

پریارسازی کانسنگ سلسن معدن مرنجاب کاشان با روش ثقلی در مقیاس آزمایشگاهی

سید امید حسینی^{۱*}، رحمان احمدی^۲، غلامرضا کریمی^۳

^{۱*} نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، omid.hoseini69@gmail.com

^۲ استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، r.ahmadi32@gmail.com

^۳ استادیار فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، g.karimi@hotmail.com

چکیده

سلسن بعنوان کانی اصلی استرانسیم می باشد و منبع اصلی تولید استرانسیم کربنات، استرانسیم نیترات و دیگر ترکیبات استرانسیم است و بمنظور تولید این ترکیبات لازم است که سلسن پریارس شود. در این مقاله، امکانسنجی پریارسازی کانسنگ سلسن با روش ثقلی و استفاده از جداکننده مولتی گراویتی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. جهت بررسی پارامترهای مؤثر از نرم افزار DX7 و روش Central Composite استفاده گردید. پارامترهای بررسی شده دستگاه شامل سرعت درام و دبی آب شستشو بوده است. نتایج نشان داد با افزایش دبی آب شستشو در صورت ثابت ماندن سایر پارامترها عیار افزایش یافته و بازیابی کاهش می یابد. همچنین نتایج، حاکی از افزایش بازیابی و کاهش عیار با افزایش سرعت درام در صورت ثابت بودن سایر پارامترها می شود. با توجه به نتایج حاصل شده سرعت درام ۲۲۵ دور در دقیقه و دبی آب شستشو ۵ لیتر بر دقیقه بعنوان مقادیر بهینه برای دستیابی به بالاترین عیار و بازیابی است که به ترتیب برابر با ۹۷/۲۴٪ و ۹۳/۸۵٪ می باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه سازی، دبی آب شستشو، سرعت درام، سلسن، مولتی گراویتی

۱. مقدمه

سلسن و استرونتیانیت دو کانی اصلی حاوی استرانسیم می باشند. میزان استرانسیم موجود در آنها در حدی است که بازیابی استرانسیم از آنها ممکن است و بهره برداری از آنها سودآوری به همراه خواهد داشت (Hanor, ۲۰۰۰). معمولاً سلسن به طور مستقیم در صنعت کاربرد چندانی نداشته و استفاده از آن بدین صورت است، که ابتدا آن را به استرانسیم کربنات تبدیل می کنند و سپس از استرانسیم کربنات تولید شده در تولید فلز استرانسیم و دیگر ترکیبات استرانسیم از جمله استرانسیم نیترات، استرانسیم کلرید و استرانسیم هیدروکسید بهره می گیرند (Zoraga, ۲۰۱۵). در زمان های گذشته، بیشترین کاربرد استرانسیم کربنات در لامپ تصویر تلویزیون های رنگی بمنظور جذب اشعه ایکس تولید شده در آن بود و بیش از ۶۵٪ کاربرد آن در این صنعت بود. کاربرد دیگر آن، به میزان بیش از ۲۰٪ در تولید آهنرباهای سرامیکی بوده است و در آن استرانسیم کربنات بعنوان یک جزو اصلی است. کاربرد های دیگر استرانسیم کربنات در صنایعی مانند شیشه، پیروتکنیک، رنگ، خشک کننده، تولید فلز استرانسیم و ترکیبات دیگر آن است (Aslan, ۲۰۰۷). اما با به روی کار آمدن نسل جدید تلویزیون های LCD و پلاسما بازار این ماده دچار رکود شد. زیرا در این نوع از تلویزیون ها استرانسیم کاربردی ندارد. امروزه توزیع کاربرد سلسن اینگونه می باشد که در صنایع آتش بازی و پیروتکنیک ۳۰٪، تولید

آهنرباهای سرامیکی ۳۰٪، تولید آلیاژها ۱۰٪، صنایع رنگ ۱۰٪، آبکاری روی ۱۰٪ و صنایع شیشه به میزان ۱۰٪ است (Hammond, ۲۰۰۵).

کانی های همراه سلسنتین اغلب باریت، ژیپس، کلسیت و استرونتیانیت می باشد و سیلیس و رس به عنوان باطله های آن محسوب می شود (Selim, ۲۰۱۰).

روش های ثقلی یکی از روش های ارزان و مؤثر در فرآوری کانسنگ هایی است که ماده با ارزش و باطله اختلاف جرم مخصوص قابل توجهی داشته باشند. از جمله روش های متداول ثقلی که بمنظور پریارسازی سلسنتین استفاده می شوند، میز لرزان، مولتی گراویتی و جیگ می باشد. امروزه مولتی گراویتی به منظور پریارسازی سلسنتین در ابعاد کم بکار می رود (نعمت اللهی، ۱۳۸۷).

در تحقیق حاضر هدف، بهینه سازی پارامترهای سرعت درام و دبی آب شستشو در مولتی گراویتی می باشد که نقش مهمی را در تولید سلسنتین پریار در کنسانتره ایفا می کنند.

۲. داده ها و روش تحقیق

نمونه سلسنتین مورد مطالعه در این پژوهش به مقدار ۱۲۰ کیلوگرم از دیوی معدن مرنجاب کاشان برداشت شده است. بمنظور تهیه نمونه معرف، ابتدا نمونه اولیه توسط سنگ شکن های فکی و مخروطی مورد خردایش قرار گرفت. خردایش تا جایی صورت گرفت که تمام نمونه از سرنده ۳/۳۶ میلی متر عبور کند. سپس به کمک ریفل، نمونه خرد شده همگن گردیده و نمونه های ۱ کیلوگرمی بدست آمد. یکی از نمونه های ۱ کیلوگرمی تهیه شده جهت انجام مطالعات شناسایی توسط آسیای میله ای و دستگاه پودرکن، خرد شده و به کمک ریفل تبدیل به نمونه های ۱۰۰ گرمی گردید.

جهت تعیین درصد ترکیبات موجود در نمونه، ۱۰۰ گرم از نمونه معرف پودر شده به آزمایشگاه شیمی ارسال گردید. ترکیب شیمیایی سلسنتین با استفاده از دستگاه فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مدل PW1480 ساخت شرکت Philips تعیین شد. جهت شناسایی کانی های اصلی، فرعی و جزئی موجود در نمونه از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل PW1800 ساخت شرکت Philips با لامپ مس استفاده گردید. بدین منظور، ۱۰۰ گرم از نمونه معرف پودر شده به آزمایشگاه کانی شناسی ارسال شد.

برای اطمینان از نوع کانی های موجود در نمونه اولیه، مقطع نازک تهیه و مطالعات میکروسکوپی روی آن صورت گرفت. همچنین بمنظور بررسی وضعیت درگیری سلسنتین با سایر کانی ها و ارتباط آنها با هم در محدوده ابعادی ۷۵- میکرون نیز مقطع نازک تهیه شده و مورد مطالعه قرار گرفت.

برای انجام آزمایش های مولتی گراویتی روی محدوده ابعادی ۷۵- میکرون، ابتدا مقدار معینی از نمونه حاصل شده از محصول سنگ شکن مخروطی در یک آسیای میله ای به روش تر برای دستیابی به ابعاد کمتر از ۷۵ میکرون مورد خردایش قرار گرفت. پس از فیلتر کردن و خشک کردن نمونه آسیا شده، نمونه ۷۵- میکرون بعنوان خوراک اولیه مولتی گراویتی در نظر گرفته شد.

آزمایش های انجام شده در این مطالعه توسط مولتی گراویتی مدل C900 ساخت شرکت مازلی انگلستان صورت گرفت. از آنجایی که آزمایش های مولتی گراویتی توسط نرم افزار DX7 و با روش Central Composite طراحی شدند، لازم است که

برای پارامترهای سرعت درام و دبی آب شستشو حد پایین و بالا در نظر گرفته شود. حدود بالا و پایین تعریف شده برای پارامترها مربوط به آزمایش مولتی گراویتی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. سطوح مختلف پارامترهای مورد مطالعه بر روی جداکننده مولتی گراویتی

پارامتر	واحد	حد پایین	حد بالا
سرعت درام	دور در دقیقه	۲۲۵	۲۶۵
دبی آب شستشو	لیتر بر دقیقه	۵	۸

سایر پارامترها در آزمایش های انجام شده، ثابت در نظر گرفته شدند. مقدار فرکانس ۴ هرتز، درصد جامد ۲۵٪ و دبی پالپ ورودی به دستگاه برابر با ۲ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شدند.

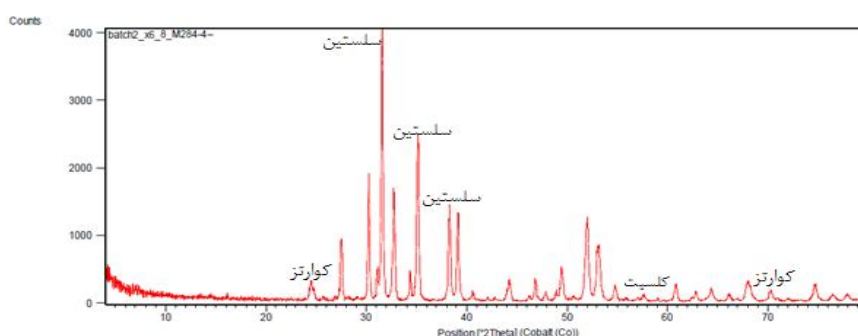
۳. تحلیل داده ها

نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه معرف در جدول ۲ آمده است. در آنالیز XRF، استرانسیم در قالب اکسید گزارش شده است و مقدار آن ۴۲/۰۸٪ گزارش شده است. همچنین درصد کوارتز در نمونه برابر با ۱۱/۶۳٪ می باشد و بعنوان باطله اصلی در این زون می باشد. از آنجایی که در این گزارش، استرانسیم در قالب اکسید بیان شده است، از تقسیم جرم اتمی سلسنتین به جرم اتمی اکسید استرانسیم ضربی بدست خواهد آمد و بعد از ضرب کردن این ضریب در عیار اکسید استرانسیم بدست آمده و تبدیل آن به شکل سولفات، عیار سلسنتین برابر ۷۴/۵۶٪ می باشد.

جدول ۲. نتایج حاصل از تجزیه شیمیایی نمونه معرف

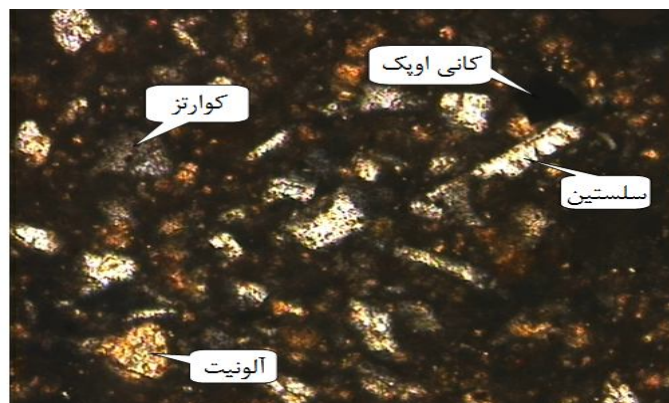
ترکیب	درصد
L.O.I	۵/۰۹
Al ₂ O ₃	۲/۵۴
SiO ₂	۱۱/۶۳
SO ₃	۳۰/۴۱
K ₂ O	۰/۶۱
CaO	۵/۵۴
Fe ₂ O ₃	۲/۱۰
SrO	۴۲/۰۸

بمنظور تعیین نوع کانی های موجود در نمونه، آنالیز XRD از نمونه اولیه تهیه گردید. نتایج مربوط به این آنالیز نشان داد که سلسیت فراوان ترین کانی موجود در نمونه می باشد و همانطور که آنالیز مربوطه نشان داد بلندترین پیک نمودار مربوط به سلسیت است. کوارتز و کلسیت بعنوان کانی های دیگر موجود در نمونه شناسایی شدند و با توجه به پیک های حاصل شده در نمودار، این مطلب نیز مشخص است و شدت این پیک ها نسبت به سلسیت کمتر است. در شکل ۱ آنالیز XRD نمونه اولیه نشان داده شده است.



شکل ۱. گراف XRD نمونه سلسیت

برای تعیین دقیق تر کانی های موجود در خوراک اولیه، از آن مقطع نازک تهیه شد و سپس در زیر میکروسکوپ نوری مشاهده گردید. نتایج نشان داد که کانی های اصلی نمونه با فراوانی بیشتر از ۱۰٪ مربوط به کانی های سلسیت و کوارتز می باشد. کانی های فرعی موجود در نمونه با فراوانی بین ۲ تا ۱۰ درصد شامل کانی های رسی، باریتو کلسیت $BaCa(CO_3)_2$ و آلونیت $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ می باشند. همچنین کانی های فرعی در نمونه شامل کلسیت و کانی های اوپک می باشند که دارای فراوانی کمتر از ۲٪ می باشد. برای بررسی درگیری بین سلسیت با باطله ها در محدوده ابعادی ۷۵- میکرون که خوراک آزمایش های مولتی گراویتی نیز می باشد، مقطع نازک تهیه شده و در ریز میکروسکوپ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج مربوط به مقطع نازک در این فراکسیون نشان داد که بیشتر کانی ها آزاد هستند و درجه آزادی سلسیت در این محدوده ابعادی برابر با ۸۷٪ گزارش شد. در شکل ۲، کانی های موجود در نمونه ۷۵- میکرون در زیر میکروسکوپ نشان داده شده است.



شکل ۲. مقطع نازک تهیه شده در محدوده ابعادی ۷۵- میکرون

برای به دست آوردن خوراک اولیه مولتی گراویتی لازم است که نمونه تا $d_{80} = 75$ میکرون خرد شود. در صورتی که با خردایش بیشتر $d_{100} = 75$ میکرون برای محصول سنگ شکن مخروطی حاصل شود، مقدار محصول ۷۵- میکرون بیشتری برای خوراک اولیه مولتی گراویتی تولید می شود، اما به دلیل تولید نرمه فراوان، زمان خردایش باید به گونه ای تعیین شود که $d_{80} = 75$ میکرون حاصل شود. زمان خردایش مورد نیاز برای دستیابی به $d_{80} = 75$ میکرون حدود ۷ دقیقه تعیین شد. همانطور که اشاره شد حد پایین و بالا برای سرعت درام ۲۲۵ و ۲۶۵ دور در دقیقه و همچنین حد پایین و بالا برای دبی آب شستشو نیز به ترتیب ۵ و ۸ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای تعیین حدود بالا و پایین ابتدا یک سری آزمایش های اولیه صورت گرفت و مقادیر ذکر شده، بدست آمد.

۴. بحث و بررسی

برای پریارسازی سلسنتین در مجموع ۱۳ شامل چهار آزمایش فاکتوری، چهار آزمایش محوری و پنج آزمایش مرکزی با مولتی گراویتی بر روی دانه بندی ۷۵- میکرون با هدف دستیابی به بالاترین عیار و بازیابی صورت گرفت. آزمایش ها توسط نرم افزار DX7 و با روش Central Composite طراحی شد. ضریب آلفا در این آزمایش ها برابر با ۱/۴۱۴۲۱ در نظر گرفته شده است. عیار خوراک در تمامی آزمایش ها ۷۶/۶۴٪ می باشد. در جدول ۳، تست های طراحی شده توسط نرم افزار آمده است.

جدول ۳. آزمایش های طراحی شده توسط نرم افزار DX7

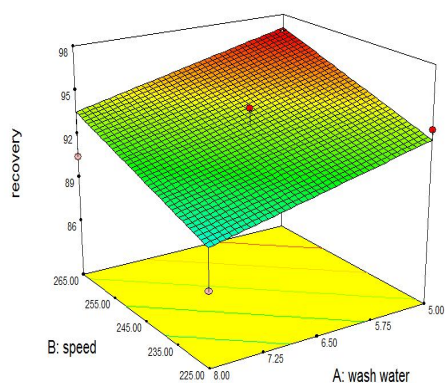
شماره تست	سرعت درام (دور بر دقیقه)	دبی آب شستشو (لیتر بر دقیقه)	بازیابی (درصد)	عیار (درصد)
۱	۲۲۵	۵	۹۳/۸۵	۹۷/۲۴
۲	۲۲۵	۸	۸۶/۹۶	۹۸/۶۸
۳	۲۶۵	۵	۹۶/۶۷	۹۰/۴۹
۴	۲۶۵	۸	۹۰/۵۰	۹۰/۶۸
۵	۲۴۵	۴/۵	۹۴/۹۴	۸۹/۲۳
۶	۲۴۵	۸/۵	۹۴/۳۸	۹۴/۸۹
۷	۲۱۷	۶/۵	۸۸/۷۲	۹۷/۰۳
۸	۲۷۳	۶/۵	۹۵/۳۴	۹۱/۹۰
۹	۲۴۵	۶/۵	۹۴/۵۵	۹۴/۶۵
۱۰	۲۴۵	۶/۵	۹۴/۵۵	۹۴/۶۵
۱۱	۲۴۵	۶/۵	۹۴/۵۵	۹۴/۶۵
۱۲	۲۴۵	۶/۵	۹۴/۵۵	۹۴/۶۵
۱۳	۲۴۵	۶/۵	۹۴/۵۵	۹۴/۶۵

پس از انجام آزمایش های پیشنهادی توسط نرم افزار، تعیین شرایط بهینه بمنظور دستیابی به بالاترین عیار و بازیابی سلسنتین انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده، در سرعت درام ۲۲۵ دور در دقیقه و دبی آب شستشو ۵ لیتر بر دقیقه، بالاترین عیار و بازیابی حاصل شد. تحت این شرایط به ترتیب عیار و بازیابی ۹۷/۲۴٪ و ۹۳/۸۵٪ حاصل شد. در کنسانتره حاصله، عیار سیلیس بعنوان باطله اصلی معادل ۱/۶۵٪ اندازه گیری شد. عیار سلسنتین و سیلیس تولید شده در کنسانتره در حدی است که توانایی تولید استرانسیم کربنات را دارد. عیار سلسنتین و سیلیس قابل قبول برای تبدیل شدن به استرانسیم کربنات به ترتیب عیار بالاتر از ۹۰٪ و عیار کمتر از ۲٪ می باشد (Bulatovic, ۲۰۱۴). در جدول ۴ نتایج حاصل از آزمایش مولتی گراویتی در شرایط بهینه آورده شده است.

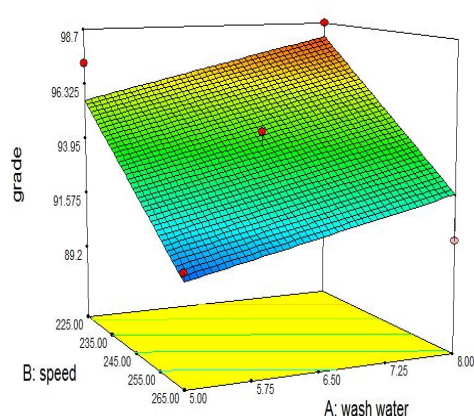
جدول ۴. نتایج حاصل از مولتی گراویتی در شرایط بهینه

محصول	عیار سلسنتین (%)	عیار سیلیس (%)	درصد وزنی	بازیابی سلسنتین (%)
کنسانتره	۹۷/۲۴	۱/۶۵	۷۴/۴۶	۹۴/۴۷
باطله	۱۶/۵۸	۱۵/۳۵	۲۵/۵۴	۵/۵۳
خوراک	۷۶/۶۴	۵/۱۵	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰

اثر متقابل سرعت درام و دبی آب شستشو بر عیار سلسستین در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل در سطح پایین آب شستشو، با افزایش سرعت درام از ۲۲۵ به ۲۶۵ دور در دقیقه، عیار سلسستین از ۹۷/۲۴٪ به ۹۰/۴۹٪ کاهش یافته است. در حالیکه با افزایش سرعت درام در این بازه در سطوح بالای دبی آب شستشو، عیار سلسستین از ۹۸/۶۸٪ به ۹۰/۶۸٪ کاهش یافته است. نتایج نشان می دهد که اثر سرعت درام بر عیار در سطوح بالای آب شستشو بیشتر است. همچنین با توجه به شکل در سطح پایین سرعت درام، با افزایش دبی آب شستشو از ۵ به ۸ لیتر بر دقیقه، عیار سلسستین از ۹۷/۲۴٪ به ۹۸/۶۸٪ افزایش یافت. در حالیکه با افزایش دبی آب شستشو در این بازه در سطوح بالای سرعت درام، عیار سلسستین از ۹۰/۴۹٪ به ۹۰/۶۸٪ افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد که اثر دبی آب شستشو بر عیار در سطوح پایین سرعت درام بیشتر است. همچنین اثر متقابل سرعت درام و دبی آب شستشو بر بازیابی در شکل ۴ آورده شده است. مطابق شکل در سطح پایین دبی آب شستشو با افزایش سرعت درام از ۲۲۵ به ۲۶۵ دور در دقیقه، بازیابی سلسستین از ۸۶/۹۶٪ به ۹۰/۵۰٪ افزایش یافت. نتایج نشان می دهد که اثر سرعت درام روی بازیابی در سطوح بالای دبی آب شستشو بیشتر است. همچنین در سطح پایین سرعت درام با افزایش دبی آب شستشو از ۵ به ۸ لیتر بر دقیقه، بازیابی سلسستین از ۹۳/۸۵٪ به ۸۶/۹۶٪ کاهش یافته است، اما در سطح بالای سرعت درام با افزایش دبی آب شستشو از ۵ به ۸ لیتر بر دقیقه بازیابی سلسستین از ۹۶/۶۷٪ به ۹۰/۵۰٪ کاهش پیدا کرده است. نتایج نشان می دهد که اثر دبی آب شستشو بر بازیابی در سطوح پایین سرعت درام بیشتر است. با توجه به مطالب گفته شده، در صورت افزایش سرعت درام از آنجایی که نیروی گریز از مرکز بالاتر می رود، باعث می شود ذراتی با چگالی پایین تر که در پالپ حضور دارند و در سرعت های پایین تر توانایی چسبیدن به سطح درام را نداشته اند به سطح درام چسبیده و به سمت کنسانتره بروند. در نتیجه با افزایش سرعت درام بازیابی افزایش می یابد. همچنین افزایش دبی آب شستشو باعث کندن ذرات از سطح درام شده و آنها را به سمت باطله هدایت می کند. بعبارت دیگر می توان گفت که با افزایش دبی آب شستشو نیروی وارد بر ذرات جهت کندن شدن آنها از سطح درام افزایش یافته و ذراتی با چگالی کمتر از سطح درام شسته شده و به سمت باطله هدایت می شوند. بنابراین با افزایش دبی آب شستشو عیار کنسانتره افزایش می یابد.



شکل ۴. اثر متقابل سرعت درام و دبی آب شستشو بر بازیابی



شکل ۳. اثر متقابل سرعت درام و دبی آب شستشو بر عیار

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، پریارسازی نمونه سلسیتین معدن مرعاج کاشان به کمک دستگاه جداکننده مولتی گراویتی در محدوده ابعادی ۷۵- میکرون در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که در صورتی که تمامی پارامترهای مولتی گراویتی ثابت در نظر گرفته شود با افزایش سرعت درام، بازیابی زیاد و عیار کاهش می یابد. در مورد دبی آب شستشو نیز در صورتی که تمامی پارامترها ثابت فرض شوند با افزایش آن، عیار سلسیتین افزایش یافته و بازیابی آن کاهش می یابد. همچنین بررسی اثرات متقابل پارامترهای دبی آب شستشو و سرعت درام نشان دادند که اثر سرعت درام بر عیار در سطوح بالای آب شستشو بیشتر و اثر دبی آب شستشو بر عیار در سطوح پایین سرعت درام بیشتر است. بعلاوه اثر سرعت درام روی بازیابی در سطوح بالای دبی آب شستشو بیشتر است اما اثر دبی آب شستشو بر بازیابی در سطوح پایین سرعت درام بیشتر است.

بر اساس نتایج بدست آمده از مولتی گراویتی، در شرایط بهینه یعنی سرعت درام ۲۲۵ دور در دقیقه و دبی آب شستشو ۵ لیتر بر دقیقه بالاترین عیار و بازیابی بدست آمد. با توجه به شرایط ذکر شده در این آزمایش عیار حاصله برابر با ۹۷/۲۴٪ و بازیابی آن برابر با ۹۳/۸۵٪ شد.

۶. مراجع

- ۱- نعمت اللهی، ح. (۱۳۸۷). *کانه آرای*. جلد دوم، چاپ پنجم، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
2. Aslan, N. (2007). Modeling and optimization of Multi-Gravity Separator to produce celestite concentrate. **Powder Technology 174**: 127-133.
3. Hammond, C.R. (2005). *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Publication No. 86.
4. Hanor, J.S. (2000). Barite-celestine geochemistry and environments of formation. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry 40(1)**: 193-275.
5. Selim, A.Q., El-Midany, A.A., Abdel-Fattah, A.S., Ibrahim, S.S. (2010). Rationalization of the up-grading circuit of celestite for advanced applications. **Powder Technology 198**: 233-239.
6. Zoraga, M., Kahruman, C., Yusufoglu, I. (2015). Kinetics of Conversion of Concentrated Celestite Ore to Acid Strontium Oxalate Monohydrate in Oxalic Acid Solutions. *Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering*: 357-1.