

## مقاله پژوهشی

## تأثیر آب زیرزمینی، آب دریا و آب شیرین شده دریا بر فلوتاسیون کانی مس - مولیبدن معدن مس سرچشمه

ابوالفضل جمالی<sup>۱</sup>، مجید یونسی<sup>۲\*</sup>، سید مجتبی مرتضوی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، موسسه آموزش عالی علامه جعفری رفسنجان، jamali\_abo@nicico.com  
 ۲. استادیار فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، موسسه آموزش عالی علامه جعفری رفسنجان، majid.unesi@gmail.com  
 ۳. استادیار فرآوری مواد معدنی، گروه مهندسی معدن، موسسه آموزش عالی علامه جعفری رفسنجان، dr.mortazavi.56@gmail.com

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۳)

## چکیده

در پی کاهش منابع آب تازه و نیاز روزافزون جامعه به این منابع، کاهش مصرف آب تازه در صنایع به ویژه صنعت مس مورد توجه است. بدین منظور علاوه بر بازیافت آب، استفاده از آب دریا و آب شیرین شده دریا به عنوان گزینه‌های جایگزین می‌تواند مطرح باشد. از آنجایی که بیشترین مصرف آب در فرآوری کانی‌های سولفیدی مس و مولیبدن در واحد فلوتاسیون است، بنابراین هدف از این تحقیق بررسی تغییرات کیفیت آب در کارایی واحد فلوتاسیون رافر است. نتایج نشان داد که در شرایط عملیاتی مشابه، استفاده از آب دریا موجب کاهش بازیابی کانی‌های سولفیدی مس از ۸۹/۲ درصد به ۶۸/۸ درصد است. این در حالی است که بازیابی فلوتاسیون در هنگام استفاده از آب شیرین شده دریا (۸۰/۸۹ درصد) نزدیک به بازیابی در هنگام استفاده از آب زیرزمینی (۸۹/۲۰ درصد) است. همچنین بازیابی مولیبدن در هر دو حالت به حدود ۱۰۰ درصد رسید، در حالی که این مقدار برای آب دریا ۵۹ درصد بوده است. بنابراین استفاده از آب شیرین شده دریا می‌تواند جایگزین مناسبی برای آب‌های زیرزمینی (شرایط فعلی) باشد.

## کلمات کلیدی

فلوتاسیون مس و مولیبدن، آب شیرین شده دریا، آب دریا، آب زیرزمینی.

\* نویسنده مسئول مکاتبات.

## ۱- مقدمه

در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس، آب عامل کلیدی و ارزشمندی است. مجتمع مس سرچشمه، در ۵۰ کیلومتری جنوب رفسنجان و در ناحیه مرکزی رشته کوه زاگرس قرار گرفته است. این معدن یکی از بزرگترین مجتمع‌های صنعتی معدنی جهان محسوب می‌شود و بزرگ‌ترین تولیدکننده مس ایران است. ذخیره زمین‌شناسی معدن بالغ بر یک میلیارد و دو بیست میلیون تن سنگ سولفوری با عیار متوسط ۰/۷ درصد برآورد شده است. معدن مس سرچشمه از دیدگاه زمین‌شناسی بر روی کمربند جهانی مس قرار دارد و پهنه گسترش آن از جنوب‌شرقی تا شمال‌غربی به صورت یک محدوده بیضوی با ابعاد ۱۲۰۰×۲۳۰۰ متر و ژرفای ۱۶۱۲ متر است. ساختار معدنی در این منطقه به صورت چندبافتی (پورفیری) است و نوع سنگ منطقه از نوع گرانودیوریت و زمان تشکیل آن حدود ۲۵ میلیون سال پیش است. بخش‌های تولیدی مجتمع مس سرچشمه عبارت از معدن، تغلیظ، ذوب، پالایشگاه و ریخته‌گری‌ها و فروشویی (لیچینگ) است. این معدن در استان کرمان که از مناطق خشک ایران است، قرار دارد. خشکسالی سال‌های اخیر در این استان باعث شده نگرانی‌ها نسبت به صنایع آب‌بر افزایش یابد. با توجه به نیاز جامعه و سایر صنایع و بخش کشاورزی به آب تازه، یافتن جایگزین مناسب برای آب تازه از اولویت‌های آینده صنایع از جمله صنعت مس خواهد بود. همچنین بخش زیادی از میزان آبی که در صنعت مس مصرف می‌شود، مربوط به عملیات فلوتاسیون است. بدین منظور در این مطالعه به بررسی تاثیر کیفیت آب بر روی عملکرد واحد فلوتاسیون پرداخته شده است. با توجه به مطالعات انجام شده، یکی از آب‌های مورد استفاده در واحد فلوتاسیون می‌تواند، آب دریا باشد. مطالعات مختلفی در زمینه استفاده از آب دریا در فلوتاسیون توسط محققان انجام شده است. لوکای و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که وجود محیط نمکی با غلظت بالا ناشی از آب دریا باعث کاهش کارایی در عملیات فلوتاسیون می‌شود، با این حال آن‌ها دریافتند که محیط نمکی با غلظت بالا به خودی خود بر روی عملیات فلوتاسیون تاثیر منفی نمی‌گذارد و حتی می‌تواند اثرات مثبتی نیز داشته باشد زیرا بازیافت برخی مواد معدنی با ارزش را به همراه دارد [۱۹]. پییه و همکاران (۱۹۹۷) بیان کردند که وجود نمک‌های غیرآلی با غلظت بالا ممکن است باعث پایداری مرز هوا و مایع شود (افزایش کشش سطحی آب) که این امر مانع از به هم پیوستگی حباب‌ها و بالطبع افزایش ماندگی حباب در سیستم فلوتاسیون می‌شود [۲۲]. نخعی و همکاران (۱۳۹۴) بیان کردند که یون‌های یک و

دو ظرفیتی موجود در آب دریا می‌توانند بر شیمی سطح کانی‌ها تاثیر بگذارند. به طوری که یون‌های دو ظرفیتی در pHهای قلیایی به صورت رسوبات کلوییدی در سطح ذرات ظاهر می‌شوند و کارایی فلوتاسیون را کاهش می‌دهند [۱].

یون‌های فلزی در محلول‌های قلیایی هیدرولیز می‌شوند و به صورت هیدروکسید، سولفات و یا کربنات‌های فلزی آب‌دوست رسوب می‌کنند. کیتچنه (۲۰۰۹) مشاهده کرد که رسوب این هیدروکسیدها بر روی سطوح کانی باعث آب‌دوست شدن سطح ذره شده و در نتیجه مانع جذب کلکتور در سطح می‌شود [۱۴]. یون‌های کلسیم، آهن و آلومینیوم کاتیون‌هایی‌اند که اغلب در تحقیقات به عنوان گونه‌هایی که بر روی سطح ذره رسوب می‌کنند، شناخته می‌شوند به طوری که به عنوان مثال، هور و همکاران (۱۹۸۰)، اثرات منفی آن‌ها در بازیابی فلوتاسیون را گزارش کردند [۱۲]. کاهش آبرانی سطح ذرات به علت رسوب هیدروکسیدهای فلزی می‌تواند کارایی فرآیند پیوستگی ذرات به حباب را تحت تاثیر قرار دهد [۱۵]. به طور مثال، هنگامی که یون‌های کلسیم و سیلیکات‌ها در محیط فلوتاسیون همسو می‌شوند، شناور شدن ذرات مولیبدن به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲۳]. بعضی از یون‌های فلزی نیز می‌توانند به طور غیرمستقیم ذرات باطله را فعال کنند و انتخابی بودن فلوتاسیون را کاهش دهند. برای مثال، یون‌های فلزی مانند سرب، نقره و آهن در آب فلوتاسیون به عنوان ناخالصی‌ها موجودند و می‌توانند به طور ناگهانی سطح اسفالریت را فعال کنند [۵]. بنابراین تغییر ماهیت آب با افزایش املاح موجود در آن باعث تشکیل یک لایه بر روی سطوح کانی‌های با ارزش می‌شود و بازداشت آن‌ها در مدار فلوتاسیون را به همراه دارد. کاتیون‌های فلزی و آنیون‌ها نیز با تاخیر در واکنش‌های فلوتاسیون ممکن است اثر منفی بر عملکرد فلوتاسیون داشته باشند. به عنوان مثال، وجود آنیون‌ها در پساب تصفیه شده در حضور اکسیژن تاثیر منفی بر بازیابی فلوتاسیون مس و مولیبدن دارد [۹]. ماریانا و همکاران (۲۰۱۰) نیز بیان کردند که در فلوتاسیون آپاتیت، اندرکنش یون کلسیم با کلکتور باعث کاهش غلظت کلکتور در محیط شده بازیابی آپاتیت را کاهش می‌دهد [۲۰].

کریستن (۲۰۰۵) بیان کرد که وجود الکترولیت‌ها می‌تواند شناورسازی ذرات با ارزش را بهبود دهد، به طوری که افزایش الکترولیت‌ها موجب تسریع جذب ذرات به حباب می‌شود. همچنین کاهش تقارن الکترواستاتیکی بین ذرات یا بین ذره و حباب ممکن است به نوبه خود جذب هیدرولیکی سیلیکات‌ها را

درصد جامد در آزمایش‌ها فلوتاسیون ۲۸ درصد در نظر گرفته شد. آنالیز XRF این نمونه در جدول ۲ نشان داده شده است. بدین منظور از دستگاه XRF (X-ray Fluorescence Spectroscopy) مدل ARL-9900 Thermo scientific استفاده شد.

جدول ۱- آنالیز آب‌های مورد آزمایش.

آب TW	آب SW	آب WW	آیتم‌ها	
۸٫۵	۸	۷٫۹	Unit	pH
۱۳۰۰	۲۹۰۰۰	۵۶۰	μs/cm	COND
	۱۳۵	۱۲۰	ppm	M.ALK
۱۵۰	۷۵۶۰	۷۸	ppm	T.H
	۲۵۲۰	۶۷	ppm	Ca.H
۱ تا ۰٫۵	۱۷۳۵۰	۲۸	ppm	Cl <sup>-</sup>
	۵۰۴۰	۱۱	ppm	Mg.H
۲۵۰	۲۵۰۰	۷۰	ppm	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
۱۵	۱۲۱۱	۲٫۶	ppm	Mg <sup>2+</sup>
۶۰	۱۰۰۸	۲۶٫۸	ppm	Ca <sup>2+</sup>
۱۰۰۰ تا ۵۰۰	۱۴۰۶۵	۲۳۳	ppm	TDS
	۰٫۵	۹۴	ppm	SiO <sub>2</sub>
۰٫۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	ppm	Fe
۲	۰٫۱۳	۰٫۰۱	ppm	Cu
۳	۰٫۰۵	۰٫۰۱	ppm	Zn
۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۱	ppm	Mn
۰٫۲	۰٫۰۶	۰٫۰۱	ppm	Al
۲۰۰			ppm	Na
۲٫۴			ppm	Br
صفر تا ۰٫۵				LSI

در حال حاضر در واحد فلوتاسیون رافر مجتمع مس سرچشمه از کلکتورهای Z11 (سدیم ایزوپروپیل گزنات) از شرکت FLORREA به مقدار ۱۵ گرم بر تن، C7240 (دی تیوفسفات) از شرکت SNF به مقدار ۲۰ گرم بر تن و کف‌سازهای MIBC (متیل ایزو بوتیل کربونیل) از شرکت Quingdao به مقدار ۱۰ گرم بر تن و کف‌ساز A65 (پلی گلیکول اتر) از شرکت CYTEC به مقدار ۱۵ گرم بر تن استفاده می‌شود. برای مقایسه بهتر شرایط آزمایش با شرایط فعلی کارخانه از این مواد شیمیایی در آزمایش‌ها نیز استفاده شد. جدول ۳ میزان مصرف هر یک از این مواد شیمیایی و سایر شرایط آزمایش را نشان می‌دهد.

کاهش دهد و در نتیجه باعث افزایش جذب ذرات با ارزش به حساب شود [۱۶]. الکترولیت‌ها، حباب‌های پایدار کوچک‌تر ایجاد می‌کنند که این امر ناشی از تاثیر الکترولیت‌ها بر کشش سطحی آب است [۲۲]. حباب‌های کوچک‌تر احتمال برخورد ذرات به حباب را افزایش می‌دهد و موجب بهبود کارایی جذب ذرات به حساب می‌شوند [۲].

با توجه به مطالعات اخیر می‌توان دریافت که آب با کیفیت‌های مختلف می‌تواند اثرات متفاوتی بر روی عملکرد واحد فلوتاسیون داشته باشد. بنابراین در این مقاله به بررسی تاثیر آب دریا (از سواحل هرمزگان) آب شیرین شده دریا و آب زیرزمینی (که کیفیت‌های متفاوتی نسبت به هم دارند) بر روی شناورسازی کانی‌های مس و مولیبدن پرداخته شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

آب دریا (SW) از سواحل هرمزگان که در جنوب ایران و در شمال تنگه هرمز قرار دارد و کرانه‌های آن در شرق بر دریای عمان و در غرب بر خلیج فارس قرار دارند، تهیه شد. آب شیرین شده دریا (TW) نیز در آزمایشگاه آب مجتمع مس سرچشمه، با توجه به آنالیز ارسالی از شرکت مهندسی توسعه آب آسیا (زیر مجموعه شرکت تامین و انتقال آب خلیج فارس) که هم اکنون در حال اجرای پروژه در استان هرمزگان، شهر بندرعباس، کیلومتر ۳۶ جاده بندرعباس- خمیر، شهرک صنعتی خلیج فارس واقع در غرب بندرعباس است، تهیه شد. همچنین آب زیرزمینی (WW) از چاه‌های آب خاتون‌آباد که یکی از شهرهای شهرستان شهربابک در استان کرمان است تهیه شد. هم اکنون از این آب برای مجتمع مس سرچشمه استفاده می‌شود. آنالیز این آب‌ها در جدول ۱ آورده شده است. از pH متر مدل metrohm و conductometer مدل metrohm برای تعیین pH و Eh استفاده شد. همچنین از دستگاه‌های Varian Cany 50 Bio uv-visible spectrophotometer و Spectrolab S20-F Automatic Flame Photometer و Varian ICP برای آنالیز عنصری آب استفاده شد.

نمونه خاک مورد آزمایش از بار ورودی به آسیاهای اولیه کارخانه تغلیظ فاز صفر با دانه‌بندی ۸۰ درصد کوچک‌تر از ۱۲٫۷ میلی‌متر تهیه شد. این نمونه، طی دو مرحله سنگ شکنی و یک مرحله سردکنی به صورت سیکل بسته تا ابعاد ۸۰ درصد کوچک‌تر از ۱۷۰۰ میکرون مورد خردایش قرار گرفت، سپس از آسیای آزمایشگاهی برای تهیه نمونه با ابعاد ۷۰ درصد کوچک‌تر از ۷۴ میکرون استفاده شده است. همچنین جزو نمونه‌ای برای تعیین دانسیته جامد آن تهیه شد.

جدول ۲- آنالیز XRF خاک.

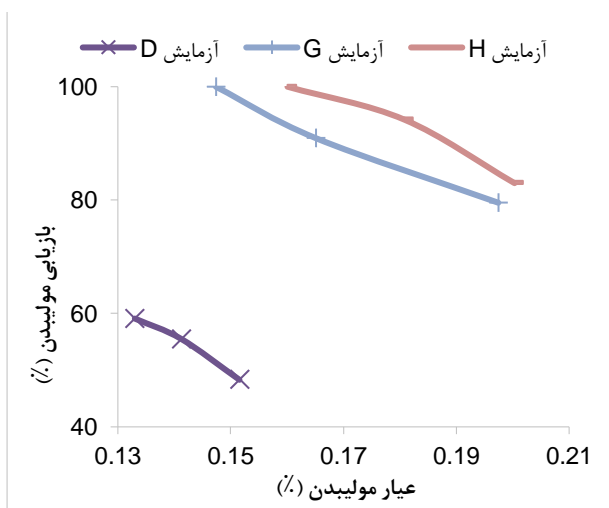
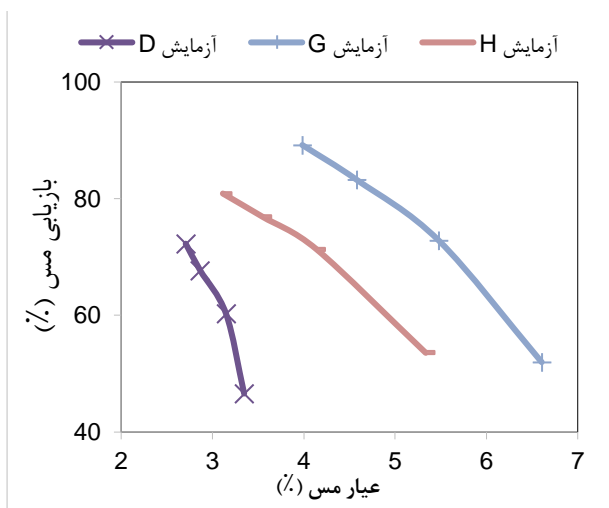
عنصر	Cu	Fe	Mo	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO
درصد	۰٫۵۸	۷٫۳۴	۰٫۰۲۲	۶۵٫۹۴	۱۴٫۶۷	۰٫۰۵

جدول ۳- میزان مصرف مواد شیمیایی برای هر آزمایش.

نوع آب	pH	مواد شیمیایی (گرم بر تن)				آزمایش
		Z11	C7240	MIBC	A65	
SW	۷	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	A
SW	۸٫۵	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	B
SW	۱۰	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	C
SW	۱۱٫۸	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	D
SW	۱۰	۳۰	۴۰	۲۰	۳۰	E
SW	۱۰	۴۵	۶۰	۲۰	۳۰	F
WW	۱۱٫۸	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	G
TW	۱۱٫۸	۱۵	۲۰	۱۰	۱۵	H

همپوشانی لایه پراکنده متشکل از یون‌های الکترولیت است. با افزایش غلظت الکترولیت، چگالی یون‌ها در محلول افزایش می‌یابد، بنابراین یون‌های با بار مخالف موجود در لایه پراکنده به لایه استرن وارد می‌شود که باعث می‌شود لایه پراکنده ضخیم شود این امر ناشی از افزایش نیروی جاذبه و کاهش نیروی دافعه است [۲۷].

فشرده شدن دو لایه الکتريکی در آب شور باعث نازک شدن و پارگی فیلم مرطوب بین حباب‌ها و ذرات و مانع تشکیل اگرگات حباب- ذره می‌شود که یک پدیده مهم در شناورسازی است. فشرده شدن دولایه الکتريکی در آب شور همچنین باعث تجمع ذرات در فلوتاسیون می‌شود، بنابراین بر بازیابی مس و مولیبدن تأثیر می‌گذارد [۲۷].



شکل ۱- مقایسه مقادیر بازیابی- عیار مس در آزمایش‌ها فلوتاسیون رافر با استفاده از آب‌های SW، WW، TW تحت شرایط فعلی کارخانه (pH برابر با ۱۱٫۸، A65 برابر با ۱۵ گرم بر تن، MIBC برابر با ۱۰ گرم بر تن، C7240 برابر با ۲۰ گرم بر تن و Z11 برابر با ۱۵ گرم بر تن).

از یک سلول ۲/۲ لیتری و دستگاه فلوتاسیون آزمایشگاهی مدل D12 دنور برای انجام این آزمایش‌ها استفاده شد. همچنین برای آزمایش ارتفاع کف از یک سلول فلوتاسیون ۲ لیتری شفاف استفاده شد. در این آزمایش از کف‌ساز A65 با مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ گرم بر تن استفاده شد. مقادیر ارتفاع کف در دور همزن‌های ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقدار آهک مصرفی و تغییرات pH برای هر یک از آب‌ها ثبت شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تأثیر یون‌های موجود در آب

همان‌طور که بیان شد، آزمایش‌ها بر روی سه نوع آب (SW، WW، TW) انجام شد و نتایج آنالیز کانی‌های مس و مولیبدن و آهن به صورت مرحله‌ای و تجمعی مورد بررسی قرار گرفت و برای تجزیه و تحلیل نتایج بازدهی جدایش کانی‌های مس و مولیبدن محاسبه شد. برای بررسی تأثیر کیفیت آب بر روی شناورسازی کانی‌های با ارزش، نتایج آزمایش‌های D، G و H مورد مقایسه قرار گرفت (شکل ۱).

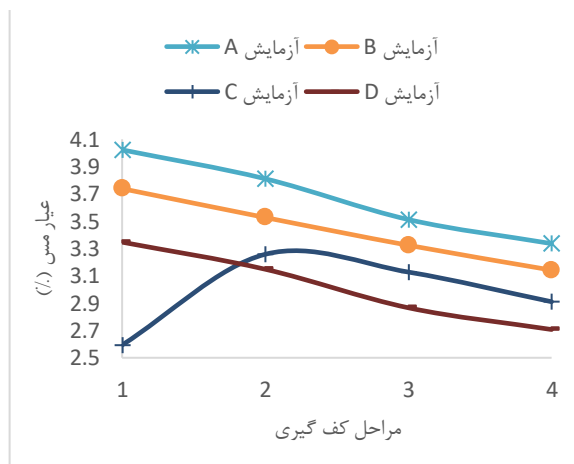
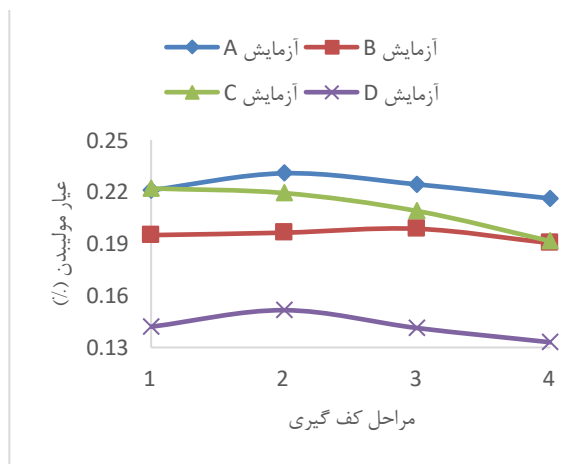
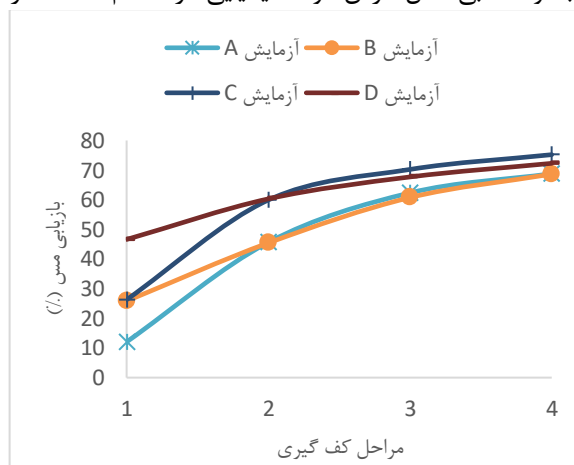
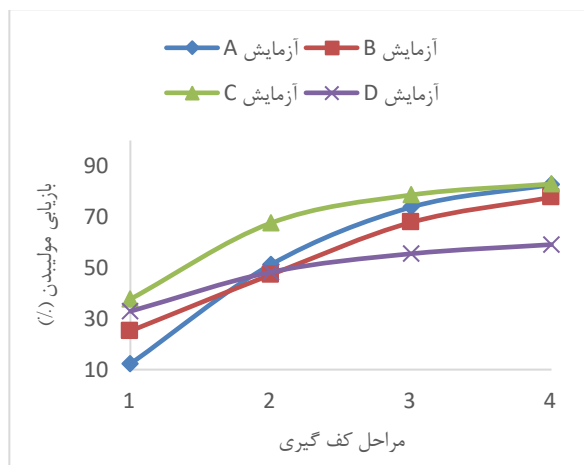
تئوری DLVO نیروهای بین سطوح باردار را که از طریق یک محیط مایع برهم کنش دارند، توصیف می‌کند. این تئوری نیروهای جاذبه وان‌دروالس و دافعه الکترواستاتیک ناشی از دو لایه الکتريکی در محلول‌های آبی را بین ذرات و حباب‌ها در نظر می‌گیرد. اندرکنش دو لایه الکتريکی تنها به دلیل

آب TW بیشتر است. عیار و بازیابی مولیبدن در هنگام استفاده از آب SW مشابه مس با کاهش شدید همراه بوده است.

در این آزمایش‌ها برای افزایش pH تا ۱۱٫۸ از آهک استفاده شده است. وجود یون‌های مزاحم در آب SW باعث شد تا برای افزایش pH به ۱۱٫۸ نیاز به افزایش مقدار قابل توجهی آهک باشد، بنابراین این مقدار آهک موجب افزایش رسوب یون‌های منیزیم و کلسیم بر روی سطح کانی‌های با ارزش و کاهش قابل توجه در شناورسازی آن‌ها شد. این امر توسط سایر محققان نیز مشاهده شد، به طوری که پانده و همکاران (۲۰۱۸) نشان دادند که جذب رسوبات  $\text{CaCO}_3$  و  $\text{Mg(OH)}_2$  بر سطح کانی‌های سولفیدی مس موجب تغییر در آبرانی سطح شده و باعث کاهش بازیابی می‌شود [۱۰]. همچنین کیتچنه (۲۰۰۹) نشان داد که وجود یون‌های فلزی و نمکی بالا موجود در آب دریا می‌تواند بر روی سطح کانی‌های با ارزش رسوب کند و مانع از شناور شدن آن‌ها شود [۱۴]. بر اساس تئوری DLVO، یک نیروی جاذبه الکترواستاتیک بسیار قوی بین ذرات  $\text{CuFeS}_2$  و کلوئیدهای  $\text{Mg(OH)}_2$  وجود دارد که منجر به تجمع ذرات و هیدروفیل کردن سطح  $\text{CuFeS}_2$  شود [۱۸].

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بهترین مقادیر عیار و بازیابی مس در آزمایش با آب WW (آزمایش G) بدست آمد. پس از آن آزمایش با آب TW (آزمایش H) بیشترین مقادیر عیار و بازیابی مس را داشته است. افزایش سختی آب و هدایت الکتریکی می‌تواند یکی از دلایل کاهش عیار و بازیابی مس در این آب نسبت به آب WW باشد. مقادیر عیار و بازیابی مس در آزمایش با آب SW (آزمایش D) در مقایسه با دو آب دیگر بسیار پایین بوده است. این امر نشان می‌دهد، وجود یون‌های مزاحم مانند منیزیم و کلسیم در کاهش عیار و بازیابی مس نقش اساسی دارند. این یون‌ها علاوه بر اینکه باعث افزایش سختی و هدایت الکتریکی بالا می‌شوند، خود نیز به طور مستقیم می‌توانند عامل منفی در شناورسازی کانی‌های با ارزش باشند.

نتایج عیار و بازیابی برای مولیبدن در آب‌های WW و TW در مقایسه با مس متفاوت بوده است، به طوری که مقادیر عیار و بازیابی مولیبدن در آزمایش با آب WW (آزمایش G) نسبت به آب TW (آزمایش H) کمتر بوده است ولی بازیابی نهایی در هر دو آب ۱۰۰ درصد شده است. این نشان می‌دهد که هنگام استفاده از آب WW میزان بیشتری از باطله به‌همراه مولیبدن به کنسانتره راه می‌یابد و انتخابی عمل کردن مواد شیمیایی در هنگام استفاده از



شکل ۲- تاثیر pH بر بازیابی و عیار مس، مولیبدن در آب SW.

## ۳-۲- تأثیر pH

محیط است [۲۴]. کمپلکس‌های هیدروکسی منیزیم و هیدروکسید منیزیم قویا در فصل مشترک گاز - مایع وجود دارند. این جذب باعث می‌شود تا سطح حباب‌ها به صورت مثبت باردار شود. بدون تردید هر نوع تجمع رسوب در سطح حباب‌ها، به طور مستقیم می‌تواند در فرآیند شناورسازی تأثیرگذار باشد [۶، ۸ و ۱۱].

مطالعات اخیر نشان داد که در فلوتاسیون کالکوپریت با استفاده از آب دریا، افزایش pH از ۸/۳ به ۱۱ باعث کاهش عیار مس از ۱۰/۳ به ۵/۵ درصد شده است. بنابراین کانی‌شناسی کانی‌های سولفیدی مس نیز در شناورسازی مس در آب دریا تأثیرگذار است. همچنین هیدروکسید منیزیم و کلسیم به طور الکترواستاتیکی در سطح کالکوپریت اندرکنش ایجاد می‌کند و به صورت جذب سطحی نیست، بنابراین وجود این گونه‌ها در سطح کالکوپریت ضعیف است [۴]. این حالت در مورد سایر کانی‌های سولفیدی مس (کالکوسیت، بورنیت یا انرژیت) متفاوت است و جذب بر روی آن‌ها کاملا به pH حساس است [۲۵ و ۲۸]. علاوه بر این وجود کانی‌های رسی نیز می‌تواند باعث پوشش‌دهی سطح کانی‌های سولفیدی مس شده و مانع اندرکنش آن‌ها با حباب‌ها و یا کلکتور شود. این پدیده و درگیری مکانیکی می‌تواند یکی از دلایل کاهش عیار و بازیابی مس در آب دریا در محیط قلیایی باشد [۱۳ و ۲۶]. زیرا مقایسه شناورسازی کانی‌های سولفیدی مس در pH طبیعی و قلیایی نشان داد که کانی‌های رسی آهنگ فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس را کاهش می‌دهند [۷]. با توجه به اینکه سایر کانی‌های سولفیدی مس مانند کالکوسیت و نیز کانی‌های رسی به وفور در بار ورودی به سلول‌های رافر سرچشمه وجود دارند، بنابراین این عوامل نیز در کاهش عیار و بازیابی تأثیرگذارند.

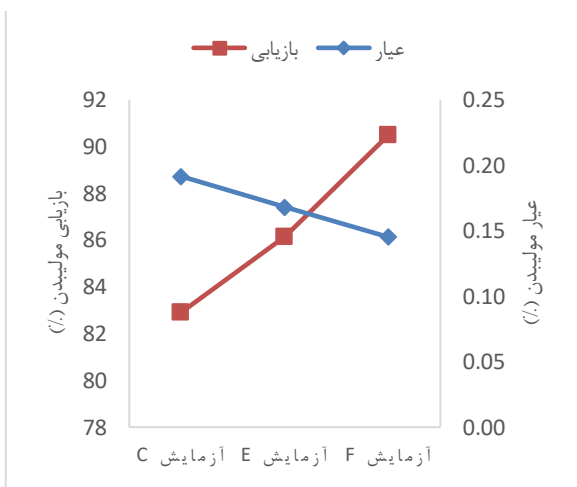
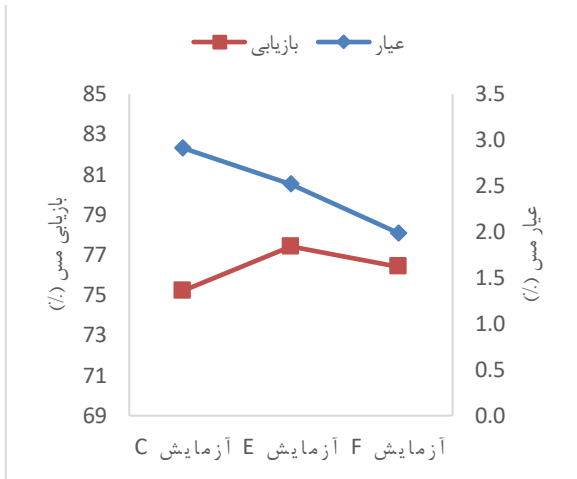
در نمودار عیار مس در شکل ۲ ملاحظه می‌شود که در آزمایش C، مقدار عیار مس در مرحله اول کف‌گیری کمترین مقدار را دارد و سپس افزایش می‌یابد. به طور معمول در مرحله اول کف‌گیری کانی‌های با ارزش که به خوبی آبران شده‌اند، به همراه کف به کنسانتره راه پیدا می‌کنند، بنابراین اصولا عیار در مرحله اول نسبت به سایر مراحل بیشتر است و به همین ترتیب تا مرحله چهارم که به تدریج عیار کاهش می‌یابد اما این امر در آزمایش C رخ نداد و حداقل عیار در مرحله اول بدست آمد که نشان می‌دهد در مرحله اول قدرت شناوری ذرات باطله بیشتر بوده است و در ادامه با افزایش زمان این فرآیند اصلاح شد. به عبارت دیگر زمان مرحله اول کف‌گیری برای آزمایش C باید بیشتر از سایر آزمایش‌ها در نظر گرفته شود. لازم به توضیح

شکل ۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آب SW در pH های مختلف را نشان می‌دهد. آزمایش‌های A و B دارای بازیابی پایین و عیار مس بالایی است که می‌تواند به دلیل پایین بودن pH باشد زیرا در شناورسازی کانی‌های سولفیدی مس، بهترین کارایی در pH های بالای ۱۰ رخ می‌دهد. کارایی جدایش مس آزمایش‌های A و B و C و D نیز به ترتیب ۶۰/۹۰، ۶۴/۱۵، ۶۱/۳۵ درصد بدست آمد، همانطور که ملاحظه می‌شود، در آزمایش C با افزایش pH به ۱۰، مقادیر عیار و بازیابی قابل قبولی بدست آمد و حداکثر کارایی جدایش را دارد. به طور کلی آهک به عنوان تنظیم‌کننده pH و همچنین بازداشت‌کننده پیریت در فلوتاسیون مس - مولیبدن استفاده می‌شود. همچنین بازداشت پیریت در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس معمولا در pH بین ۱۰ تا ۱۱ رخ می‌دهد که برای رسیدن به این pH در آب دریا، نیاز به مصرف زیاد آهک است [۱]. بنابراین افزایش pH در آب دریا از ۱۰ به ۱۱/۸ نیز باعث افزایش مصرف آهک شد، بنابراین این مقدار آهک موجب افزایش یون‌های منیزیم و کلسیم در محیط فلوتاسیون و در نتیجه رسوب آن‌ها بر روی سطح کانی‌های با ارزش شد. کاهش عیار و بازیابی مس در آزمایش D نسبت به آزمایش C نیز از این امر ناشی می‌شود.

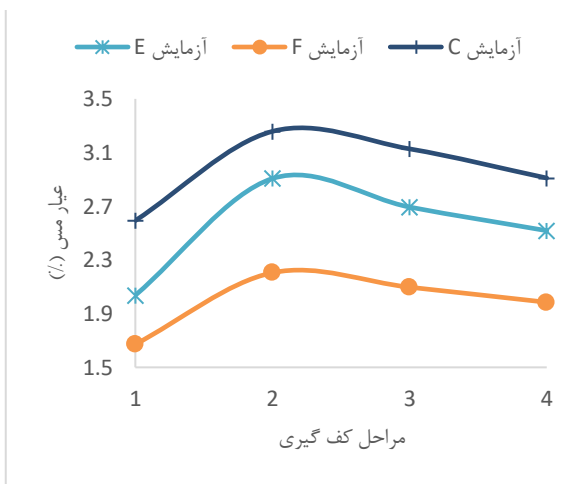
در مورد مولیبدن نیز حداقل عیار و بازیابی مولیبدن در pH ۱۱/۸، حاصل شد در حالی که در سایر pH ها مقادیر عیار و بازیابی نزدیک به هم بودند. بنابراین افزایش pH بالای ۱۰ تأثیر منفی در عیار و بازیابی مولیبدن خواهد داشت. بیشترین مقدار بازیابی در A و C حاصل شد که مقدار آن به ترتیب ۸۲/۶۵ و ۸۲/۹ درصد بوده است. مقادیر عیار نیز در تمامی آزمایش‌ها روند تقریبا ثابتی را در مراحل مختلف کف‌گیری داشته است.

کاهش عیار و بازیابی مولیبدن در pH بالا را می‌توان به وجود یون‌های کلسیم اضافی در سیستم مرتبط دانست. به طوری که هیدرولیز یون‌ها نقش مهمی را در فلوتاسیون ایفا می‌کند. استفاده از آهک در فلوتاسیون با آب دریا منجر به رسوب هیدروکسید منیزیم می‌شود که نسبت به هیدروکسید کلسیم قابلیت انحلال کمتری دارد [۳ و ۱۷]. جذب یون کلسیم در سطح مولیبدن و ایجاد ژپیس در محلول منجر به تشکیل آگلومرها می‌شود که سطح مولیبدنیت را پوشش داده و آبرانی مولیبدن را کاهش می‌دهد [۱۹].

پارامتر دیگری که باید در نظر گرفته شود باردار شدن حباب هوا با کمپلکس‌های هیدروکسی کاتیونی موجود در



شکل ۳- تاثیر غلظت مواد شیمیایی بر عیار و بازیابی مس و مولیبدن.



شکل ۴- عیار مس در مراحل مختلف کفگیری.

در شناورسازی کالکوپیریت در برابر پیریت، بازیابی پیریت در آب دریا بالاتر از آب تازه است و علت آن فعالسازی قوی تر مس در سطح پیریت در آب دریا است. به دلیل هدایت الکتریکی زیاد، آب دریا اکسیداسیون و انحلال کالکوپیریت را

است که کفگیری در زمان‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۰ دقیقه انجام شد که به ترتیب مراحل اول تا چهارم کفگیری‌اند.

### ۳-۳- تاثیر غلظت مواد شیمیایی

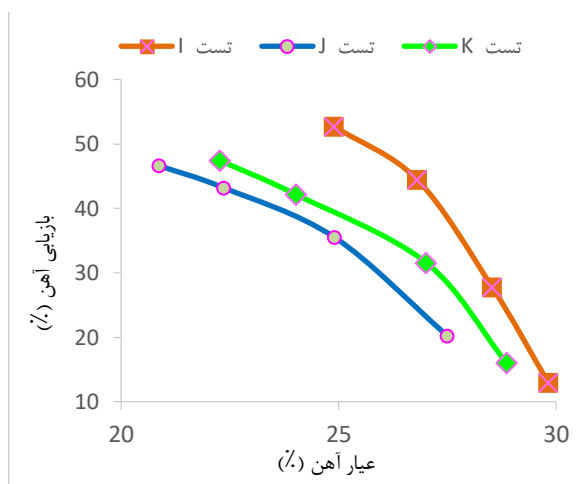
همان‌طور که در بخش قبل ملاحظه شد، بهینه‌ترین pH برای فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس در آب دریا (SW) ۱۰ بوده است (آزمایش C)، بنابراین تاثیر غلظت مواد شیمیایی در کارایی فلوتاسیون در این pH مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن مقادیر مصرف مواد شیمیایی در آزمایش C، غلظت کلکتورها و کف‌سازها در آزمایش E، ۲ برابر و در آزمایش F به ترتیب ۳ و ۲ برابر آزمایش C در نظر گرفته شد و نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، افزایش غلظت مواد شیمیایی باعث کاهش عیار مس و مولیبدن می‌شود که می‌تواند به دلیل راهیابی بخشی از ذرات میانی و باطله به ناحیه کف باشد. علاوه بر این بازیابی مس با افزایش غلظت مواد شیمیایی افزایش می‌یابد (آزمایش E) که با توجه به کاهش عیار منطقی است ولی افزایش بیش از اندازه مواد شیمیایی باعث کاهش بازیابی مس شد که می‌تواند به دلیل پدیده میسلی شدن ناشی از افزایش کلکتور باشد. البته این مورد در مولیبدن صدق نمی‌کند و افزایش غلظت مواد شیمیایی باعث افزایش بازیابی مولیبدن می‌شود و از آنجایی که مولیبدن یک کانی آبران طبیعی است، بنابراین ماهیت شناورسازی حتی بدون مواد شیمیایی را نیز دارد.

نکته جالب توجه در آزمایش‌های C، E و F این است که در آزمایش‌های E و F مشابه آزمایش C مقدار عیار در کفگیری مرحله اول کمتر از سایر مراحل است در حالی که باید بیشترین مقدار عیار در این مرحله باشد (شکل ۴). بنابراین می‌توان استنباط کرد که زمان مورد نیاز در مرحله ابتدایی کفگیری در هنگام استفاده از آب دریا وابسته به شرایط آزمایش و به ویژه پارامتر pH است زیرا در سایر pHها این اتفاق رخ نداده است.

### ۳-۴- تاثیر سختی و هدایت الکتریکی

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود مقدار بازیابی آهن در آزمایش H نسبت به آزمایش D و G بیشتر است که ناشی از هدایت الکتریکی بالای این آب است. بالا بودن هدایت الکتریکی آب موجب ایجاد پیریت فعال در فلوتاسیون کانی‌های سولفیدی مس می‌شود [۲۹ و ۳۰]. آب دریا در آزمایش D نیز دارای هدایت الکتریکی بالایی است. سختی بالای این آب و همچنین مصرف زیاد آهک در این آزمایش نسبت به آزمایش H، باعث بازداشت پیریت شده است.

الکتریکی آب موجب ایجاد پیریت فعال در پالپ شده و در نتیجه عنصر آهن به کنسانتره راه می‌یابد.

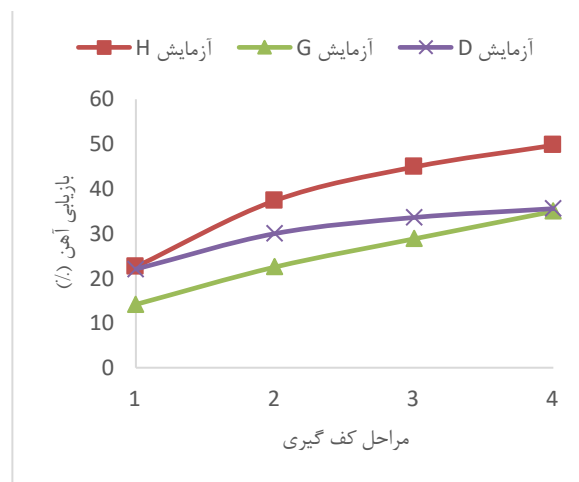


شکل ۶- تأثیر هدایت الکتریکی بر عیار و بازیابی آهن در فلوتاسیون مس، آزمایش I: آب TW با هدایت الکتریکی ۱۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، آزمایش J: آب TW با هدایت الکتریکی ۱۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و ماده شیمیایی SMBS (سدیم متابی سولفیت)، آزمایش K: آب TW با هدایت الکتریکی ۷۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر.

### ۵-۳- تأثیر کیفیت آب بر ارتفاع کف و مصرف آهک

ارتفاع کف بر روی هر سه نمونه آب در مقادیر ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ گرم بر تن کف‌ساز A65 (پلی گلیکول اتر) و چهار دور همزن متفاوت (۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه) انجام شد (شکل ۷). همچنین در هر سه نمونه آب مقدار ۰/۵ گرم بر لیتر آهک اضافه شد و تغییرات pH بدین گونه بود که آب SW از ۸/۵ به ۱۰/۵۵ رسید، آب TW از ۸/۴۸ به ۱۲/۳۷ افزایش یافت و آب WW نیز از ۸/۶۲ به ۱۲ افزایش یافت. میزان تغییر کم آب SW نسبت به سایر آب‌ها می‌تواند وجود یون‌های کلسیم و منیزیم بالای این آب باشد که موجب رسوب آهک شده است. در ادامه با توجه به آزمایش‌ها ارتفاع کف انجام شده ملاحظه می‌شود ارتفاع کف برای آب SW نسبت به آب WW و آب TW بیشتر است و همچنین آب TW ارتفاع کف بالاتری نسبت به آب WW دارد. ارتفاع کف زیاد آب SW و آب TW نسبت به آب WW می‌تواند ناشی از بالا بودن TDS (کل مواد جامد محلول) در این دو آب باشد، پبیه و همکاران (۱۹۹۷) بیان کردند که وجود نمک‌های غیرآلی با غلظت بالا ممکن است باعث پایداری مرز هوا و مایع شود (افزایش کشش سطحی آب) که این امر مانع از بهم پیوستگی حباب‌ها و بالطبع افزایش ماندگی حباب در سیستم فلوتاسیون می‌شود [۲۲].

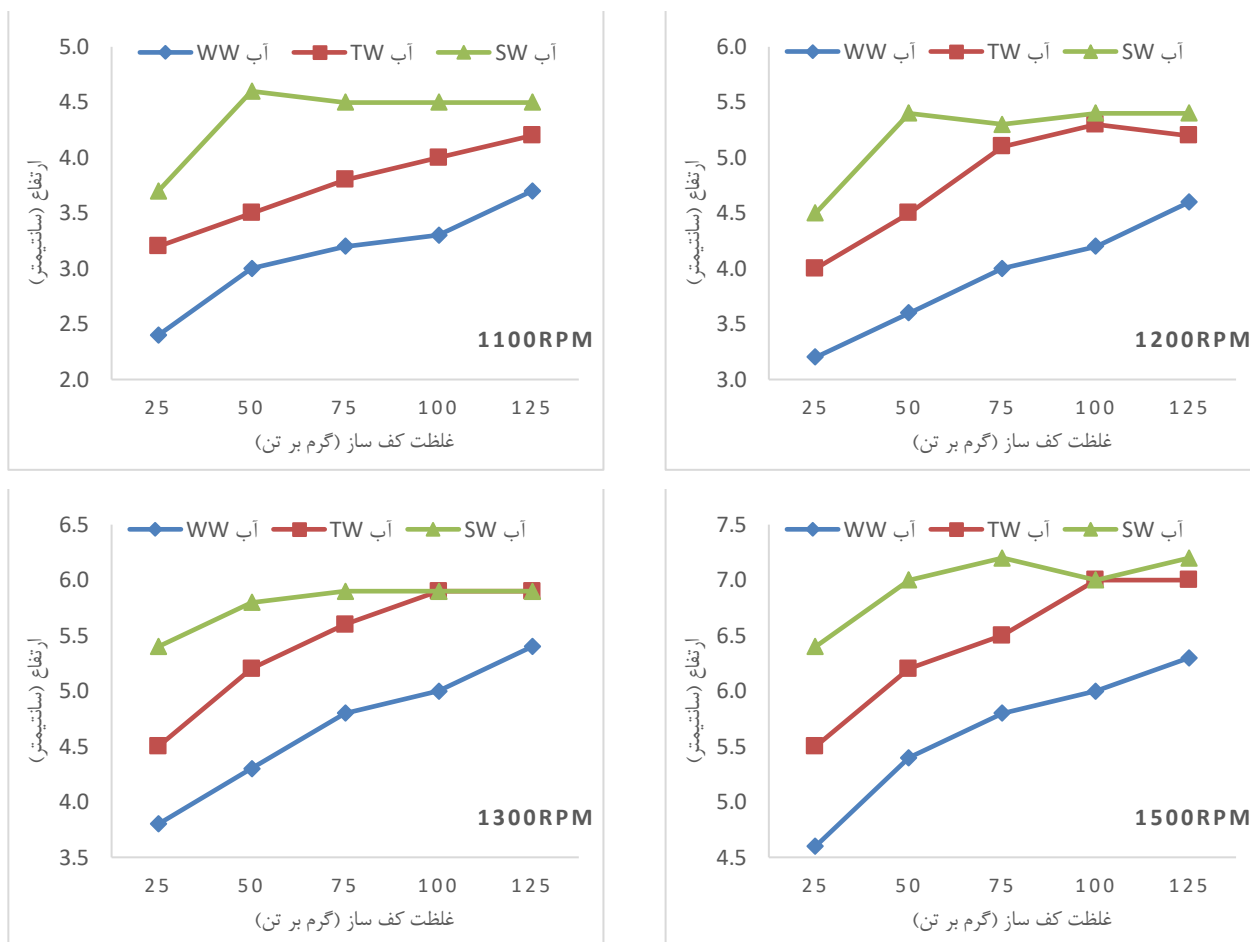
افزایش داده است و منجر به تولید مقدار بیشتری یون مس موجود برای فعال‌سازی مس در سطح پیریت می‌شود. به طور همزمان، میزان پایین Eh در آب دریا روند فعال‌سازی مس را تسهیل می‌کند [۲۱]. این مورد در مقایسه آزمایش D و G کاملاً مشهود است.



شکل ۵- بازیابی آهن در فلوتاسیون رافر با استفاده از آب‌های WW، SW و TW تحت شرایط فعلی کارخانه.

برای بررسی بهتر تأثیر هدایت الکتریکی و سختی بر بازیابی آهن، سه آزمایش مجزا بر روی آب شیرین شده دریا (TW) انجام شد (شکل ۶). در آزمایش I از آب شیرین‌سازی شده دریا با هدایت الکتریکی ۱۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر، در آزمایش J از آب شیرین شده دریا با هدایت الکتریکی ۱۳۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و ۳۰۰ گرم بر تن ماده شیمیایی SMBS (سدیم متابی سولفیت) و در نهایت در آزمایش K از آب شیرین شده دریا با هدایت الکتریکی ۷۳۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر استفاده شد. سایر شرایط مشابه شرایط کارخانه که قبلاً بیان شده بود در نظر گرفته شد. استفاده از بازدارنده‌های با عنوان سولفوکسی، از قبیل سولفیت، بی‌سولفیت، متابی‌سولفیت و دی‌اکسید سولفور برای کنترل فلوتاسیون ناخواسته کانی‌های سولفیدی در محیط‌های با قلیائیت متوسط است. بازدارنده‌های اکسی‌سولفور (سولفوکسی) با تشکیل گونه‌های سولفیت، بی‌سولفیت، متابی‌سولفیت و یا دی‌اکسیدسولفور موجب بازداشت پیریت، اسفالریت و گالن می‌شود. نتایج نشان داد که آزمایش J به دلیل استفاده از ماده شیمیایی SMBS (سدیم متابی سولفیت) که بازداشت‌کننده مناسبی برای کانی پیریت است، کمترین عیار و بازیابی آهن را نتیجه داده است و بعد از آن آزمایش K بوده است که احتمالاً این پایین بودن عیار و بازیابی آهن نسبت به آزمایش I به دلیل پایین بودن هدایت الکتریکی آب مورد استفاده است زیرا بالا بودن هدایت





شکل ۷- تاثیر کیفیت آب بر ارتفاع کف.

عیار و بازیابی آهن را نتیجه داده است، بنابراین می‌تواند جایگزین مناسبی برای آهنک باشد زیرا رسوب کلسیم بر روی کانی‌های با ارزش در هنگام استفاده از آهنک زیاد است. آزمایش ارتفاع کف نیز نشان داد که ارتفاع کف زیاد در هنگام استفاده از آب دریا و آب شیرین شده دریا نسبت به آب زیرزمینی می‌تواند ناشی از بالا بودن TDS (کل مواد جامد محلول) در این دو آب باشد.

#### منابع

۱. نخعی، فردیس؛ ۱۳۹۴؛ «استفاده از آب دریا در فلوتاسیون مس مولیبدن»، فصلنامه علمی- پژوهشی دریا فنون.
2. Bournival. G, Pugh. R.J, Ata. S; 2012; "Examination of NaCl and MIBC as bubble coalescence inhibitor in relation to froth flotation". Minerals Engineering, Volume 25, Issue 1, Pages 47-53.
3. Castro S, Rioseco P, Laskowski J.S; 2012; "Depression of molybdenite in sea water" In:

#### ۴- نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در شرایط عملیاتی مشابه، استفاده از آب دریا موجب کاهش بازیابی کانی‌های سولفیدی مس از ۸۹/۲ درصد به ۶۸/۸ درصد می‌شود. وجود یون‌های مزاحم مانند منیزیم و کلسیم در کاهش عیار و بازیابی نقش اساسی دارند. این یون‌ها علاوه بر اینکه باعث افزایش سختی و هدایت الکتریکی بالا می‌شوند، خود نیز به طور مستقیم می‌توانند عامل منفی در شناورسازی کانی‌های با ارزش باشند. این در حالی است که بازیابی فلوتاسیون در هنگام استفاده از آب شیرین شده دریا (۸۰/۸۹ درصد) نزدیک به بازیابی در هنگام استفاده از آب زیرزمینی (۸۹/۲۰ درصد) است. همچنین انتخابی عمل کردن مواد شیمیایی در هنگام استفاده از آب شیرین شده دریا نسبت به آب زیرزمینی بیشتر است، به طوری که در هنگام استفاده از آب زیرزمینی میزان بیشتری از باطله به همراه مولیبدن به کنسانتره راه می‌یابد.

استفاده از ماده شیمیایی SMBS (سدیم متابی سولفیت) که بازداشت‌کننده مناسبی برای کانی پیریت است، کمترین

14. Kitchener. J.A; 1984; “*The Froth Flotation Process: Past, Present and Future-In Brief. Principles of Mineral Flotation: The Wark Symposiu*”. The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Victoria, Australia, pp. 65–71.
15. Koh. P.T.L; 2009; “*The effect of particle shape and hydrophobicity in flotation. International Journal of Mineral Processing*” 93, 2, Pages 128-134.
16. Kristen. E, Bremmell; 2005; “*Pentlandite–lizardite interactions and implications for their separation by flotation*” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 252, 2–3, Pages 207-212.
17. Laskowski J.S, Castro S; 2012; “*Hydrolyzing ions in flotation circuits: sea water flotation*” In: Proc. 13th International Mineral Processing Symposium, IMPS 2012, Bodrum Turkey, Pages 219–227.
18. Li W, Li Y; 2019 “*Improved understanding of chalcopyrite flotation in seawater using sodium Hexametaphosphate*” *Minerals Engineering*, 134, Pages 269–274
19. Lucay F, Cisternas L.A, Gálvez E, López-Valdivieso A; 2015 “*Study of the natural floatability of molybdenite fines in saline solutions and effect of gypsum precipitation*” *Mineral, Metallurgical and Processing*, 32, Pages 203–208.
20. Mariana. A, dos Santos; 2010; “*Effect of ionic species on the performance of apatite flotation*” *Separation and Purification Technology*, 76, 1, Pages 15-20.
21. Mu Y, Peng Y; 2019 “*The effect of saline water on copper activation of pyrite in chalcopyrite Flotation*” *Minerals Engineering*, 131, Page 336–341.
22. Pugh. R.J, Weissenborn, P., Paulson, O; 1997; “*Flotation in inorganic electrolytes; the relationship between recover of hydrophobic particles, surface tension, bubble coalescence and gas solubility*” *International Journal of Mineral Processing*, 51, 1–4, Pages 125-138.
23. Raghavan. S; 1984; “*Factors affecting the flotation recovery of molybdenite from porphyry copper ores*” *International Journal of Mineral Processing*, 12, 1–3, Pages 145-162.
24. Ramos O, Castro S, Laskowski J.S; 2013; “*Copper–molybdenum ores flotation in sea* Proc. 26th Int. Mineral Processing Congress, IMPC-2012, New Delhi-India, Pages 737–752.
4. Castro S; 2018 “*Physico-chemical factors in flotation of Cu-Mo-Fe ores with seawater: a critical review*” *Physicochemical Problem of Mineral Processing*” 54, Pages 1223–1236.
5. Chandra. A.P; 2009; “*A review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective flotation of the sulfide minerals, sphalerite and pyrite*” *Advances in Colloid and Interface Science* Volume 145, Issues 1–230, Pages 97-110.
6. Chin I, Somasundaran P; 1991 “*Reversal of bubble charge in multivalent inorganic salts – effect of magnesium*” *Journal of Colloidal Interface Science*, 146, Pages 215–218.
7. Constanz C, Ramos J, Robles P, Leiva W, Jeldresa R, Cisternas L, 2020, “*Partial seawater desalination treatment for improving chalcopyrite floatability and tailing flocculation with clay content*” *Minerals Engineering*, 151 Pages 1-7.
8. Eigeles M.A, Volova M.L; 1968 “*Activation of air bubbles by the insoluble products of reactions in flotation*” In: Proc. 8th Int. Mineral Processing Congress, Leningrad, 2, Pages 353–364.
9. Fisher. W.W, Rudy. S; 1976; “*Utilization of municipal waste water for froth flotation of copper and molybdenum*” *The Arizona Bureau of Mines: Mineral, Technology Branch, Circular* 17.
10. Gde Pandhe, Wisnu Suyantaraa; 2018; “*floatability of molybdenite and chalcopyrite in artificial seawater*” *Minerals Engineering, Volume* 115, Pages 117-130.
11. Han M.Y, Ahn H.J, Shin M.S, Kim E.R; 2004 “*The effect of divalent metal ions on the zeta potential of bubbles*” *Water Science and Technology*” 50 (8), Pages 49–56.
12. Hoover. M.R; 1980; “*Water chemistry effects in the flotation of sulphide ores*” *Institution of Mining and Metallurgy, London*, Pages 100–112.
13. Jeldres R.I, Arancibia-Bravo M.P, Reyes A, Aguirre C.E, Cortes L, Cisternas L.A; 2017 “*The impact of seawater with calcium and magnesium removal for the flotation of copper-molybdenum sulphide ores*” *Minerals Engineering*, 109, Pages 10–13.

27. Wang B, Peng Y; 2014 “*The effect of saline water on mineral flotation – A critical review*” Minerals Engineering, 66, Pages 13–24.
28. Yepsen R., Gutierrez L., Laskowski J; 2019. “*Flotation behavior of enargite in the process of flotation using seawater*” Minerals Engineering, 142.
29. Yufan Mu, Yongjun Peng; 2019; “*The effect of saline water on copper activation of pyrite in chalcopyrite flotation*” Minerals Engineering, 131, Pages 336-341.
30. Yufan Mu, Yongjun Peng; 2019; “*The role of sodium metabisulphite in depressing pyrite in chalcopyrite flotation using saline water*” Minerals Engineering, 142
25. Smith L.K, Heyes G.W; 2012 “*The effect of water quality on the collectorless flotation of chalcopyrite and bornite*” In: Water in Mining. Presented at the 3rd International Congress on Water Management in the Mining Industry, 3rd International Congress on Water Management in the Mining Industry, Santiago, Chile.
26. Uribe L, Gutierrez L, Laskowski J.S, Castro S; 2017 “*Role of calcium and magnesium cations in the interactions between kaolinite and chalcopyrite in seawater*” Physicochemical Problems of Minerals Processing, 53, Pages 737–749.