



شناسایی مواد موجود در سد باطله کارخانه فلوتاسیون مس و پیشنهاد روش بازفرآوری. مطالعه موردی

فراز سلطانی^{۱*}، عبدالمطلب حاجتی^۲، پانیز مسعودیه^۳، محمد صالح احمدی^۴

^۱استادیار فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
Faraz.soltani@arakut.ac.ir

^۲استادیار فراوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
Hajati1@arakut.ac.ir

^۳فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
panizmasoodieh79@gmail.com

^۴فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی معدن، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
Saleh.ahmadi012@gmail.com

چکیده

باطله های ناشی از معدنکاری و فراوری مواد معدنی که در سدهای باطله ذخیره می شوند اثرات زیست محیطی خطرناکی را مطالعات شناسایی نمونه معرف سد باطله . و بازفرآوری این باطله ها به عنوان راه حل نو ظهور نام برده می شود در پی دارند کارخانه فلوتاسیون مس محمد آباد دلیجان (استان مرکزی، ایران) نشان داد که کانی های کانی های آهن، باسانیت، کلسیت، است. Fe_2O_3 اسپیکولاریت و کوارتز کانی های مهم موجود در سد باطله هستند و نمونه معرف سد باطله حاوی ۱۸.۹۵ درصد نمونه ها نیز d80 براساس بررسی های صورت گرفته در نقاط ورودی باطله به سد باطله تمرکز ذرات درشت بیشتر و طبیعتاً به نسبت بیشتر بوده است. و در محل های انتهایی از حجم مخزن SO_3 و Fe_2O_3 بزرگ تر است و در این محل ها درصد می باشند. SiO_2 و Na_2O ، Al_2O_3 کمتری هستند و این ذرات بیشتر دارای ترکیب های غیر آهنی مانند d80 ذرات دارای با توجه به مطالعات شناسایی انجام شده، ترکیب استفاده از دو روش مغناطیسی و فلوتاسیون برای پرعیارسازی کانی های آهن و حذف گوگرد موجود در کانی باسانیت می تواند چشم انداز جدیدی را در بازفرآوری سدهای باطله حاوی آهن ایجاد کند.

واژگان کلیدی: سد باطله، کارخانه مس، شناسایی، بازفرآوری



مقدمه

بیشتر عناصری که در حال حاضر در کاربردهای صنعتی، توسعه فناوری و تولید انرژی استفاده می‌شوند از طریق استخراج و فرآوری کانسنگ‌های معدنی تولید می‌شوند. از طرفی، منابع جهانی محدود هستند و استخراج و استفاده روز افزون از منابع طبیعی به دلیل رشد جمعیت، نیازهای منابع آینده را به شدت تهدید می‌کند (Luthra, Mangla et al. 2022). در نتیجه این افزایش بهره‌برداری، صنعت معدنکاری در حال تولید مقادیر زیادی باطله در حدود ۷ میلیارد تن در سال است. (Marín, Kraslawski et al. 2022) طبق آمار ۷۴۴ سد باطله در شیلی وجود دارد که از این تعداد ۶۶ سد دارای بیش از ۵ میلیون تن و ۲۸ سد دارای بیش از ۵۰ میلیون تن باطله هستند. (Duarte 2021) با توجه به اطلاعات ژئوشیمیایی در دسترس حداقل ۲۱ سد باطله پتانسیل اقتصادی برای فرآوری مجدد چندین فلز مانند مس، مولیبدن، نقره، آهن، کبالت، روی و سرب را دارند. (SERNAGEOMIN. (2020)

باطله‌های ناشی از معدنکاری و فرآوری مواد معدنی که در سدهای باطله ذخیره می‌شوند اثرات زیست محیطی خطرناکی را نیز در پی دارند. این باطله‌ها و دوغاب‌های ناشی از آنها می‌توانند سبب آلودگی آب و خاک تا محدوده گسترده‌ای در اطراف سدهای باطله شوند که منجر به پیامدهای جدی برای سلامت انسان و همچنین آسیب طولانی مدت به آبراهه‌ها و تنوع زیستی می‌شوند. (Hatje, Pedreira et al. 2017)

راندمان روش‌های فرآوری مواد معدنی در دهه‌های گذشته به طور قابل توجهی بهبود یافته به طوری که عیار باطله فعلی به طور قابل توجهی کمتر از قرن گذشته است (Gordon 2002, Falagán, Grail et al. 2017, Mackay, Mendez et al. 2018). امروزه امکان بهره‌برداری از فلزاتی فراهم شده است که در گذشته به دلیل فرایندهای ناکارآمد استخراج فلزات، همراه باطله‌ها دفع می‌شد. به همین منظور، باطله‌های سال‌های گذشته ممکن است محتوای بالاتری نسبت به ذخایر فعلی داشته باشند. همچنین افزایش قیمت فلزات در سال‌های اخیر یکی دیگر از عواملی است که به اهمیت بازفرآوری مواد موجود در سدهای باطله افزوده است (Figueiredo, Vila et al. 2018, Mackay, Mendez et al. 2018, Drobe, Haubrich et al. 2021). آهن وجود دارد که عبارتند از: بازیابی فلزات مفید مانند آهن، کبالت، نیکل و مس (Sirkeci, Gül et al. 2006)، تولید مستقیم مصالح ساختمانی (از جمله سیمان کلینکر و مواد افزودنی، شیشه سرامیک و مصالح دیوار و غیره)؛ پر کردن فضای تخریب شده و استفاده به عنوان اصلاح کننده خاک و کود مغناطیسی که جهت تولید این محصولات، بازیابی آهن اولین گام است. (Das, Kumar et al. 2000, Zhang, Xue et al. 2006)

در محدوده معدن مس محمدآباد دلیجان (واقع در استان مرکزی - ایران)، چهار سد باطله برای ذخیره‌سازی باطله‌های کارخانه فلوتاسیون آن ایجاد شده است که در حال حاضر سدهای باطله ۱ و ۲ پر شده‌اند و انتقال باطله به درون سد شماره ۳ انجام می‌شود. در این تحقیق، آزمایش‌هایی روی سد باطله کارخانه فلوتاسیون مس محمدآباد دلیجان جهت شناسایی مواد موجود در سد باطله و تحلیل امکان بازیابی کانی‌های محتوی آهن به منظور تولید



کنسانتره قابل فروش انجام شده است. شناسایی وضعیت توزیع مواد معدنی در سد باطله از نوآوری های این تحقیق است.

مواد و روش ها

تهیه و آماده سازی نمونه

۹ نمونه از سد باطله ۱ و ۱۰ نمونه از سد باطله ۲ و مجموعاً ۱۹ نمونه به وزن تقریبی ۵۱۵ کیلوگرم با استفاده از روش های استاندارد نمونه برداری تهیه شد. کل نمونه ها ابتدا توسط اون آزمایشگاهی در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد و به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس توزین شد. در مرحله بعد، هر نمونه به چهار بخش تقسیم شد و یک چهارم هر نمونه به منظور تهیه نمونه معرف کلی (نمونه همگن) مخلوط شدند.

آنالیز سرنندی نمونه ها

آنالیز سرنندی کل نمونه ها توسط سرندهای ۳۸، ۷۵، ۱۲۵ میکرون و به صورت تر انجام شد. بر اساس آنالیز سرنندی d80 نمونه های سدهای باطله ۱ و ۲ حدود ۲۵ تا ۱۷۵ میکرون می باشند که درشت ترین ذرات موجود در سد باطله حدود ۲۵۰ میکرون برآورد شده است d80. نمونه معرف کلی ۱۰۴ میکرون بود. لازم به ذکر است در نقاطی که نزدیک به لوله های انتقال باطله از کارخانه (نقاط ورودی باطله به سد باطله) است، تمرکز ذرات درشت بیشتر و طبیعتاً d80 نمونه ها نیز بزرگ تر است. به عبارت دیگر، جریان باطله توانسته است ذرات ریزتر را به محل های انتهایی از حجم مخزن سد حمل کند .

مطالعات شناسایی نمونه

به منظور شناسایی نمونه های موجود در سدهای باطله، مطالعات شناسایی شامل شناسایی اکسیدهای اصلی موجود در تمامی نمونه ها با استفاده از روش ذوب قلیایی، شناسایی نمونه معرف کلی شامل شناسایی اکسیدهای اصلی در کل نمونه و در نمونه های طبقات سرنندی، شناسایی عناصر فرعی و کمیاب با استفاده از روش ICP-MS، شناسایی فازهای موجود در نمونه معرف با آنالیز XRD، مطالعات میکروسکوپی نوری (عبوری و انعکاسی) با هدف تعیین ارتباط بین فازهای مختلف موجود در نمونه و همچنین مطالعه درجه آزادی کانی با ارزش انجام شد.

نتایج و بحث

ترکیب شیمیایی نمونه ها

در جدول ۱، آنالیز عناصر اصلی موجود در کل نمونه های اخذشده از سدهای باطله ۱ و ۲ و در جدول ۲ و ۳ آنالیز اکسیدهای اصلی و همچنین آنالیز ICP-MS نمونه معرف سدهای باطله ۱ و ۲ ارائه شده است.



جدول ۱: محدوده غلظت عناصر اصلی موجود در نمونه های سد باطله ۱ و ۲

Component	TD1	TD2	Component	TD1	TD2
CaO	21.9-26.4	20.1-24.3	MgO	0.20-0.51	0.45-0.68
Fe ₂ O ₃	17.39-28.2	12.55-17.30	BaO	0.05-0.13	0-0.17
SiO ₂	15.83-23.15	22.57-27.96	TiO ₂	0.15-0.24	0.23-0.39
SO ₃	13.8-20.8	12.5-18.80	MnO	0-0.05	0.05-0.08
Al ₂ O ₃	3.5-5.96	5.62-8.38	Cu	0.11-0.22	0-0.25
K ₂ O	0.34-1.55	0.95-1.47	LOI	7.53-15.1	10.5-14.20
Na ₂ O	0.75-1.08	0.56-1.02			

پس از بررسی نتایج آنالیز سرنندی و آنالیز عناصر اصلی موجود در کل نمونه های جمع آوری شده این موضوع مشخص شد که در محل هایی با d80 بیشتر، درصد Fe₂O₃ و SO₃ به نسبت بیشتر بوده است. به عبارت دیگر، کانی های غیرآهنی مشتمل بر Al₂O₃، Na₂O و SiO₂ توانایی بیشتری برای حمل توسط گرادیان جریان باطله داشته اند و در انتهای جریان مسیر سد باطله انباشته شده اند. به عبارتی ابعاد ذرات، شکل ذرات، نوع کانی های تشکیل دهنده باطله و علی الخصوص چگالی کانی ها بر شیوه ته نشینی و توزیع ذرات تاثیر معنی داری داشته است. علاوه بر این، نمونه های سد باطله ۲ نسبت به سد باطله ۱ حاوی درصد آهن بیشتری هستند.

جدول ۲: عیار اکسیدهای اصلی نمونه معرف سد باطله ۱ و ۲ و توزیع وزنی ترکیبات معدنی در محدوده های ابعادی مختلف

Component	Head	MDRS4	MDRS3	MDRS2	MDRS1
		-38 μ m	-75 +38 μ m	-125 + 75 μ m	+125 μ m
		58.14%	12.67%	12.94%	16.25%
SiO ₂	28.43	25.58	25.03	24.50	29.01
Al ₂ O ₃	6.10	6.99	4.87	-5.01	6.69
BaO	0.03	0.08	0.10	0.08	0.06
CaO	28.66	20.36	21.49	24.88	24.81
Fe ₂ O ₃	19.84	17.81	26.35	18.50	12.07
K ₂ O	1.11	1.44	0.77	0.78	1.04
MgO	0.48	0.53	0.39	0.42	0.56
MnO	0.05	0.05	0.08	0.08	0.09
Na ₂ O	0.85	0.86	0.91	0.92	1.19
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.06	0.06	0.09
SO ₃	16.83	15.47	7.99	11.28	7.55
TiO ₂	0.29	0.32	0.30	0.27	0.36
LOI	-	10.35	11.45	12.99	16.23



Cu	0.13	0.09	0.16	0.23	0.26
----	------	------	------	------	------

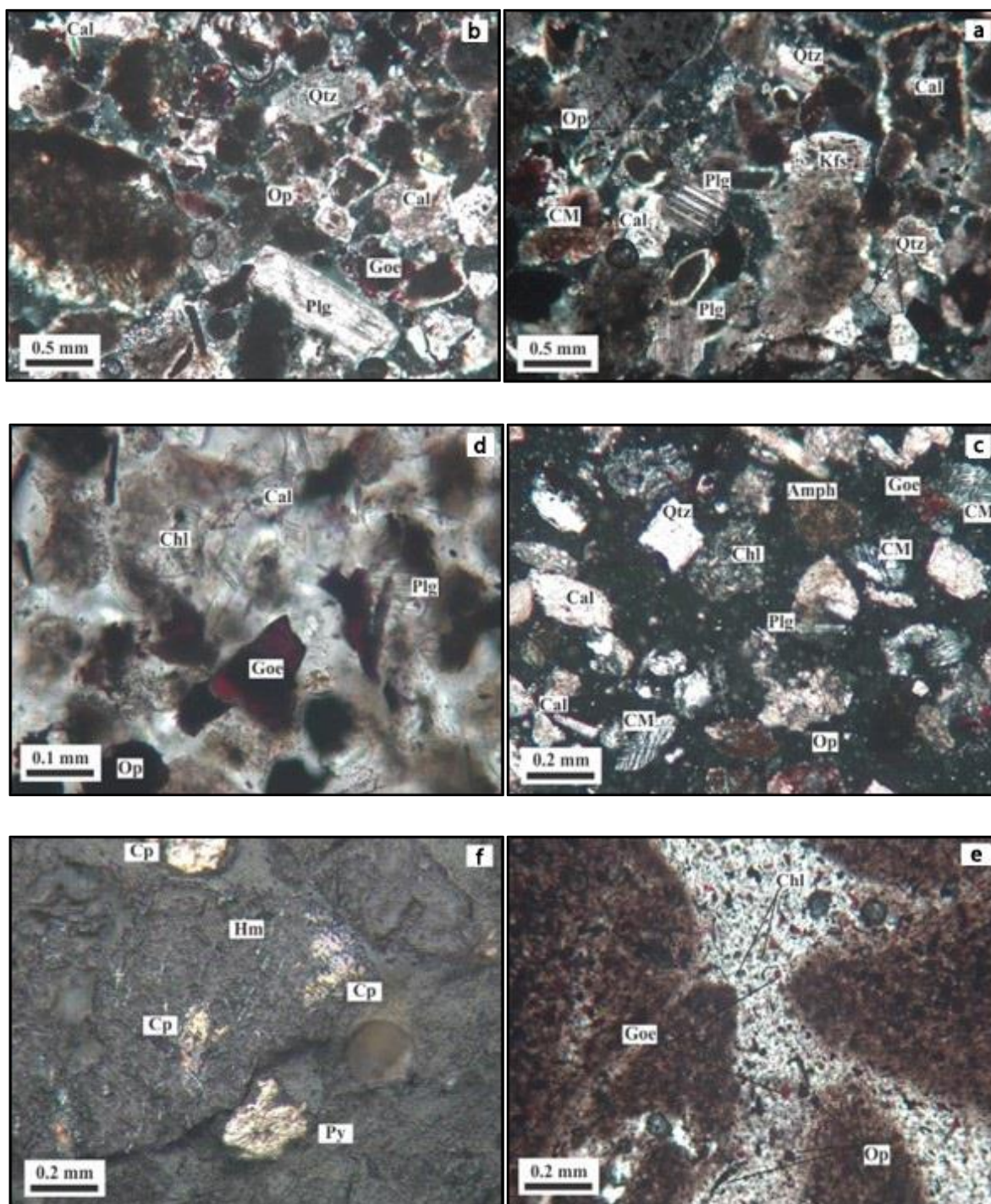
جدول ۳: عناصر موجود در نمونه معرف سد باطله ۱ و ۲

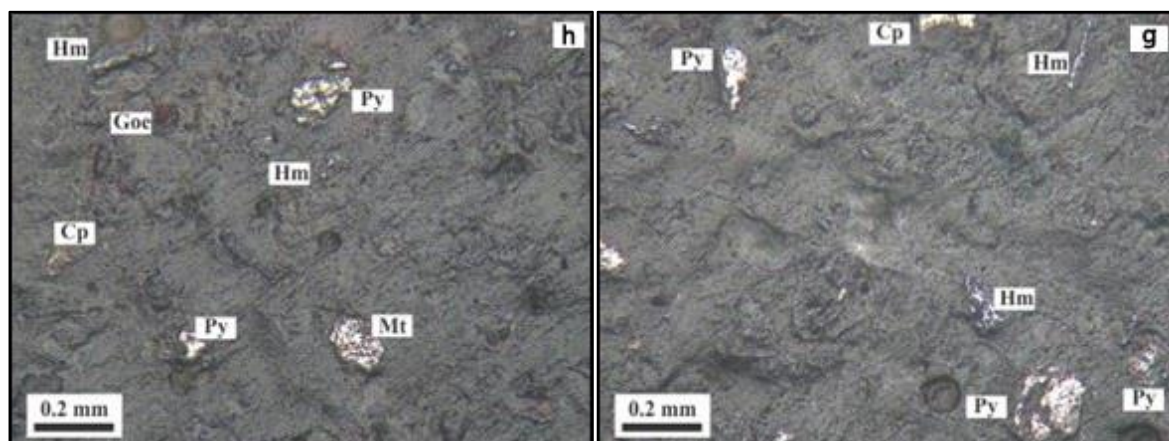
Element	Concentration (ppm)	Element	Concentration (ppm)	Element	Concentration (ppm)	Element	Concentration (ppm)
Ag	0.8	Eu	0.65	Sb	5.20	U	3.3
As	11.8	Gd	1.96	Sc	6.70	V	72
Ba	235	Hf	0.52	Se	0.97	W	45.9
Be	0.7	La	8	Sm	2.28	Y	14.7
Bi	0.7	Li	31	Sn	13.80	Yb	2.1
Cd	0.2	Lu	0.18	Sr	405	Zn	54
Ce	16	Mo	34	Ta	0.49	Zr	37
Co	190	Nb	2.3	Tb	0.35		
Cr	31	Nd	7.2	Te	0.57		
Cs	3.5	Ni	13	Th	2.43		
Dy	2.54	Pr	1.32	Tl	0.30		
Er	1.35	Rb	22	Tm	0.16		

مطالعات کانی شناسی نمونه معرف

مطالعات میکروسکوپی

یک نمونه معرف برای انجام مطالعات دقیق کانی شناسی در نظر گرفته شد و تعدادی مقاطع نازک و صیقلی تهیه و توسط میکروسکوپ پلاریزان در چهار محدوده ابعادی $125 \pm$ میکرون، 75 ± 125 - میکرون، 38 ± 75 - میکرون و 38 - میکرون به طور کامل مورد مطالعه قرار گرفت. در مطالعات میکروسکوپی نور عبوری مشخص شد نمونه مورد مطالعه از قطعات بلوری کانی های اپک، کوارتز، کلسیت، گوتیت، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، آمفیبول، کلریت و کانی های رسی تشکیل شده است و همچنین در مطالعات میکروسکوپی نور انعکاسی کانه های اسپیکولاریت، گوتیت، هماتیت، مگنتیت، کالکوپیریت، کولیت و بورنیت تشخیص داده شدند که می توان آنها را در شکل ۱ دید.





شکل ۱: نمایی از مقاطع تهیه شده در زیر میکروسکوپ

همانطور که در اشکال قابل مشاهده است در محدوده های ابعادی 125 ± 75 ، 38 ± 75 و 38 - میکرون، به ترتیب کوارتز (۱- A)، کلسیت به همراه کوارتز (شکل ۱- C)، کلسیت (شکل ۱- F) و کوارتز، بیشترین حجم از کانی های شفاف را تشکیل داده اند و آمفیبول به رنگ قهوه ای تا تیره دیده می شود که به نظر میرسد در حال دگرسانی به کانی های پایدارتر می باشد و کلریت با رنگی سبز در نور معمولی قابل مشاهده است. همچنین پلاژیوکلاز به صورت بلورهای کشیده تا مربعی شکل دیده می شود (شکل ۱- B) و کلسیت به همراه قطعات خرده سنگی که دارای کانی های رسی می باشند دارای آغشتگی شدید به اکسید آهن می باشند (شکل ۱- F) و همچنین در مقطع 38 - میکرون مشاهده می شود که آلکالی فلدسپار اغلب دارای دگرسانی به سرسیت می باشد و دارای قطعات بسیار ریزی از کانی های اپک می باشد که در کل نمونه پراکنده شده اند.

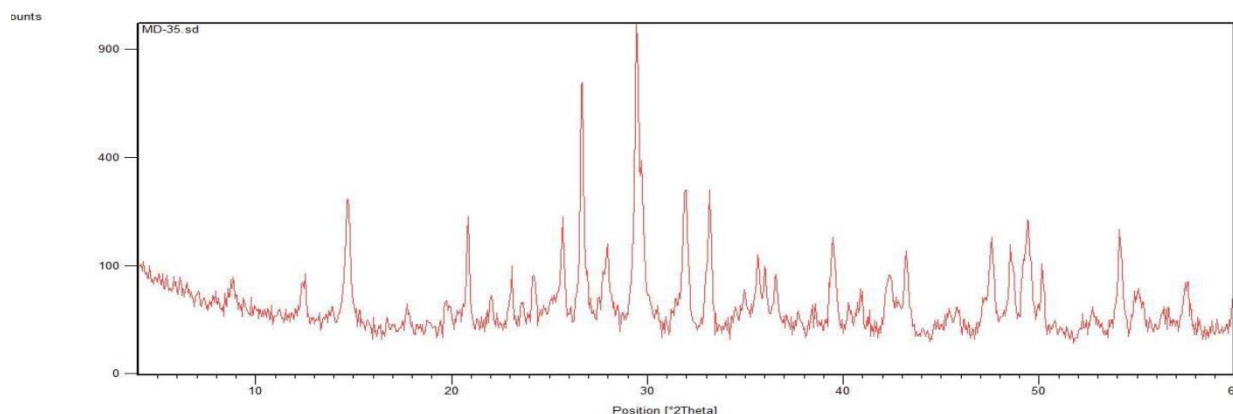
همانطور که در شکل ۱ (E, G, H) قابل مشاهده است گوتیت حجم بیشتری نسبت به سایر کانی ها داشته و در بخش اعظم نمونه پراکنده شده است. تنها آثار کمی از هماتیت به جا مانده است و اغلب در حال دگرسان شدن به گوتیت می باشد. در بخش هایی از نمونه مگنتیت یا در حال تبدیل شدن به هماتیت می باشد که بافت مارتیتی در برخی از آنها مشاهده شده است و یا در حال دگرسانی به کانی های ثانویه از جمله گوتیت می باشد. در برخی نقاط سوزن ها و ورقه های اسپیکولاریت نیز مشاهده شده است. کالکوپیریت به میزان کمتری از پیریت در نمونه مورد مطالعه حضور داشته و در اغلب موارد در حال دگرسانی به کولیت و بورنیت است. کولیت به صورت رگه های مایل به آبی در کالکوپیریت قابل مشاهده است و بورنیت به صورت صفحه های قهوه ای مایل به قرمز در حاشیه و یا درون کالکوپیریت تشکیل شده است.

پراش اشعه ایکس (XRD)

روش پراش اشعه ایکس (XRD) برای شناسایی فازهای معدنی مختلف و ارزیابی فراوانی هر فاز در نمونه تحت آنالیز مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مطالعه XRD که در شکل ۲ ارائه شده است نشان داد که کانی های



موجود در نمونه معرف به ترتیب فراوانی عبارتند از باسانیت، کلسیت، اسپیکولاریت، کوارتز، موسکویت-ایلیت، آلبیت، ارتوکلاز، کلریت و کائولینیت.



Ka - Cu Fil - Ni

Sample:	Phase(s)	Phase(s)	Phase(s)
MD	Quartz (33-1161) = 14%	Albite (09-0466) = 7%	Orthoclase (31-0966) = 4%
LAB: MD-35	SiO ₂	NaAlSi ₃ O ₈	KAlSi ₃ O ₈
Date : 15.8.2020	Chlorite (29-0701) = 3%	Bassanite (41-0224) = 27%	
	(Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	CaSO ₄ · 0.5H ₂ O	
kV = 40	Muscovite - illite (26-0911) = 8%	Hematite (33-0664) = 15%	
mA = 30	KAl ₂ Si ₃ AlO ₁₀ (OH) ₂	Fe ₂ O ₃	
Ka = Cu	Calcite (05-0586) = 17%	Kaolinite (29-1488) = 3%	
Fil = Ni	CaCO ₃	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	

شکل ۲: نتیجه آنالیز XRD نمونه معرف سد باطله

تحلیل امکان بازفرآوری بر اساس مطالعات شناسایی

با توجه به اینکه کانی با ارزش مهم موجود در نمونه کانی اسپیکولاریت با وزن مخصوص ۵.۲۶ گرم بر سانتی مترمکعب و کانی های گانگ دارای وزن مخصوص ۲.۵۵ تا ۳.۳ گرم بر سانتی مترمکعب هستند (بر اساس مطالعات XRD)، پریعیارسازی ثقیلی با استفاده از جداکننده اسپیرال یا میز لرزان می بایست مورد بررسی قرار گیرد . علاوه بر این، با توجه به نتایج آنالیز XRD نیمه کمی و همچنین نتایج مطالعات میکروسکوپی (شکل ۱)، کانی های آهن دار موجود در نمونه معرف سد باطله عمدتاً به صورت کانی اسپیکولاریت بوده و مقادیر بسیار کمی گوتیت، پیریت و کالکوپیریت نیز در نمونه وجود دارد. کانی اسپیکولاریت دارای مغناطیس پذیری ۳.۷ تا ۱۰-۶ m³/kg که نسبت به هماتیت (۲.۱۶-۰.۶ ۱۰-۶ m³/kg) دارای خواص مغناطیس پذیری بهتر و نسبت به مگنتیت (۱۰-۶ ۱۱۵۶-۶۲۵ m³/kg) بسیار ضعیف تر است (Xiong, Lu et al. 2015). به همین دلیل برای آزمایش امکانسنجی پریعیارسازی مغناطیسی بهتر است از شدت میدان مغناطیسی بالا (بیشتر از ۶۰۰۰ گوس) استفاده شود .

نتایج شناسایی ترکیبات موجود در سد باطله حاوی مقادیر قابل توجهی گوگرد و کلسیم است که هر دوی این عناصر در استانداردهای مربوط به تولید مصالح ساختمانی محدودیت هایی دارند. با توجه به حضور عنصر کلسیم در کانی های حاوی کلسیم و گوگرد (یعنی کلسیت (CaCO₃) و ژپس ((CaSO₄·2H₂O) می توان طبق رابطه از کلکتورها



آنیونی اسید چرب در فلوتاسیون این کانی ها استفاده کرد. در این شرایط نمک آنیون-فلز روی سطح کانی های حاوی کلسیم به صورت $(RCOO)_2Ca$ است.

در تحقیقی مشابه، چائولی و همکاران نیز بر روی نمونه ای با ترکیب کانی شناسی کوارتز (۴۷/۳۹ درصد)، هماتیت (۲۴/۸۲ درصد)، اکسید کلسیم (۸/۸۵ درصد)، اکسید آلومینیوم (۷/۴۲ درصد) اکسید منیزیم (۰/۸۵ درصد)، اکسید سدیم (۰/۳۲ درصد) و اکسید پتاسیم (۰/۷ درصد) با هدف بازیابی آهن از آن و استفاده از باطله بازفرآوری آهن کار کردند که در پروژه آنها عیار کنسانتره مغناطیسی به ۶۱.۳ درصد رسید و نرخ بازیابی ۸۸.۲ درصد حاصل شد. و در انتها باطله بازفرآوری به عنوان ماده خام (۳۰ درصد از ترکیب سیمان) در تهیه سیمان پرتلند معمولی به کار برده شد (Li, Sun et al. 2010).

نتیجه گیری

بررسی توزیع نمونه های در سدهای باطله شماره ۱ و ۲ کارخانه فلوتاسیون محمدآباد دلیجان نشان داد که محل برداشت نمونه ها و سایز ذرات تاثیر مستقیم بر ترکیب شیمیایی آنها دارد. براساس بررسی های صورت گرفته در نقاط ورودی باطله به سد باطله تمرکز ذرات درشت بیشتر و طبیعتاً d_{80} نمونه ها نیز بزرگ تر است و در این محل ها درصد Fe_2O_3 و SO_3 به نسبت بیشتر بوده است. و در محل های انتهایی از حجم مخزن ذرات دارای d_{80} کمتری هستند و این ذرات بیشتر دارای ترکیب های غیر آهنی مانند Al_2O_3 ، Na_2O و SiO_2 می باشند. به منظور بازفرآوری ترکیبات موجود در سد باطله پیشنهاد می شود آزمایش پرعیارسازی ثقی و پرعیارسازی مغناطیسی انجام و پارامترهای موثر این روش ها بهینه سازی شود. به کارگیری آزمایش فلوتاسیون معکوس روی باطله پرعیارسازی مغناطیسی می تواند سبب کاهش عیار کلسیم و گوگرد در نمونه باطله شده و ترکیب باطله بازفرآوری آهن با شرایط استاندارد مواد در جهت ساخت مصالح ساختمانی مقایسه شود.

مراجع

- Das, S. K., S. Kumar and P. Ramachandrarao (2000). "Exploitation of iron ore tailing for the development of ceramic tiles." *Waste Management* 20(8): 725-729.
- Drobe, M., F. Haubrich, M. Gajardo and H. Marbler (2021). "Processing tests, adjusted cost models and the economies of reprocessing copper mine tailings in Chile." *Metals* 11(1): 103.
- Duarte, E. E. Y. (2021). "Mapa Estratégico para la Diversificación de la Minería Chilena Polimetálica y sus Encadenamientos Productivos."
- Falagán, C., B. M. Grail and D. B. Johnson (2017). "New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings." *Minerals Engineering* 106: 71-78.
- Figueiredo, J., M. C. Vila, K. Matos, D. Martins, A. Futuro, M. de Lurdes Dinis, J. Góis, A. Leite and A. Fiúza (2018). "Tailings reprocessing from Cabeço do Pião dam in Central Portugal: A kinetic approach of experimental data." *Journal of Sustainable Mining* 17(3): 139-144.
- Gordon, R. B. (2002). "Production residues in copper technological cycles." *Resources, Conservation and Recycling* 36(2): 87-106.
- Hatje, V., R. M. Pedreira, C. E. de Rezende, C. A. F. Schettini, G. C. de Souza, D. C. Marin and P. C. Hackspacher (2017). "The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide." *Scientific reports* 7(1): 10706.



- Li, C., H. Sun, J. Bai and L. Li (2010). "Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings: Part 1. The recovery of iron from iron ore tailings using magnetic separation after magnetizing roasting." *Journal of Hazardous Materials* 174(1-3): 71-77.
- Luthra, S., S. K. Mangla, J. Sarkis and M.-L. Tseng (2022). "Resources melioration and the circular economy: Sustainability potentials for mineral, mining and extraction sector in emerging economies." *Resources Policy* 77: 102652.
- Mackay, I., E. Mendez, I. Molina, A. Videla, J. Cilliers and P. Brito-Parada (2018). "Dynamic froth stability of copper flotation tailings." *Minerals Engineering* 124: 103-107.
- Marín, O. A., A. Kraslawski and L. A. Cisternas (2022). "Estimating processing cost for the recovery of valuable elements from mine tailings using dimensional analysis." *Minerals Engineering* 184: 107629.
- SERNAGEOMIN. (2020, J. D. P. D. d. R. R. A., 2020, from <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>.
- Sirkeci, A., A. Gül, G. Bulut, F. Arslan, G. Onal and A. Yuce (2006). "Recovery of Co, Ni, and Cu from the tailings of divrigi iron ore concentrator." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 27(2): 131-141.
- Xiong, D., L. Lu and R. Holmes (2015). *Developments in the physical separation of iron ore: magnetic separation*. Iron ore, Elsevier: 283-307.
- Zhang, S.-h., X. Xue, X. Liu, P. Duan, H. Yang, T. Jiang, D. Wang and R. Liu (2006). "Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources." *Journal of mining Science* 42: 403-408.