



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بررسی امکان پیش تغلیظ مغناطیسی کانسنگ آهن دار حاوی اورانیوم با استفاده از تشویه

محمد رضا رضوانیان زاده^۱، مهدی ترکش اصفهانی^۱، افشین نیلی^۱، جلال جنت رضوانی^۱، احسان احمدی^۱،
ولی اله قوهستانی^۱، کامران ملک خسروی^۱

۱- شرکت اسکام

۱- چکیده:

با توجه به خواص مغناطیسی قوی مگنتیت، تبدیلی سایر ترکیبات آهن به مگنتیت به خصوص در مواردی که کانی با ارزش در زمینه ای از اکسیدهای آهن پراکنده باشد روشی مناسب جهت پیش فرآوری کانی های با ارزش همراه است. مطالعات اولیه کانی شناسی سنگ مورد مطالعه نشان داد که کانی های هماتیت، گوتیت و جاروسیت کانی های میزبان اورانیوم می باشند. در مرحله پیش فرآوری ۲۰۰ گرم نمونه معرف با دانه بندی کوچکتر از ۶۰۰ میکرون با ۱۵ درصد وزنی زغال مخلوط شد و در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۱ ساعت تشویه شد. سپس بر روی نمونه تشویه شده آزمایش مغناطیسی در شدت میدان ۴۰۰۰ گوس انجام شد، مقدار اورانیوم در خوراک برابر $10.4/4 \text{ ppm}$ بود که در نهایت عیار اورانیوم در کنسانتره مغناطیسی به 276 ppm رسید و بازیابی اورانیوم ۷۱ درصد بدست آمد.

واژه های کلیدی: فرآوری، اورانیوم، اکسید آهن، تشویه، جدایش مغناطیسی

۲- مقدمه:

یکی از مهم ترین و اساسی ترین خواص مغناطیسی کانی ها که در پرعیارسازی به روش مغناطیسی نیز مورد استفاده قرار می گیرد، تاثیر پذیری مغناطیسی است. از لحاظ تاثیر پذیری مغناطیسی کانی ها را به سه دسته دیامنیستیت، پارامنیستیت و فرومنیستیت دسته بندی می کنند. از آنجا که در مواد شدیداً مغناطیسی، تاثیر پذیری مغناطیسی وابسته به عملیات حرارتی و مکانیکی انجام شده بر روی مواد است، لذا می تواند خواص مغناطیسی مواد را به میزان قابل توجهی تغییر دهد. تغییر در ترکیب شیمیایی کانیها نیز از دیگر پارامترهای پیچیده ای است که باید بدان توجه



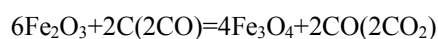
بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

داشت. [۱] تعداد زیادی از کانی‌های پارامنیته را می‌توان به روش مغناطیسی پرعیار کرد و یا ممکن است آهن‌زدایی بعضی از مواد معدنی نیز با همین روش صورت گیرد. این دسته از کانی‌ها علاوه بر خاصیت پارامنیته ممکن است جزو کانیهای آنتی فرومنیتیت و فرومنیتیت نیز قرار گیرند. [۲] تاثیرپذیری مغناطیسی تعداد محدودی از کانیها از جمله منیتیت به قدری زیاد است که می‌توان آنها را از مواد دیگر توسط جداکننده‌های با شدت پایین جداسازی و پرعیار کرد. کانی منیتیت از جمله بنیادی‌ترین و مهمترین اکسیدهای مغناطیسی آهن است. کانی‌های هماتیت و گوتیت ماهیتی آنتی فرومنیتیتی دارند و خاصیت مغناطیس شوندگی آن‌ها ضعیف است. پارامترهای متعددی از جمله: شدت میدان، ابعاد ذرات، ماهیت اولیه نمونه و آماده سازی آن در امر پیش بینی دقیق جدایش موثراند. [۳]

فرآوری سنگ معدنی اورانیوم به منظور پرعیارسازی کانسنگ استخراج شده از معدن صورت می‌پذیرد. بدین منظور مواد باطله از کانسنگ اورانیوم‌دار جدا شده تا عیار آن به حد قابل قبول برسد. اکثر کانی‌های اورانیوم (به دلیل خاصیت مغناطیسی ضعیفشان) برای جداسازی مؤثر با روش‌های مغناطیسی مناسب نیستند. در هر صورت توسط این روش‌ها می‌توان کانی‌های همراه با خواص مغناطیسی مناسب را جدا نمود. [۴]

پرعیار کردن سنگ آهن با تبدیل اکسیدهای آهن به مگنتیت (Upgrading Iron Ore by Conversion of Iron Oxides to Magnetite) از دیدگاه اقتصادی حائز اهمیت است. به علت خاصیت مغناطیسی بسیار بالای مگنتیت این کانی به آسانی و با مصرف انرژی کمتر نسبت به سایر روش‌های پرعیار کردن و به خصوص با سرمایه گذاری نسبتاً پایین قابلیت پرعیار شدن و حذف ناخالصی‌ها را توسط کاربرد جدا کننده مغناطیسی با شدت میدان پایبندارد، لذا تبدیل سایر اکسیدهای آهن به مگنتیتی می‌تواند در پرعیار کردن سایر اکسیدها مؤثر باشد. در کلیه روش‌های تبدیل کانی‌های اکسید آهن به مگنتیت، سنگ معدن خرد شده و بیشتر در یک کوره دوار مورد عمل قرار می‌گیرد. مقدار مصرف انرژی نسبتاً بالا بوده و اغلب قیمت انرژی و مقدار مصرف آن عامل اصلی در اقتصادی بودن روش می‌باشد. تبدیل هماتیت به مگنتیت یک عمل احیا است. واکنش اصلی در این روش عبارت است از:





بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۱۷ و ۱۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\Delta H^{\circ}=122.3 \text{ (کیلوکالری به ازای کیلوگرم مگنتیت)}$$

عمل احیا می‌تواند توسط کربن، گاز اکسید کربن و یا هر گاز احیا کننده دیگر انجام شود. [۵]

۳- روش کار

۳-۱- آماده‌سازی، آنالیز و تهیه نمونه معرف

نمونه مورد استفاده در تحقیق حاضر، معرف یکی از آنومالی‌های اورانیوم ایران مرکزی می‌باشد. ابتدا پس از انتخاب و انتقال نمونه به آزمایشگاه، مراحل خردایش و مطالعات کانی شناسی آغاز گردید. ابتدا نمونه تا ابعاد زیر ۱ اینچ خردایش شد و سه نمونه متفاوت برای مطالعات مقاطع نازک-صیقل همچنین مطالعات XPMa تهیه و ارسال شد (۴۱۰ گرم). (جدول ۱). سپس نمونه معرف مورد نظر به منظور انجام آنالیز XRD مطالعات (Perkin Elmer), XRF (Philips), ICP MS (Agilent HP4500) به آزمایشگاه ذیصلاح ارسال گردید. به منظور انجام آزمایشات جدایش مغناطیسی، از نمونه دستگاه ساخت داخل کشور استفاده گردید.

۳-۲- آنالیز سرنبدی و عیار اورانیم در فراکسیون‌های مختلف

به منظور تعیین توزیع دانه بندی و عیار اورانیم در فراکسیون‌های مختلف ابعادی، مقدار (۸۸۰ گرم) نمونه تا ابعاد کوچک‌تر از ۶۰۰ میکرون خردایش شد و در فراکسیون‌های ۵۰۰، ۳۰۰-۵۰۰، ۱۵۰-۳۰۰، ۷۵-۱۵۰، ۴۵-۷۵ و ۴۵- میکرون دانه‌بندی شد.

۳-۳- آزمایش احیاء مستقیم نمونه و جدایش مغناطیسی

۳-۳-۱- احیاء مستقیم نمونه

به منظور احیاء مستقیم، ۲۰۰ گرم نمونه با $d_{80}=322\mu$ تهیه شد. نمونه با ۱۵ درصد وزنی زغال مخلوط شد و در ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت جهت احیاء مستقیم در کوره‌آزمایشگاهی قرار گرفت. زغال مورد



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

استفاده در رده زغالسنگ آنتراسیت انتخاب شده است.

۳-۲-۳- آزمایش جداسازی به روش مغناطیسی

پس از انجام مراحل تشویه و خارج ساختن نمونه از کوره، نمونه تشویه شده به وزن ۱۸۷/۵ گرم جهت انجام آزمایش جداسازی مغناطیسی آماده‌سازی شد. آزمایش جدایش مغناطیسی با استفاده از دستگاه جداکننده مغناطیسی با شدت میدان ۴۰۰۰ گوس انجام شد.

۳- بحث و نتایج

همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود کانی‌های آهن دار در کلیه مقاطع نازک-صیقل مورد مطالعه به عنوان کانی‌های فلزی اصلی مقطع دیده شده اند. این کانی‌ها شامل هماتیت، مگنتیت، گوتیت می‌باشند. کانی‌های مهم غیرفلزی که در مقاطع مشاهده گردید عبارتند از: کوارتز، مسکویت، آلونیت، فلدسپار و جاروسیت.

جدول ۱: مطالعات مقاطع نازک-صیقل نمونه

مقطع	کانی‌های فلزی	کانی‌های غیرفلزی	شرح مقطع
Rock 1	مگنتیت، هماتیت، گوتیت	کوارتز، مسکویت، آلونیت، جاروسیت	اجزای اصلی سنگ کانی کوارتز، مسکویت، آلونیت و جاروسیت می‌باشند.
Rock 2	هماتیت، گوتیت	کوارتز، مسکویت، فلدسپار، جاروسیت	اجزای اصلی سازنده سنگ را کانی‌های کوارتز، فلدسپار، مسکویت و جاروسیت تشکیل می‌دهند.
Rock 3	هماتیت، گوتیت	کوارتز، مسکویت، جاروسیت، آلونیت	اجزای اصلی سازنده سنگ را کانی‌های کوارتز، فلدسپار، مسکویت و جاروسیت تشکیل می‌دهند

با توجه به عدم تشخیص کانی‌های حاوی اورانیوم به دلیل عیار پایین اورانیوم در نمونه‌های مورد استفاده از آنالیزگر XPMA استفاده گردید. نتایج مطالعات XPMA نشان می‌دهند که کانی‌های حاوی اورانیوم با کانی‌های آهن دار درگیر می‌باشند.

همچنین نتایج آنالیز XRF نشان می‌دهد که کانی اصلی تشکیل دهنده نمونه کوارتز بوده که تقریباً ۷۰ درصد وزنی نمونه را تشکیل می‌دهد (جدول ۲). همانطور که مشاهده می‌شود، کمتر از ۵٪ وزن نمونه را آهن تشکیل



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

داده است.

جدول ۲: آنالیز XRF نمونه

LOI	SO3	P2O5	Na2O	MnO	MgO	K2O	Fet	CaO	BaO	Al2O3	SiO2	Element (%)
10.76	2.64	0.17	0.58	0.09	1.52	0.8	3.19	6.92	0.06	4.94	68.73	ES-3-(REP)

نتایج آنالیز ICP-MS و XRD نشان می‌دهد که بخش اعظم کانی تشکیل دهنده نمونه کوارتز است و کانی‌های آهن دار تقریباً ۱۶ درصد وزنی نمونه را تشکیل می‌دهند. مقدار آهن در نمونه مورد استفاده ۲۷۴۱۷ppm و اورانیوم ۱۰۴/۴ppm می‌باشد. نتایج در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳: آنالیز XRD نمونه

Albite	Hematite	Goethite	Jarosite	Alunite	Calcite	Muscovite-illite	Quartz	کانی
۲	۲	۸	۶	۵	۶	۸	۶۱	درصد

جدول ۴: آنالیز ICP-MS نمونه

Na	Mo	V	U	Tm	Fe	Mn	Be	Ba	As	Al	Ag	Element
2712	119.4	3933	104.4	0.84	27417	615	1	389	140.6	27659	3.1	مقدار(ppm)

همانطور که در جدول ۵ دیده می‌شود، با استفاده از اطلاعات موجود در جدول ۵ منحنی دانه بندی نمونه در شکل ۱ ترسیم گردید و d_{80} نمونه مطابق شکل ۳۲۲ میکرون بدست آمد. در ادامه مقدار اورانیوم موجود در هر یک از بخش‌های ابعادی در جدول ۶ ارائه شده است، مشاهده می‌شود که با کاهش ابعاد نمونه کانسنگ عیار آهن و اورانیوم افزایش یافته است.

جدول ۵: آنالیز دانه‌بندی نمونه

درصد		وزن		سایز دانه بندی (میکرون)
باقیمانده	تجمعی عبوری	درصد	گرم	
4.0	96.0	4.0	35	+500



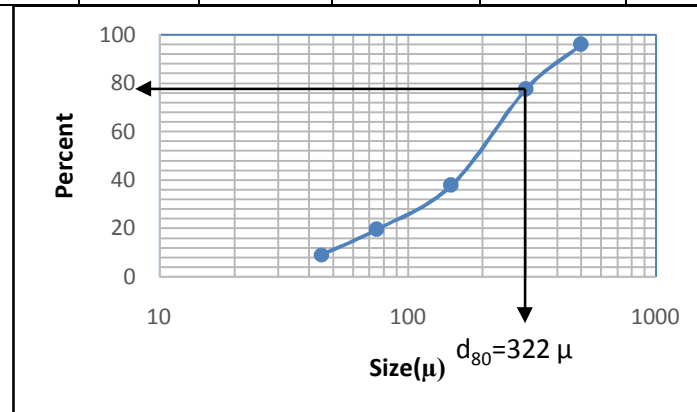
بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

22.3	77.7	18.3	161	+300-500
62.1	37.9	39.8	349.1	+150-300
80.3	19.7	18.2	160	+75-150
90.8	9.2	10.4	91.5	+45-75
100	0	9.2	81	-45
			877.6	

جدول ۶: آنالیز ICP MS بر روی فراکسیون‌های ابعادی مختلف

(-45)	(+45-75)	(+75-150)	(+150-300)	(+300-500)	Size (μ)
147.5	139.3	108	82.1	80.9	U (ppm)
33742	28888	29802	29384	28513	Fe (ppm)



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی نمونه

با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات کانی شناسی که نشان می‌دهد کانی‌های حاوی اورانیوم با کانیهای آهن دار درگیر می‌باشند به نظر می‌رسد می‌توان با استفاده از روشهای مغناطیسی با هدف تغلیظ کانی‌های آهن دار موجبات تغلیظ اورانیوم را نیز فراهم کرد. این در حالی است که بر اساس نتایج مطالعات XRF انجام شده کانی‌های آهن دار تقریباً ۱۶ درصد وزنی نمونه را تشکیل می‌دهند که این امر اهمیت استفاده از روش پیش تغلیظ کانی‌های آهن‌دار را دوچندان می‌کند.

به منظور امکان جدایش کانی‌های آهن دار در یک مرحله پیش تغلیظ روش تشویه مورد استفاده قرار گرفت. علت انجام این آزمایش تبدیل کانی‌های باقابلیت مغناطیسی پایین موجود در نمونه (هماتیت، گوتیت و جاروسیت)



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

به کانی با خاصیت مغناطیسی بالا (مگنتیت) و جداسازی این کانی‌ها به روش مغناطیسی بود. به عنوان مثال در دماهای بالا (۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد) و به کمک عوامل کاهنده (زغال سنگ)، هماتیت با فرمول شیمیایی Fe_2O_3 به مگنتیت با فرمول شیمیایی Fe_3O_4 احیا می‌شود. در این فرآیند ابتدا آب همراه حذف شده و در ادامه فرآیند فیزیکوشیمیایی زیر انجام می‌شود.

- $Fe_2O_3.nH_2O + Heat = Fe_2O_3.nH_2O + H_2O$
- $Fe_2O_3.nH_2O = Fe_2O_3 + nH_2O$
- $Fe_2O_3 + C = 4Fe_3O_4 + CO_2 + Heat$

در واکنش اول آب همراه کانسنگ و در واکنش دوم (دمای بالاتر) آب کریستالی حذف می‌شود و در واکنش

آخر هماتیت به مگنتیت احیاء می‌شود. [۶] نتایج تشویه نمونه در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج آزمایش تشویه

وزن نمونه (گرم)	وزن زغال اضافه شده (گرم)	وزن کل قبل از تشویه (گرم)	وزن کل بعد از تشویه (گرم)	کاهش وزن نمونه (%)
۲۰۰	۳۰	۲۳۰	۱۸۷/۵	۱۸/۴

پس از تشویه نمونه، آزمایش جدایش مغناطیسی شدت پایین انجام شد. باطله و کنسانتره بدست آمده مورد آنالیز شیمیایی قرار گرفت. عیار آهن از ۲/۷۴ درصد در خوراک به ۷/۹۴ درصد در کنسانتره رسید و عیار اورانیوم به ترتیب در خوراک و کنسانتره از ۱۰۴ppm به ۲۷۶ppm افزایش یافت. این در حالی است که بازیابی آهن حدود ۷۷ و بازیابی اورانیوم حدود ۷۱ درصد محاسبه شد. (جدول ۸)

جدول ۸: نتایج آزمایش مغناطیسی

نمونه	وزن		عیار (%)		بازیابی (%)	
	گرم	درصد	U	Fe	U	Fe
کنسانتره	50	26.67	0.0276	7.94	70.76	77.20
باطله	137.5	73.33	0.0041	0.85	29.23	22.80
خوراک	187.5	100	0.0104	2.74	100	100



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۴- نتیجه گیری

- آنالیز XRD کمی و مطالعات پتروگرافی از قطعات تهیه شده از نمونه‌شان داد که سنگ از نوع کوارتز موسکویت دار است و کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ عبارتند از کوارتز، موسکویت، فلدسپار و کلسیت و همچنین کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ عبارتند از کوارتز، موسکویت، جاروسیت، هماتیت، گوتیت و فلدسپار.
- آنالیز نقطه ای به روش XPMA نشان داد که کانی غالب میزبان اورانیوم اکسیدهای آهن (جاروسیت، هماتیت و گوتیت) می‌باشند.
- آزمایش احیاء مستقیم نمونه با ذغال و جدایش مغناطیسی کانی‌های آهن دار احیاء شده نمونه نشان داد که:
 ۱. پس از انجام احیاء مستقیم، مقدار بازیابی آهن در آزمایش مغناطیسی حدود ۷۷ درصد در شدت میدان مغناطیسی ۴۰۰۰ گوس می‌باشد. این مسئله نشان دهنده احیاء اکثر کانی‌های آهن به کانی مگنتیت به روش تشویه می‌باشد.
 ۲. با توجه به بازیابی ۷۱ درصدی برای اورانیوم در آزمایش مغناطیسی و افزایش ۲/۵ برابری عیار اورانیوم می‌توان نتیجه گرفت که اورانیوم به همراه کانی‌های آهن دار نمونه تغلیظ شده است.
- با توجه به نتایج بدست آمده روش مغناطیسی به عنوان یک روش مناسب پیش تغلیظ اورانیوم در کانسنگ مورد مطالعه تشخیص داده شد و پیشنهاد می‌شود در ادامه مطالعات بیشتری در این زمینه بر روی نمونه سنگ منطقه مورد مطالعه انجام شود.

۵- مراجع:

- [1]- N.L, Wiess, "Mineral Processing Handbook" S.M.E Pub, P.6-11, (1995).
[2]- J. Svoboda, "Magnetic Methods for the treatment of Minerals" Elsevier Pub, (1987).
[۳]- بهرام رضایی، "تکنولوژی فرآوری مواد معدنی (پرعیارسازی به روش مغناطیسی)"، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۸.
[۴]- علی ولیوند، "بررسی روش‌های فرآوری اورانیوم"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۹.
[۵]- ناصر توحیدی و رامز وقار، "آماده سازی بار کوره‌های تولید آهن و فولاد"، دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [6]- N. Peng, B. Peng, L.Y. Chai, "Recovery of iron from zinc calcines by reduction roasting and magnetic separation" Elsevier Pub, (2012).