزمایش نه تنها می¬تواند موجب سهولت در طراحی مراحل تولید محصولات شود، بلکه موجب ارتقای سطح اطمینان و بهبود عملکرد سیستم تولید نیز می‌شود.

جدول (۱) عوامل و سطوح مورد استفاده در آزمایش‌ها فلوتاسیون

| عوامل | سطح ۱ | سطح ۲ | سطح ۳ |
|---|---|---|---|
| **pH** | ۱۱/۲ | ۱۱/۷ | ۱۲/۲ |
| **Z11 (g/t)** | ۵ | ۱۲ | ۲۰ |
| **TC15 (g/t)** | ۵ | ۱۰ | ۱۵ |
| **Dowfroth250 (g/t)** | ۱۰ | ۱۵ | ۲۰ |
| **MIBC (g/t)** | ۵ | ۱۰ | ۱۵ |

یکی از روش های پر کاربرد در طراحی آزمایش ها، روش تاگوچی است که برای انجام آزمایشهای با تعداد سطوح مختلف طرح‌ریزی شده است. با بررسی انجام شده آرایه $L_{27}$ (جدول ۲) به عنوان طرح مناسب آزمایشی انتخاب شد. پاسخ گرفته شده از آزمایش‌ها، زمان کاهش ارتفاع کف به نصف مقدار اولیه بر حسب ثانیه است که به عنوان معیار پایداری کف شناخته می شود [۱۰]. استفاده از این روش نشان داده که در شرایط مختلف عموماً پایداری کف در محدوده حدود ۵ تا ۲۰ ثانیه می باشد، هر چند که با توجه به شرایط کاری در مواردی تا حدود ۷۰ ثانیه نیز گزارش شده است [۳۱-۳۳]. لازم به ذکر است که با توجه به وجود ۵ عامل سه سطحی، برای یافتن برخی از تاثیر متقابل‌ها، عوامل به ترتیب در ستون‌های ۱، ۲، ۵، ۸ و ۱۱ طرح جایگذاری شدند.

## ۳- ارایه یافته‌ها و تحلیل نتایج

نتایج پایداری کف در آزمایش‌های فلوتاسیون انجام شده با طرح آزمایشی $L_{27}$ تاگوچی نشان داد که پایداری کف به عوامل مختلف، بسیار حساس بوده و در دامنه ۶/۲ تا ۱۲/۲ ثانیه متغیر می‌باشد (جدول ۲). مقایسه دامنه پایداری کف‌های بدست آمده با برخی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که اعداد در دامنه مطلوبی می‌باشند. به عنوان مثال در تحقیقی دامنه این اعداد در محدوده حدود ۶ تا ۱۶ ثانیه گزارش شده است [۳۳].

### ۳-۱- تحلیل واریانس

در طراحی آماری آزمایش ها، تحلیل واریانس، اولین و اساسی‌ترین بخش محسوب می‌شود. تأثیرگذاری یا بی‌تأثیر بودن عوامل مختلف با استفاده از تحلیل واریانس مشخص می شود. علاوه بر این میزان تأثیر هر یک از عوامل در مقایسه با یکدیگر نیز توسط این تحلیل تعیین می‌شود. در این تحقیق تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم افزار DX7 انجام گرفت (جدول ۳). در این جدول مقدار آماره توزیع فیشر (p-Value) تعیین کننده‌ی معنی‌دار بودن (موثر بودن) یک عامل می‌باشد. این مقدار احتمال تصادفی بودن مقدار آماره‌ی فیشر به دست آمده برای هر یک از عوامل و همچنین به طور کلی برای مدل به دست آمده را بیان می‌کند. در نتیجه هر چه عامل کمتر باشد، احتمال اینکه آن عامل تأثیر واقعی بر فرآیند داشته، بیشتر است. معمولا در کاربردهای مهندسی اگر مقدار آن کمتر از ۰/۰۵ باشد، آن عامل تأثیر معناداری بر فرآیند دارد [۳۴]. مشخصات آماری نشان می‌دهد که ضریب قطعیت مدل ($R^2$) برابر ۰/۹۲، انحراف معیار استاندارد (Std. Dev.) برابر ۰/۸۲، انحراف معیار نسبی (C.V.) برابر ۸/۶ درصد و نهایتاً مقدار

Adequacy Precision که نشان دهنده‌ی دقت کلی اندازه‌گیری ها می‌باشد، برابر ۸/۸۷ می‌باشد.

جدول (۲) پایداری کف حاصل شده در آزمایش‌های فلوتاسیون (طرح L27 تاگوچی)

| شماره آزمایش | pH | Z11(g/t) | TC15(g/t) | MIBC(g/t) | Dowfroth250(g/t) | پایداری کف (S) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱۱/۲ | ۵ | ۵ | ۵ | ۱۰ | ۶/۲ |
| ۲ | ۱۱/۲ | ۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۵ | ۱۰/۴ |
| ۳ | ۱۱/۲ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۲۰ | ۷/۴ |
| ۴ | ۱۱/۲ | ۱۲ | ۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۱۱/۲ |
| ۵ | ۱۱/۲ | ۱۲ | ۱۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰/۹ |
| ۶ | ۱۱/۲ | ۱۲ | ۱۵ | ۵ | ۱۵ | ۱۱/۱ |
| ۷ | ۱۱/۲ | ۲۰ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۲/۲ |
| ۸ | ۱۱/۲ | ۲۰ | ۱۰ | ۵ | ۲۰ | ۱۱/۴ |
| ۹ | ۱۱/۲ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۸/۹ |
| ۱۰ | ۱۱/۷ | ۵ | ۵ | ۵ | ۱۰ | ۸/۰ |
| ۱۱ | ۱۱/۷ | ۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۵ | ۸/۲ |
| ۱۲ | ۱۱/۷ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۲۰ | ۱۰/۳ |
| ۱۳ | ۱۱/۷ | ۱۲ | ۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۸/۲ |
| ۱۴ | ۱۱/۷ | ۱۲ | ۱۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰/۲ |
| ۱۵ | ۱۱/۷ | ۱۲ | ۱۵ | ۵ | ۱۵ | ۸/۰ |
| ۱۶ | ۱۱/۷ | ۲۰ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۸/۹ |
| ۱۷ | ۱۱/۷ | ۲۰ | ۱۰ | ۵ | ۲۰ | ۱۲/۱ |
| ۱۸ | ۱۱/۷ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۹/۲ |
| ۱۹ | ۱۲/۲ | ۵ | ۵ | ۵ | ۱۰ | ۹/۲ |
| ۲۰ | ۱۲/۲ | ۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۱۵ | ۸/۵ |
| ۲۱ | ۱۲/۲ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۲۰ | ۱۱/۶ |
| ۲۲ | ۱۲/۲ | ۱۲ | ۵ | ۱۰ | ۲۰ | ۸/۷ |
| ۲۳ | ۱۲/۲ | ۱۲ | ۱۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۹/۳ |
| ۲۴ | ۱۲/۲ | ۱۲ | ۱۵ | ۵ | ۱۵ | ۶/۵ |
| ۲۵ | ۱۲/۲ | ۲۰ | ۵ | ۱۵ | ۱۵ | ۹/۷ |
| ۲۶ | ۱۲/۲ | ۲۰ | ۱۰ | ۵ | ۲۰ | ۱۱/۳ |
| ۲۷ | ۱۲/۲ | ۲۰ | ۱۵ | ۱۰ | ۱۰ | ۹/۱ |

**جدول (۳) تحلیل واریانس داده‌های آزمایش‌های فلوتاسیون (طرح $L_{27}$ تاگوچی- نرم افزار DX7)**

| منبع | مجموع مربعات | درجه آزادی | میانگین مربعات | آماره توزیع فیشر (F-Value) | سطح معنی‌داری (p-value) | تاثیر |
|---|---|---|---|---|---|---|
| مدل | ۶۴/۳۱ | ۱۸ | ۳/۵۷ | ۵/۳۹ | ۰/۰۱ | معنی دار |
| pH | ۲/۸۸ | ۲ | ۱/۴۴ | ۲/۱۷ | ۰/۱۸ | - |
| Z11 | ۹/۷۵ | ۲ | ۴/۸۷ | ۷/۳۵ | ۰/۰۲ | بارز |
| TC15 | ۷/۵۶ | ۲ | ۳/۷۸ | ۵/۷۰ | ۰/۰۳ | بارز |
| MIBC | ۴/۱۷ | ۲ | ۲/۰۸ | ۳/۱۴ | ۰/۱۰ | - |
| DF250 | ۷/۶۸ | ۲ | ۳/۸۴ | ۵/۷۹ | ۰/۰۳ | بارز |
| pH-Z11 | ۱۷/۲۳ | ۴ | ۴/۳۱ | ۶/۴۱ | ۰/۱۰ | بارز |
| pH-DF250 | ۱۴/۸۵ | ۴ | ۳/۷۱ | ۵/۵۳ | ۰/۰۲ | بارز |
| باقی مانده | ۵/۳۱ | ۸ | ۰/۶۶ | ۵/۳۹ | ۰/۰۱ | |
| مجموع | ۶۹/۶۲ | ۲۶ | | | | |

در نتیجه مدل به دست آمده در بازه‌ی طرح آزمایش در سطح اطمینان مهندسی معنادار است. با توجه به معنی دار بودن مدل می‌توان در مورد تاثیر سایر پارامترها اظهار نظر کرد. بررسی جدول ۳ نشان می‌دهد که مقادیر Z11، TC15 و Dowfroth250 تاثیر بارزی بر پایداری کف دارند در حالی که pH و MIBC، بر خلاف انتظار تاثیر بارزی در پایداری کف ندارند. علاوه بر این بررسی تاثیر متقابل‌ها نشان می‌دهد که تاثیر متقابل بین pH و کلکتور Z11 و همچنین تاثیر متقابل بین pH و کف‌ساز Dowfroth250 بارز می‌باشد.

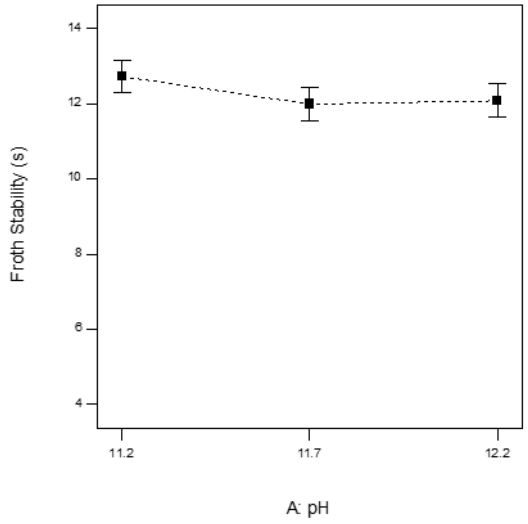
## ۳-۲- بررسی تأثیر عوامل مختلف بر پایداری کف

### الف- تأثیر pH

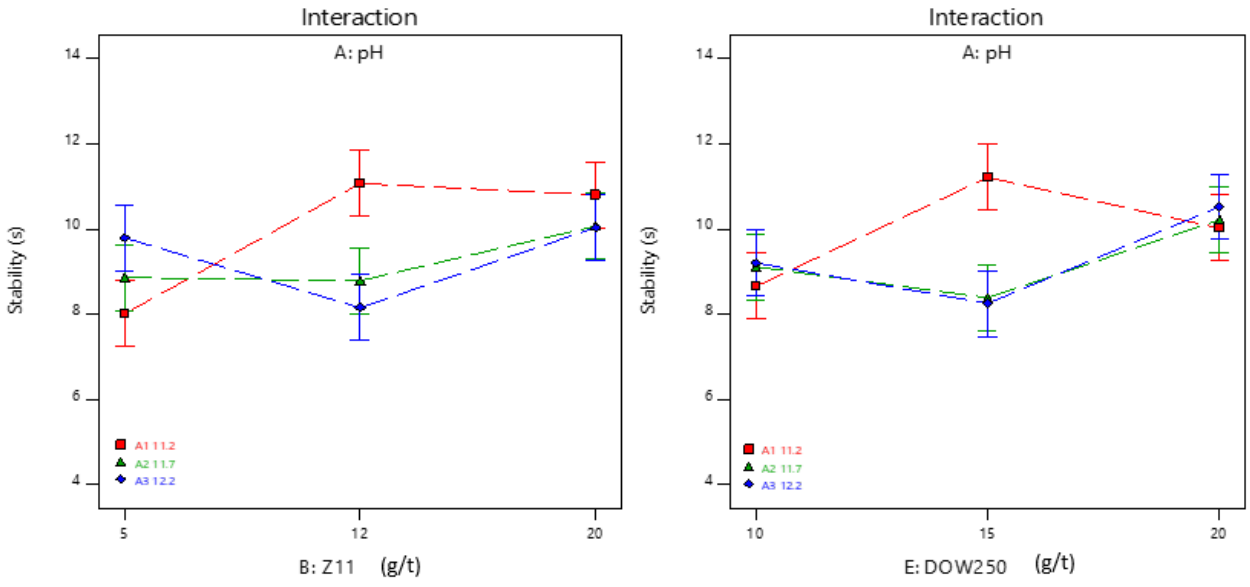
همانگونه که قبلا بیان شد تغییر pH باعث تغییر بار سطحی کانی شده [۱۹] و به همین دلیل بر پایداری کف تاثیر دارد. تحلیل واریانس آزمایش‌ها (جدول ۳) نشان داد که تغییرات pH در بازه عملیاتی کارخانه تاثیر بارزی بر پایداری کف ندارد. همچنین بررسی روند تغییرات پایداری کف با افزایش pH نشان می‌دهد که با تغییر pH، تغییرات پایداری کف در محدوده نوسانات کارخانه بوده و از نظر آماری ثابت می‌باشد (شکل ۲).

افزایش pH باعث تغییر در پتانسیل پالپ و همچنین افزایش یون $Ca^{2+}$ در پالپ می‌شود که هر دو بر پایداری کف تاثیر دارند [۲۴]. به عنوان نمونه نشان داده شده که بیشتر یون‌ها باعث کاهش کشش سطحی شده و با دارا بودن خواص کف‌سازی، باعث افزایش بازیابی آب و پایداری کف می‌شوند [۲۴]. از طرفی در فلوتاسیون مس با کاهش pH میزان جذب گزنتات بر سطوح کانی‌های پیریت و کالکوپیریت افزایش یافته و در نتیجه میزان ذرات جامد قابل اتصال به حباب‌ها که باعث افزایش پایداری کف‌می‌شوند، افزایش می‌یابد [۲۴]. بنابراین تغییر pH با توجه به میزان مواد قابل شناور و میزان یون‌ها ممکن است باعث افزایش و یا کاهش پایداری کف شود.

به نظر می‌رسد که در این تحقیق یون‌ها و میزان ذرات آبران تاثیر یکدیگر را خنثی کرده و مشاهده می‌شود که بر خلاف برخی از تحقیقات پیشین [۳۰]، افزایش pH در فلوتاسیون مس و در محدوده تغییرات معمول کارخانه تاثیری بر پایداری کف ندارد.




**شکل (۲) تأثیر pH بر پایداری کف**




**شکل (۳) تأثیر متقابل pH با کلکتور Z11 و کف‌ساز Dowfroth250 بر پایداری کف**

از طرفی بررسی تاثیرات متقابل بین pH و سایر عوامل نشان می دهد که تاثیر متقابل pH با کلکتور Z11 و همچنین با کف‌ساز Dowfroth250 بارز می‌باشد (جدول ۳). در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی با کاهش pH میزان مواد قابل اتصال به حباب افزایش پیدا می‌کند [۱۰] و از طرفی با افزایش میزان کف‌ساز و کلکتور نیز میزان و قابلیت اتصال مواد به حباب‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۳ نشان می‌دهد که با کاهش pH و افزایش Z11 میزان و قابلیت اتصال ذرات به حد متوسطی رسیده و باعث افزایش پایداری کف شده است. همچنین با کاهش pH و افزایش کف‌ساز Dowfroth250 میزان و قابلیت اتصال ذرات به حباب‌ها به گونه‌ای افزایش می‌یابد که ابتدا باعث افزایش پایداری کف شده و در نهایت با افزایش بیش از حد آبرانی لایه نازک آب اطراف حباب را پاره کرده و باعث کاهش پایداری کف می‌شود [۱۳].

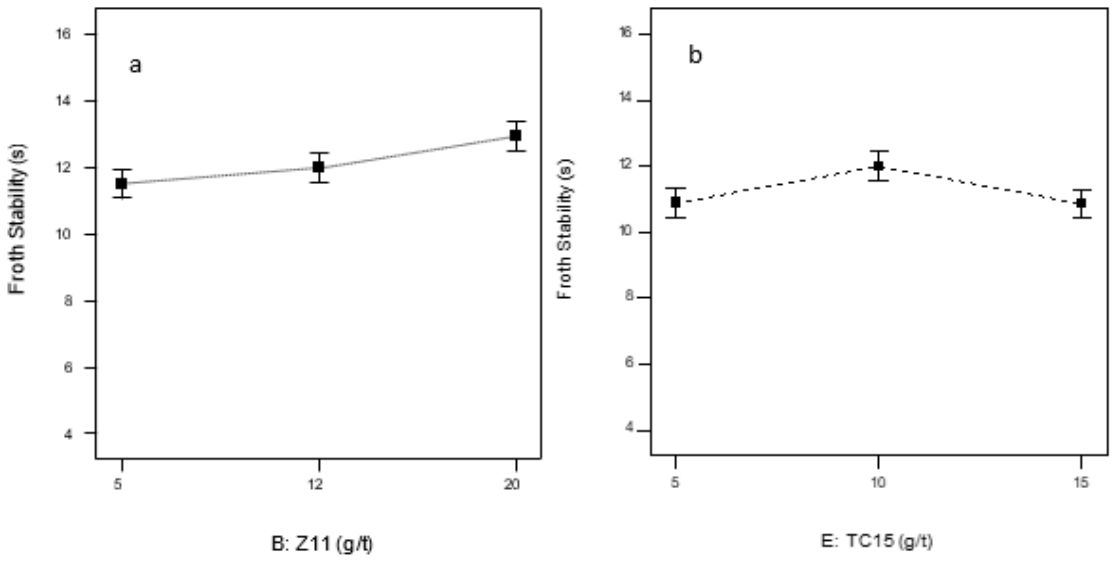
**ب- تأثیر میزان مصرف کلکتور**

یکی از عوامل موثر در پایداری کف وجود ذرات جامد آبران در کف می‌باشد. در صورتی که آبرانی بیش از حد باشد به دلیل از بین رفتن لایه نازک آب پایداری کف کاهش یافته و در آبرانی های متوسط حداکثر پایداری کف حاصل می‌شود [۶, ۱۶, ۲۲]. بررسی تاثیر میزان مصرف کلکتور Z11 بر پایداری کف در این تحقیق نشان می‌دهد که در محدوده تغییرات میزان Z11 در کارخانه، حتی با حداکثر شدن میزان مصرف این کلکتور، آبرانی حداکثری حاصل نشده و در نتیجه پایداری کف با افزایش میزان مصرف کلکتور افزایش می‌یابد (شکل a ۴).

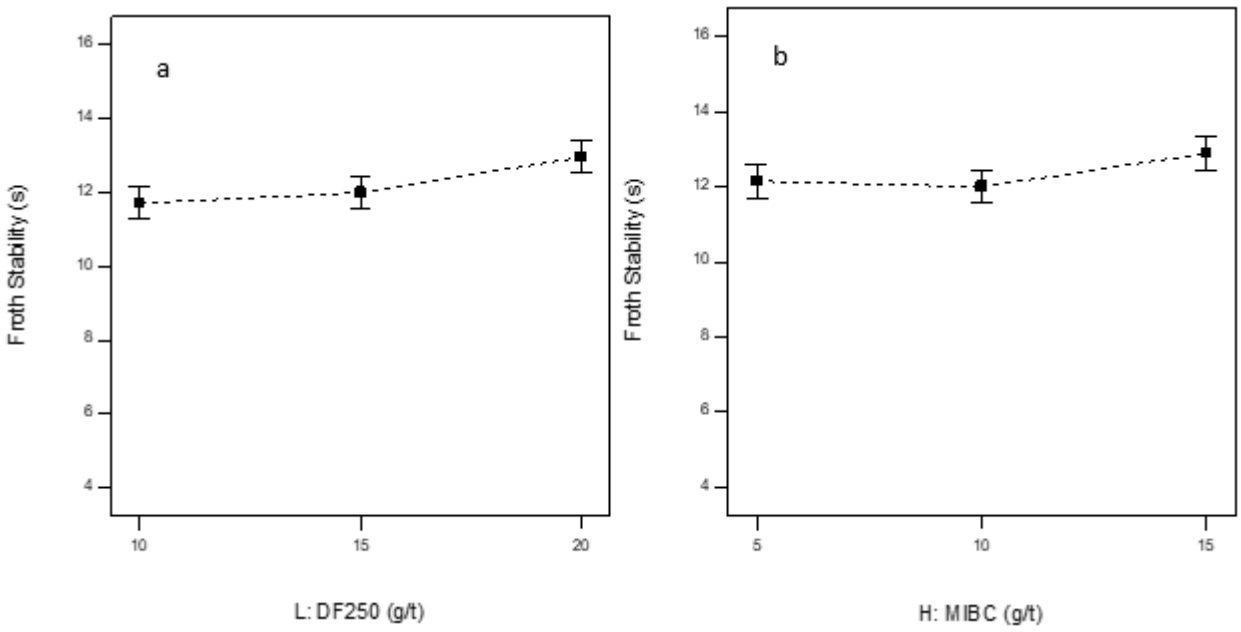
از طرفی بررسی تاثیر کلکتور TC15 بر پایداری کف نشان می دهد که بر خلاف کلکتور Z11، حداکثر آبرانی این کلکتور در مقادیر مصرف بیش از ۱۰ گرم بر تن ایجاد می‌شود. از این رو حداکثر پایداری کف در محدوده‌ی ۱۰ گرم بر تن حاصل شده است (شکل b ۴).

**ج- تأثیر میزان مصرف کف‌ساز**

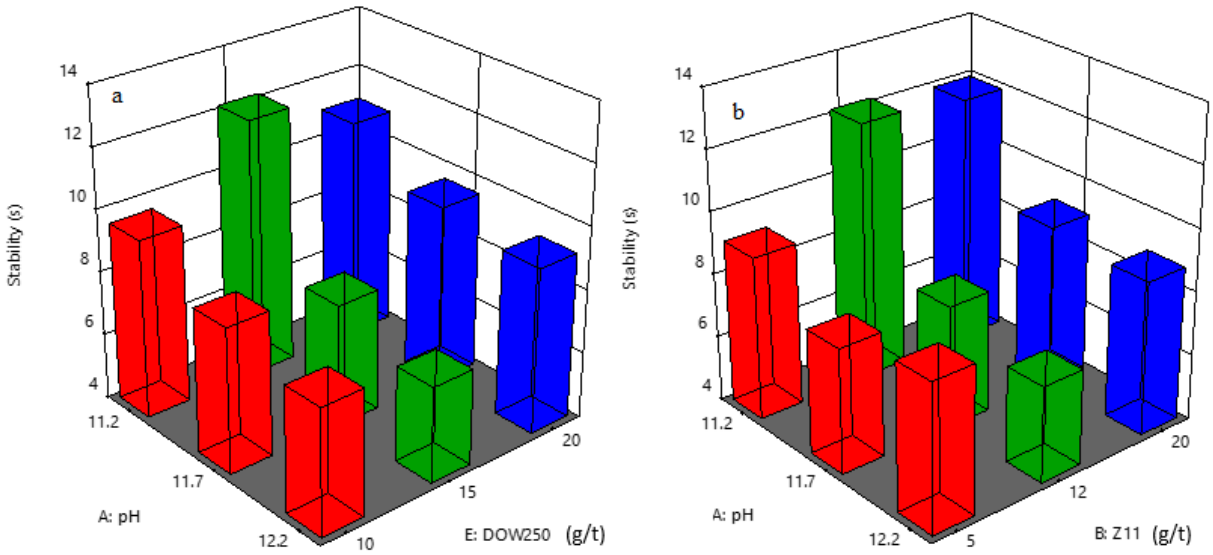
یکی از عوامل ا صلی موثر بر پایداری کف، غلظت کف ساز می‌باشد. از این رو انتظار می‌رود با افزایش غلظت کف‌ساز، پا یداری کف افزایش یابد. نتایج نیز نشان داد تاثیر میزان مصرف کف‌ساز Dowfroth250 بر پایداری کف بارز بوده (جدول ۳) و با افزایش میزان مصرف این نوع کف‌ساز پایداری کف افزایش می‌یابد (شکل b۵). اما نتایج این تحقیق نشان داد که بر خلاف انتظار تاثیر میزان مصرف کف‌ساز MIBC بر پایداری کف در این آزمایش‌ها بارز نمی‌باشد (جدول ۳). بررسی دقیق تغییرات پایداری کف با افزایش غلظت کف‌ساز MIBC از ۱۰ به ۱۵ گرم بر تن نشان می‌دهد که افزایش مصرف این کف‌ساز تغییرات مثبتی را در پایداری کف نشان داده ولی از نظر آماری این افزایش معنی‌دار نمی‌با شد ( شکل a۵). با توجه به پا یین تر بودن وزن مولکولی MIBC نسبت به Dowfroth250 و با تو جه به تاثیر مث بت وزن مولکولی کف‌ساز بر پایداری کف [۱۳]، لازم است برای مشاهده تاثیر کف‌ساز MIBC بر پایداری کف، میزان مصرف آن بیشتر شود. البته عملاً در کارخانه امکان این افزایش وجود ندارد. بنابراین در عمل در مواردی که نیاز به افزایش پایداری کف ا ست باید از کف ساز Dowfroth250 استفاده شود.




**شکل (۴) تأثیر میزان مصرف کلکتورهای Z11 (a) و TC15 (b) بر پایداری کف (سایر متغیرها: سطح میانگین)**




شکل (۵) تأثیر میزان مصرف کف‌سازهای Dowfroth250 (a) و MIBC (b) بر پایداری کف (سایر متغیرها: سطح میانگین)




شکل (۶) تاثیر میزان مصرف کف ساز Downfroth250 (a) و کلکتور Z11 (b) بر پایداری کف در pH های مختلف

با بررسی حالت‌های مختلف ترکیب عوامل مختلف، می‌توان شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین پایداری کف را مورد بررسی قرار داد. در حالت کلی با توجه به وجود اندرکنش بین متغیرهای مختلف برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف باید همه عوامل را بررسی کرد. به عنوان مثال در شکل ۶ نشان داده شده که برای رسیدن با بالاترین پایداری کف باید pH در مقدار ۱۱/۲ و مقادیر کلکتور Z11 و کف‌ساز Downfroth250 باید به ترتیب در مقادیر ۱۲ و ۱۵ گرم بر تن باشند.

در نهایت با بررسی حالت‌های مختلف ترکیب عوامل گوناگون ، شرایط بهینه برای دستیابی به بیشترین پایداری کف در pH برابر ۱۱/۲، مقدار مصرف کلکتورهای Z11 و TC15 به ترتیب به میزان ۲۰ و ۱۵ گرم بر تن و میزان مصرف کف‌سازهای Dowfroth250 و MIBC نیز به ترتیب ۲۰ و ۱۵ گرم بر تن می‌باشد. بنابراین در محدوده عملیاتی فلوتاسیون مس نه تنها افزایش pH باعث افزایش پایداری کف نمی‌شود، بلکه برعکس برای رسیدن به بالاترین پایداری کف باید pH در کمترین مقدار عملیاتی (۱۱/۲) باشد.

## ۴- نتیجه گیری

- تاثیر pH و مواد شیمیایی بر پایداری کف در آزمایش‌های فلوتاسیون با استفاده از طرح $L_{27}$ تاگوچی بررسی گردیده و نتایج در محدوده ۶/۲ تا ۱۲/۲ ثانیه حاصل شدند.
- نتایج نشان داد که برخلاف نظر رایج در برخی از کارخانه‌های فراوری مس تاثیر pH بر پایداری کف در کارخانه فرآوری مس محمد آباد دلیجان بارز نمی‌باشد.
- مشخص شد که با توجه به حصول حداکثر پایداری کف در هنگام استفاده از کلکتور TC15 در مقدار ۱۵ گرم بر تن و برای کلکتور Z11 در مقدار ۲۰ گرم بر تن، حداکثر آبرانی با استفاده از کلکتور Z11 در مقادیر بالاتر از ۲۰ گرم بر تن اتفاق می‌افتد، در حالی که برای کلکتور TC15 در مقادیر بیش از ۱۵ گرم بر تن رخ می دهد.
- مشخص شد که تاثیر کف‌ساز Dowfroth250 بر پایداری کف بارز بوده ولی تاثیر کف ساز MIBC در محدوده ۵ تا ۱۵ گرم بر تن بر بازیابی کف بارز نمی باشد. بنابراین در عمل در هنگام نیاز به افزایش پایداری کف باید از کف ساز Dowfroth250 استفاده شود.
- نتایج نشان داد که تاثیر متقابل بین pH و کلکتور Z11 و همچنین تاثیر متقابل بین pH و کف‌ساز Dowfroth250 بارز می‌باشد.
- بهترین شرایط پایداری کف در pH برابر ۱۱/۲، میزان مصرف کلکتورهای Z11 و TC15 به ترتیب به میزان ۲۰ و ۱۵ گرم بر تن و همچنین میزان مصرف کف‌سازهای Dowfroth250 و MIBC به ترتیب ۲۰ و ۱۵ گرم بر تن حاصل می‌شود.

## تقدیر و تشکر

از مدیران و پرسنل کارخانه فرآوری مس محمدآباد دلیجان به دلیل همکاری در تهیه نمونه و انجام آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از داور محترم مقاله به دلیل راهنمایی‌های ارزنده تقدیر و تشکر می‌شود.

## منابع

[1] ح. نعمت‌الهی (۱۳۸۱)، "کانه‌آرایی"، چاپ سوم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.

[2] A. Azizi, (2014) "Influence of collector dosage and pulp chemistry on copper flotation," *Geosystem Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 311-316, doi: 10.1080/12269328.2014.994787.

[3] J.-O. Gustafsson and O. Lima, (2013) "IMPACT OF FROTH STRUCTURE ON IRON ORE FLOTATION," presented at the Technical contribution to the 43rd Ironmaking and Raw Materials Seminar, 12h Brazilian Symposium on Iron Ore and 1st Brazilian Symposium on Agglomeration of Iron Ore, Sao Paulo, Brazil, September 1st to 4th.

[4] I. Achaye, (2017) "Effect of particle properties on froth stability," University of Cape Town.

[5] N. Barbian, E. Ventura-Medina, and J. J. Cilliers, (2003) "Dynamic froth stability in froth flotation,"*Minerals Engineering*, vol. 16, no. 11, pp. 1111-1116.

[6] V. I. Klassen and V. A. Mokrousov,n (1982) "*An introduction to the theory of flotation*" London: Butterworths.

[7] T. V. Subrahmanyam and E. Forssberg, (1988) "Froth stability, particle entrainment and drainage in flotation — A review," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 23, no. 1, pp. 33-53.

[8] N. Arbiter, (1984) "The Flotation Cell - a Critique" presented at the Principle of mineral flotation, Wark symposium, Victoria, Australia.

[9] V. D. Smar, R. R. Klimpel, and F. F. Aplan, (1994) "Evaluation of chemical and operational variables for the flotation of a copper ore Part I — Collector concentration, frother concentration, and air flow rate," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 42, no. 3, pp. 225-240.

[10] Wills B. A. and Finch J. A., (2016) "Chapter 12 - Froth Flotation," in *Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition)*, B. A. Wills and J. A. Finch Eds. Boston: Butterworth-Heinemann, pp. 265-380.

[11] A. J. Lynch, N. W. Johnson, E. V. Manlapig, and C. G. Throne, (1981), *Mineral and coal flotation circuits: their simulation and control*. Elsevier Scientific Pub. Co.

[12] M. D. Engel, P. D. Middlebrook, and G. J. Jameson, (1997) "Advances in the study of high intensity conditioning as a means of improving mineral flotation performance," *Minerals Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 55-68.

[13] S. Farrokhpay, (2011) "The significance of froth stability in mineral flotation — A review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 166, no. 1, pp. 1-7.

[14] S. J. Neethling and P. R. Brito-Parada, (2018) "Predicting flotation behaviour – The interaction between froth stability and performance," *Minerals Engineering*, vol. 120, pp. 60-65.

[15] A. T. Falcucci, Henrique Dias Gatti., (2013) "THE EFFECT OF pH ON FROTH PROPERTIES," presented at the 12 Brazilian Symposium on Iron Ore, São Paulo, 1-4 September.

[16] J. Fang, Y. Ge, and J. Yu, (2021) "Effects of particle size and wettability on froth stability in a collophane flotation system," *Powder Technology*, vol. 379, pp. 576-584.

[17] H. G. N. Hamid Khoshdast, Vahideh Shojaei, (2016) "A new method for determination of frothability of frothers by using water recovery measurement," *International Journal of Mining and Geo-Engineering* vol. 50, no. 2, p. 7.

[18] J. S. Laskowski, S. Castro, and O. Ramos, (2014) "Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 50, no. 1, pp. 17-29.

[19] S. F. M. Ostadrahimi, K. Gharibi, A. Dehghani, and M. Aghajanloo, (2021) "Effects of flotation operational parameters on froth stability and froth recovery," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 121, no. 1, p. 10.

[20] A. Norori-McCormac, P. R. Brito-Parada, K. Hadler, K. Cole, and J. J. Cilliers, (2017) "The effect of particle size distribution on froth stability in flotation," *Separation and Purification Technology*, vol. 184, pp. 240-247.

[21] A. Sobhy and D. Tao, (2019) "Effects of Nanobubbles on Froth Stability in Flotation Column," *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 39, no. 4, pp. 183-198.

[22] J. Leja, (1989) "Interactions among surfactants," *Miner. Procesing Extr. Metall.*, vol. 5, 1-4, pp. 1-24.

[23] M. S. Manono, K. Corin, and J. Wiese, (2018) "Water quality effects on a sulfidic PGM ore: Implications for froth stability and gangue management," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 54, no. 4, pp. 1253-1265.

[24] N. Sheni, K. Corin, and J. Wiese, (2018) "Considering the effect of pulp chemistry during flotation on froth stability," *Minerals Engineering*, vol. 116, pp. 15-23.

[25] J. Wiese, P. Harris, and D. Bradshaw, (2011) "The effect of the reagent suite on froth stability in laboratory scale batch flotation tests," *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 9, pp. 995-1003.

[26] W. Zhang, (2016) "The Effects of Frothers and Particles on the Characteristics of Pulp and Froth Properties in FlotatioŽ A Critical Review," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, vol. 04, pp. 251-269.

[27] W. J. Cooper, R. G. Zika, and M. S. Steinhauer, (1985) "Bromide-Oxidant Interactions and THM Formation: A literature Review," *Journal - AWWA*, vol. 77, no. 4, pp. 116-121.

[28] J. Leja, (1982) *Flotation surfactants in Surface chemistry of froth flotation*. Springer.

[29] A. K. Livshlts and S. V. Dudenkov, (1965) "Some factors in flotation froth stability," presented at the Proc 7th Int. Miner. Process. Congr.

[30] Bulatovic S. M., (2007) "12 - Flotation of Copper Sulfide Ores," in *Handbook of Flotation Reagents*, S. M. Bulatovic Ed. Amsterdam: Elsevier, pp. 235-293.

[31] G. Tsatouhas, S. R. Grano, and M. Vera, (2006) "Case studies on the performance and characterisation of the froth phase in industrial flotation circuits," *Minerals Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 774-783.

[32] M. Zanin, S. Gredelj, and S. Grano, (2008) "Factors affecting froth stability in mineral flotation and implications on minerals recovery: A case of study," presented at the PROCEMIN 2008, Santiago, Chile.

[33] M. Zanin, E. Wightman, S. R. Grano, and J. P. Franzidis, (2009) "Quantifying contributions to froth stability in porphyry copper plants," *International Journal of Mineral Processing*, vol. 91, no. 1, pp. 19-27.

[34] ص. بنیسی (۱۳۹۸)، "جزوه طراحی آزمایش‌ها". کرمان، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

# Effect of pH and reagents on the froth stability in the copper flotation; Case study: Mohammadabad-E-Delijan copper company

**Mahmoud Barfaei, Gholamabbas Parsapour** *

Mining Engineering Group, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

**ABSTRACT**

In the flotation of sulfide minerals, pH and reagent dosage is very important. In the majority of copper flotation circuits, based on an idea, the pH is higher than standard values to increase the froth stability. In this study, to determine the effect of pH and reagent dosages on the froth stability, flotation tests based on the Taguchi design ($L_{27}$) were performed on a sample of flotation circuit of the Mohammadabad-E-Delijan copper company, and froth stability (froth half-life time) was measured. The results showed that, unlike the idea, pH does not have a significant effect on the froth stability. Also, it was shown that froth stability was affected by collector's (Z11 and TC15), and Dowfroth250 (frother) dosages and was not affected by MIBC (frother) dosage. Finally, the highest froth stability was resulted when pH was 11.2, Z11, TC15, Dowfroth250, and MIBC dosages were 20, 15, 20, and 15 g/t, respectively.

**ARTICLE INFO**

Article history:
**Received: March 8, 2021**
**Received in revised form: September 18, 2021**
**Accepted: October 26, 2021**

**Key words:**
Flotation
Lime
pH
Frother
Froth stability

All right reserved.

* Corresponding author
G.parsapour@vru.ac.ir