



## مطالعه و بررسی پیش تغلیظ کانسنگ کرومیت سبزووار با روش سنگ جوری پیشرفته

معصومه قربانی<sup>۱</sup>، بهرام رضایی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی علوم تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ فروردین ۱۳۹۶

بازنگری: ۱۰ مرداد ۱۳۹۶

پذیرش: ۱۰ مرداد ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۱ مرداد ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

سنگ جوری  
جدایش فیزیکی  
کرومیت  
کارایی جدایش  
DX10

**چکیده:** سنگ جوری به‌عنوان یک مرحله مؤثر در فرآیند فرآوری کرومیت مطرح است و نتایج محدودی در این زمینه گزارش شده است. با به‌کارگیری این روش، صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و افزایش تولید در مرحله خردایش صورت می‌گیرد. سنگ جوری در سه مرحله ورودی به سنگ‌شکن اولیه، خروجی از سنگ‌شکن اولیه و ورودی به جدایش ثقلی انجام می‌گیرد که مرحله خروجی سنگ‌شکن اولیه نتایج مطلوب‌تری به دنبال داشته است. در این تحقیق، برای جداسازی کرومیت با دستگاه سنگ جوری طراحی‌شده، شناسایی و خواص سنجی کرومیت انجام شده است. ابتدا کانی‌ها توسط اسکنر سه‌بعدی تصویربرداری شده و پس از ایجاد ابر نقاط، حجم به دست می‌آید و بر اساس آن قطر معادل قطعه سنگ تعیین می‌شود. سپس قطعات بر روی نوار نقاله دستگاه ساخته شده قرار گرفته و توسط حسگر لودسل، جرم هر کانی روی نوار نقاله در حال حرکت اندازه‌گیری می‌شود و جرم مخصوص کانی را مشخص می‌سازد. در نهایت با توجه به ابعاد و شروط مشخص شده، از مدل مربوط به هر فراکسیون مقدار عیار قطعه سنگ مشخص شده و بر اساس حد مشخص شده برای عیار، به کنسانتره یا باطله هدایت می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کرومیت منطقه سبزووار با عیار ۲۶/۱۶ درصد و کانی‌های مزاحم همراه پس از ورود به دستگاه سنگ جوری طراحی‌شده، کنسانتره اولیه‌ای معادل کرومیت ۳۳/۱۱ درصد و بازیابی ۸۲/۹۲ درصد تولید می‌کند.

### ۱- مقدمه

پروژه خردایش وارد می‌شوند فاقد ارزش اقتصادی هستند که انرژی صرف همه این مواد شده و در نهایت مواد گانگ یا باطله پس از انجام عملیات خردایش و عمدتاً پس از فلوتاسیون و یا سایر روش‌های جدایش از مسیر خارج می‌شوند که این مواد خود باعث درگیر شدن بخش‌های مختلف از مسیر فرآوری و در نهایت تولید باطله که به لحاظ اقتصادی در بازار قابل فروش نیست، می‌شود. بنابراین سنگ‌جوری به‌عنوان یک تکنولوژی برای کاهش مقدار خوراک به مدارهای آسیاب‌کنی شناخته می‌شود [۳]. حذف مقادیر زیادی باطله قبل از هرگونه هزینه اضافی سرمایه‌گذاری و هزینه عملیاتی در دستور کار این روش قرار دارد. در ساده‌ترین حالت دستگاه‌های سنگ‌جوری از یک سنسور، پردازشگر و یک بازوی طبقه‌بندی‌کننده تشکیل شده‌اند [۴]. در سده‌های گذشته سنگ‌جوری به طریق دستی بر روی سنگ‌هایی که از لحاظ ظاهری شناخته شده بودند انجام می‌گرفت. در حالی که تکنولوژی‌های پیشرفته تنها به سطح اکتفا نمی‌کنند و خواص ذاتی سنگ را نیز مورد بررسی قرار داده و در نهایت اقدام به طبقه‌بندی می‌نمایند [۵].

برگمن<sup>۲</sup> در سال ۲۰۱۱ انواع سنسورهایی که امروزه در طبقه‌بندی مبتنی بر سنسور استفاده می‌شوند را به سنسورهای نوری، نزدیک مادون قرمز، انتقال پرتو ایکس و الکترومغناطیس تقسیم بندی نمود. همچنین پیشرفت‌های تکنولوژیکی در سنسورها را در افزایش توان تولید تجهیزات

انرژی مورد نیاز برای استخراج فلز با ارزش از درون یک کانسنگ و تهیه کنسانتره بخش قابل توجهی از هزینه‌های تولید فلز را به خود اختصاص می‌دهد. به طور متوسط در صنعت معدن کاری حدود ۴۴ درصد از مصرف الکتریسیته به بخش خردایش و آسیاب‌کنی اختصاص می‌یابد [۱]. در چرخه فرآوری، عملیات کاهش ابعاد به تنهایی حدود ۱۵۰×۱۰۹ kWh انرژی الکتریکی مصرف می‌کند [۲]. انرژی مورد نیاز در طول فرآیند خردایش و آسیاب‌کنی طبق رابطه باند با معکوس رادیکال ابعاد محصولات افزایش می‌یابد و لذا عمده‌ی انرژی در طول فرآیند خردایش مربوط به بخش آسیاب‌کنی برای تولید محصول مناسب به‌عنوان خوراک بخش فلوتاسیون و مراحل جدایش بعدی است. در بسیاری از صنایع فلزی (به خصوص فلزات refractory) بخش آسیا حدود ۶۰ درصد هزینه‌های کلی مربوط به انرژی مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. کاهش عیار حد و افزایش مصرف انرژی باعث می‌شود که تولید فلز از کانسنگ بسیار گران تمام شود. بنابراین باید به دنبال شناخت راه‌های کاهش مصرف انرژی در طول فرآیند خردایش بود. فلزات پایه اغلب دارای عیار حد پایین ۱ درصد هستند و بسیاری از موادی که در

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rezai@aut.ac.ir

۱ فلزاتی که فرآوری آن‌ها سخت بوده، از روش‌های معمول و مرسوم قابل فرآوری نیستند و برای فرآوری آن‌ها از گرما و فشار استفاده می‌شود

## ۲- مواد و روش‌ها

نمونه کانی مورد آزمایش، از معدن سبزوار واقع در استان خراسان جنوبی و از خروجی سنگ‌شکن فکی (سنگ‌شکن اولیه) تأمین شد. نوار نقاله عرض ۴۰ سانتی‌متر ساخت شرکت سهند و تولید ایران به همراه استراکچر تهیه و در تابلو برق مربوطه اینورتر LG ساخت کره جنوبی قرار داده شد. سنسور لودسل ساخت کشور آلمان مورد استفاده قرار گرفت. همچنین ماژول و سنسور لودسل (۱-۰ کیلوگرم)، ورودی آنالوگ و Plc data, HMS 4.3 و inch kinco, rله finder24 VDC، شیر کتابی پنوماتیکی Air TAK، باکس تابلو برق ۵۳/۳۵، فیوز LS، داگت، ریل، سیم و پرچ تهیه شد. مطالعات XRF<sup>۶</sup> توسط دستگاه آکسفورد (کد FD2000 ساخت کشور انگلیس) و مطالعات XRD<sup>۷</sup> توسط دستگاه STOE (کد Stidy-mp) و ساخت کشور آلمان انجام شد که نتایج آنالیزهای XRD و XRF و ترکیبات موجود در کانی مورد آزمایش در جدول‌های ۱ و ۲ و شکل ۱ آمده است.

### جدول ۱: مقدار عناصر موجود در ترکیب شیمیایی کانی کرومیت

Table 1. The amount of compound in the chemical composition of chromite

عنصر	درصد
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۶/۰۱
FeO	۱۵/۰۷
SiO <sub>2</sub>	۲۶/۳۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۶/۴۹
MgO	۷/۸۹
سایر عناصر	۸/۲۳
جمع	۱۰۰

### جدول ۲: کانی‌های اصلی موجود در نمونه کرومیت

Table 2. The main minerals found in the chromite sample

کانی	فرمول شیمیایی	درصد
کرومیت	(Fe,Mg)Cr <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	۳۳/۹
کائولینیت	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	۲۷/۹۳
هماتیت	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱۵/۰۷
کوارتز	SiO <sub>2</sub>	۱۴/۸۷

6 X-Ray Fluorescence

7 X-Ray Diffraction

سنگ جوری اتوماتیک و کشف روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر سنسورها در صنایع معدنی را مورد توجه قرار داده است [۶].

دالم<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ کاربرد سنگ جوری اتوماتیک مبتنی بر سنسور را مورد ارزیابی قرار داده و عنوان نمودند که با حذف کانی‌های گانگ<sup>۲</sup> به کاهش هزینه‌های فرآوری کانه‌های درشت کمک می‌کنند. با این حال، سنگ جوری به کمک سنسورها هنوز یک تکنولوژی نوظهور با کاربردهای ثابت‌شده‌ی محدود محسوب می‌شود [۷].

لیزارد<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ پی بردند که انتقال پرتو ایکس که انرژی انتقال داده‌شده از داخل یک نمونه را آنالیز می‌کند، در طبقه‌بندی سنگ‌ها سودمند است. وقتی پرتوهای ایکس از داخل یک ماده عبور می‌کنند، جذب‌شده، بازتابیده شده یا انتقال داده می‌شوند؛ میزان پرتوهای ایکس انتقال داده‌شده از میان نمونه به‌شدت به چگالی اتمی ماده بستگی دارد. بنابراین، عناصر چگال‌تر (معمولاً کانه) انرژی پرتو ایکس بیشتری نسبت به عناصر سبک‌تر (معمولاً گانگ) جذب می‌کنند. جمع‌آوری سیگنال‌های پرتوهای ایکس عبور داده‌شده در دو سطح انرژی مختلف به سنسور اجازه می‌دهد که تأثیر ضخامت مواد بر انتقال پرتو ایکس را تقلیل دهد. چنین سنسورهایی که برای طبقه‌بندی کانه استفاده می‌شوند، با نام سنسورهای انتقال پرتو ایکس با انرژی مضاعف (دی‌ای-ایکس آر تی) شناخته می‌شوند. سنگ‌جورهایی مبتنی بر پرتوهای ایکس تمام محتوای سنگ‌های مجزا را می‌آزمایند و نیازی نیست مواد به‌طور استثنایی خشک یا تمیز شوند، و هیچ جهت‌گیری خاصی برای شناسایی کانه توسط سنسور لازم نیست. این ابزارها مشابه اسکنرهای پرتو ایکس در نقاط بازرسی امنیتی فرودگاه‌ها، لابه‌لای سنگ‌های مورد آزمایش را مشاهده می‌کنند و نیازی به تکیه بر روش‌های اتفاقی و امید به نمونه‌گیری کافی از سطح سنگ برای داشتن نمونه نماینده از محتوای آن ندارند [۸].

بالانتین<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان دادند که ظرفیت یک طبقه‌بندی‌کننده با افزایش ابعاد سنگ افزایش می‌یابد. بنابراین، بهترین جای نصب آن‌ها پایین‌دست سنگ‌شکن‌های اولیه یا ثانویه یا جریان‌هایی با ابعاد یکسان مثل مدارهای قلوه‌سنگ در مدارهای خردایش نیمه خودشکن و بالادست آسیاها است [۹].

اشتینرنت<sup>۵</sup> در سال ۲۰۱۵ نشان داد که شناسایی نقطه مناسب در یک فرآیند برای به‌کارگیری دستگاه‌های سنگ جوری بسیار مهم است. با توجه به اینکه این دستگاه‌ها باطله را خارج می‌کنند، باید در ابتدایی‌ترین نقاط ممکن فلوشیت نصب شوند تا هزینه‌های انرژی، مواد شیمیایی، و ظرفیت را با توجه به اینکه باطله به هر نحو دیگری از مدار حذف خواهد شد، به حداقل برسانند [۱۰].

1 Dalm

2 Gangue

3 Lessard

4 Ballantyne

5 Steinert

سپس از فرمول چگالی که برای سیستم تعریف شده چگالی هریک به دست آمد.

$$\rho = m/v \quad (1)$$

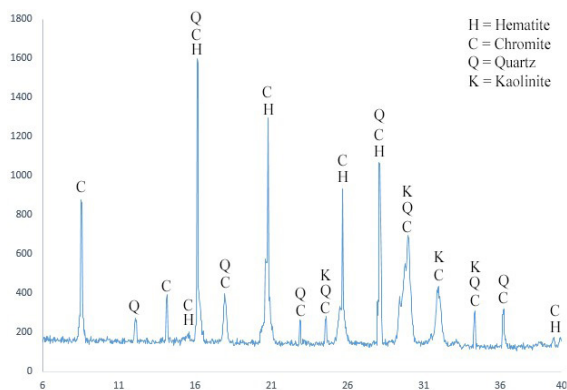
که در آن:

$\rho$ : چگالی قطعه سنگ بر حسب  $g/cm^3$

$m$ : جرم قطعه سنگ بر حسب  $g$

$v$ : حجم قطعه سنگ بر حسب  $cm^3$

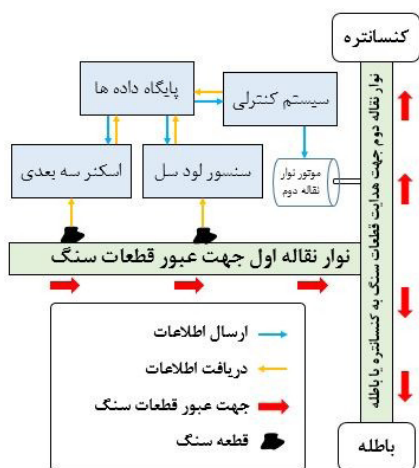
در ابتدا محصول سنگ شکن فکی در فراکسیون های مختلف طبقه بندی شد و مطابق شکل ۲ پس از محاسبه حجم توسط اسکنر سه بعدی قطر معادل هر یک از فراکسیون ها تعیین شد. سپس در هر فراکسیون ذراتی که دارای چگالی های مختلف بودند مورد آنالیز قرار گرفته و درصد هر یک از عناصر تشکیل دهنده مشخص شد.



شکل ۱: آنالیز XRD نمونه

Fig. 1. XRD Analysis of the sample

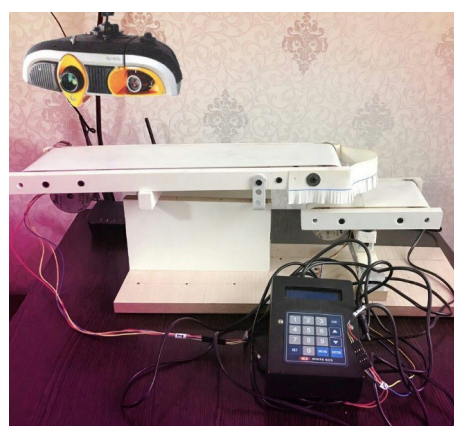
چگالی کانی موردنظر نیز محاسبه گردید. نمونه کانی موردنظر پس از توزین توسط ترازوی دیجیتال (مدل PA214C ساخت شرکت OHUS) توسط دستگاه سنگ شکن فکی آزمایشگاهی (مدل IKH.B1 و ساخت کشور ایران) خردایش شد. ۵۰ درصد از نمونه خردشده با استفاده از یک سری سرندهی به دست آمده در هر مرحله به دقت توزین و جهت انجام آزمایش های بعدی طبقه بندی و کدگذاری شد. در مرحله بعد و در فراکسیون بندی های مختلف، کانی ابتدا توسط اسکنر سه بعدی (مدل nub3d- ساخت کشور آلمان) پردازش و ابر نقاط کانی تشکیل شد. سپس توسط برنامه CAD متصل به پردازشگر، حجم کانی ها به دست آمد. پس از این مرحله در سیستم PLC به هریک از کانی ها کد اختصاص یافته و حجم آن ثبت شد. سپس کانی ها به ترتیب و به صورت بر خط و با فاصله از روی نوار نقاله عبور نموده و جرم هریک تعیین شد.



شکل ۳: شماتیکی از عملکرد دستگاه و نحوه ارتباط بخش های مختلف آن

Fig. 3. A schematic of how the device works and how it interacts with different parts

سپس با استفاده از درصد های محاسبه شده در هر فراکسیون رابطه بین کرومیت با چگالی کرومیت رابطه بدست آمد و در پایگاه داده های دستگاه ذخیره گردید که بر اساس آن مقدار عیار محتوی هر قطعه سنگ تعیین شد. سپس با استفاده از نرم افزار DX10 نرمال بودن نمونه ها تصدیق و داده های مربوط به هر بخش آنالیز شده و در نهایت مدل ریاضی مربوط به هر فراکسیون به صورت جداگانه محاسبه شد و بر اساس رابطه بدست آمده برای هر فراکسیون مقدار عیار محتوی هر قطعه سنگ تعیین شده و با توجه به اینکه عیار بالای ۲۰ به عنوان کنسانتره و عیار پایین ۲۰ به عنوان باطله در نظر گرفته شد، نمونه به دو بخش باطله و کنسانتره تقسیم شد، این عیار به عنوان پیش فرض انتخاب شده است و با انجام آزمایشات می توان بهترین حد جدایش برای دستیابی به بهترین عیار و بازیابی را تعیین نمود.



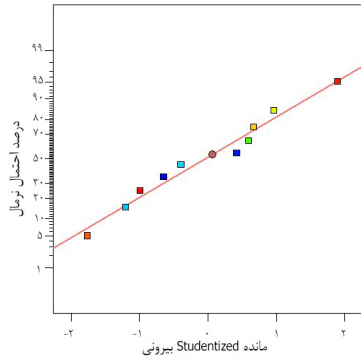
شکل ۲: نمایی از دستگاه ساخته شده و قسمت های مختلف آن

Fig. 2. A view of the device and its various parts

1 Programmable logic controller

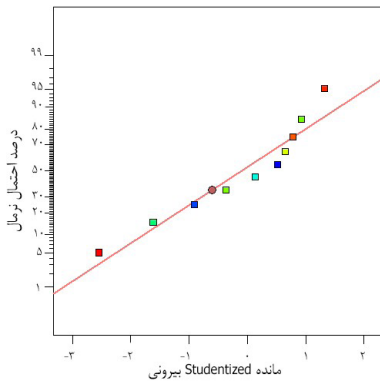
### ۳- نتایج و بحث

با توجه به اینکه صحت تقسیم بندی در این روش بسیار مهم است لذا به منظور نیل به این هدف نیازمند انجام آنالیز بر روی تمام ذرات یک فراکسیون می‌باشیم از آنجا که جامعه آماری بسیار بزرگ می‌باشد بنابراین برای کاهش تعداد نمونه‌ها از نرم‌افزار DX10 استفاده شد و از هر فراکسیون تعداد ۱۰ نمونه انتخاب شد که برای نرمال بودن این نمونه‌ها از لحاظ متغیرهای وزن و حجم که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند نمودار نرمال باقیمانده‌ها مطابق شکل ۴ تا ۹ رسم شد و مورد آنالیز و بررسی قرار گرفت و هستند و چنانچه از شکل‌ها مشخص است درصد نرمال بودن داده‌ها در تمام فراکسیون‌ها بیش از ۹۷ درصد شد لذا با احتمال بسیار بالا می‌توان گفت که نمونه‌های انتخاب شده می‌توانند به عنوان نماینده‌ای از کل فراکسیون باشند.



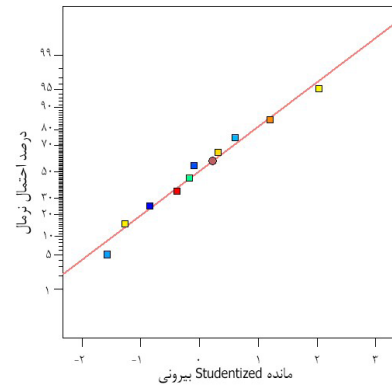
شکل ۶: نمودار نرمال باقیمانده‌ها برای فراکسیون  $+19-26.5$  میلی‌متر

Fig. 6. The normal graph of residuals for fractions  $+19-26.5$  mm



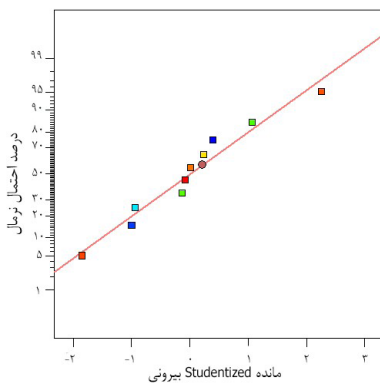
شکل ۷: نمودار نرمال باقیمانده‌ها برای فراکسیون  $+12.5-19$  میلی‌متر

Fig. 7. The normal graph of residuals for fractions  $+12.5-19$  mm



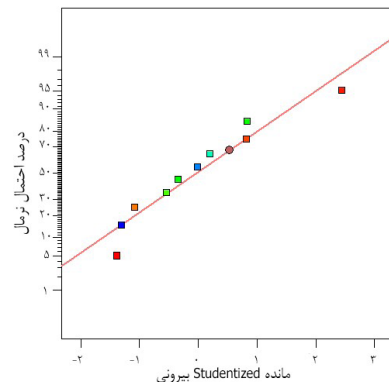
شکل ۴: نمودار نرمال باقیمانده‌ها برای فراکسیون  $+37.5-50$  میلی‌متر

Fig. 4. The normal graph of residuals for fractions  $+37.5-50$  mm



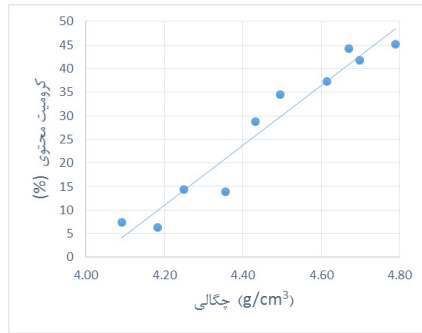
شکل ۸: نمودار نرمال باقیمانده‌ها برای فراکسیون  $+9.5-12.5$  میلی‌متر

Fig. 8. The normal graph of residuals for fractions  $+9.5-12.5$  mm



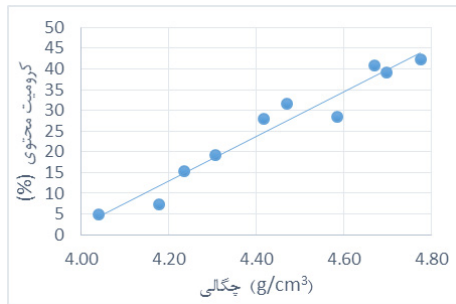
شکل ۵: نمودار نرمال باقیمانده‌ها برای فراکسیون  $+26.5-37.5$  میلی‌متر

Fig. 5. The normal graph of residuals for fractions  $+26.5-37.5$  mm



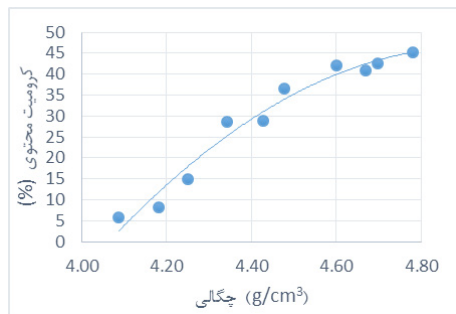
شکل ۱۲: رسم مقادیر حاصل از آنالیز برای نمونه‌های کرومیت در مقابل چگالی برای فراکسیون ۲۶/۵-۱۹ میلی‌متر

Fig. 12. The plotting of the analyte values for chromite samples versus density for fractions +19 -26.5 mm



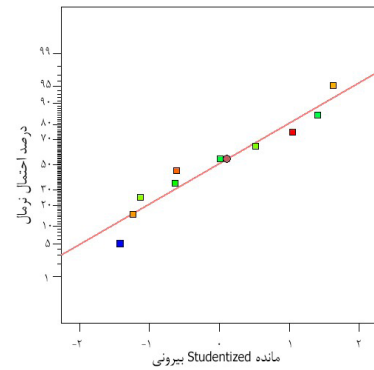
شکل ۱۳: رسم مقادیر حاصل از آنالیز برای نمونه‌های کرومیت در مقابل چگالی برای فراکسیون ۱۹-۱۲/۵ میلی‌متر

Fig. 13. The plotting of the analyte values for chromite samples versus density for fractions +12.5 -19 mm



شکل ۱۴: رسم مقادیر حاصل از آنالیز برای نمونه‌های کرومیت در مقابل چگالی برای فراکسیون ۱۲/۵-۹/۵ میلی‌متر

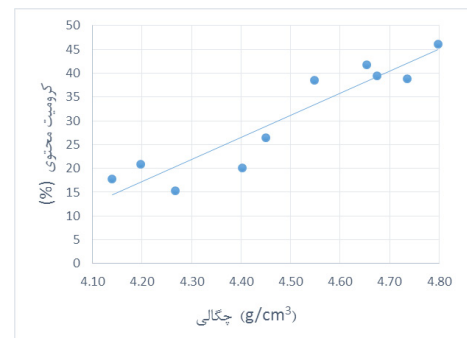
Fig. 14. The plotting of the analyte values for chromite samples versus density for fractions +9.5 -12.5 mm



شکل ۹: نمودار نرمال باقیمانده‌ها برای فراکسیون ۹/۵-۶/۷ میلی‌متر

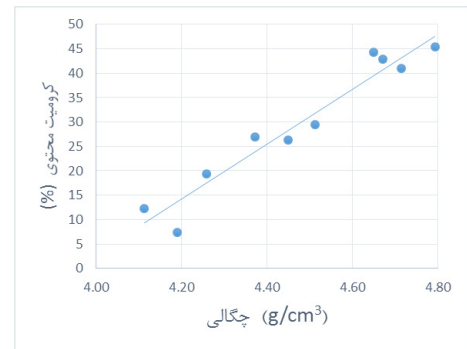
Fig. 9. The normal graph of residuals for fractions +6.7 -9.5 mm

در تمام فراکسیون‌ها داده‌های اسکرن سه بعدی و سنسور لودسل گردآوری شده و چگالی محاسبه گردید و در نهایت مقدار چگالی بدست آمده در مقابل عیار کرومیت در آن قطعه سنگ که از آنالیز بدست آمده بود رسم گردید (شکل‌های ۱۰ تا ۱۵).



شکل ۱۰: رسم مقادیر حاصل از آنالیز برای نمونه‌های کرومیت در مقابل چگالی برای فراکسیون ۵۰-۳۷/۵ میلی‌متر

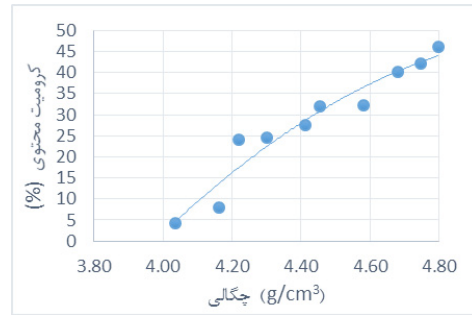
Fig. 10. The plotting of the analyte values for chromite samples versus density for fractions +37.5-50 mm



شکل ۱۱: رسم مقادیر حاصل از آنالیز برای نمونه‌های کرومیت در مقابل چگالی برای فراکسیون ۳۷/۵-۲۶/۵ میلی‌متر

Fig. 11. The plotting of the analyte values for chromite samples versus density for fractions +26.5 -37.5 mm

بدین صورت برای هر فراکسیون از خروجی سنگ شکن مدلی بدست آمده و مطابق آن میزان کرومیت محتوی با استفاده از حجم و وزن نمونه قابل تعیین خواهد بود این معادلات به عنوان معادلات جدایش در دیتا بیس دستگاه ذخیره گردید در این صورت با قرار دادن نمونه جدید به عنوان خوراک دستگاه، سیستم کنترلی با توجه به معادلات ذخیره شده در پایگاه داده‌های دستگاه، نسبت به مکان قرارگیری آن نمونه، با توجه به عیار تقریبی نمونه و مقایسه آن با حداقل عیار کنسانتره و حداکثر عیار باطله، تصمیم‌گیری می‌کند و طبق پایگاه داده‌ای سیستم کنترلی، نمونه را به کنسانتره یا باطله هدایت می‌کند. معادله‌های مربوط به هر فراکسیون و حدود تاثیر آن‌ها در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱۵: رسم مقادیر حاصل از آنالیز برای نمونه‌های کرومیت در مقابل چگالی برای فراکسیون ۹/۵-۶/۷ میلی‌متر

Fig. 15. The plotting of the analyte values for chromite samples versus density for fractions +6.7 -9.5 mm

### جدول ۳: مدل به‌دست‌آمده برای تخمین عیار کرومیت

Table 3. Model for estimating chromite grade

ردیف	حد بالا و پایین وزن	حد بالا و پایین حجم	R <sup>2</sup>	رابطه مدل شده برای تخمین عیار کرومیت
۱	۱۲۱ ≤ m ≤ ۲۸۹	۲۷ ≤ v ≤ ۶۵	۰/۸۷۵۴	Cr (%) = ۴۶/۴۴۷ ρ - ۱۷۷/۸۷
۲	۴۳ ≤ m ≤ ۱۲۱	۹ ≤ v ≤ ۲۷	۰/۹۳۶۳	Cr (%) = ۵۶/۲۵۳ ρ - ۲۲۲/۰۶
۳	۱۵/۸۶ ≤ m ≤ ۴۳	۳/۵۹ ≤ v ≤ ۹	۰/۹۴۱۷	Cr (%) = ۶۳/۴۲۹ ρ - ۲۵۵/۳۹
۴	۴/۵۲ ≤ m ≤ ۱۵/۸۶	۱/۰۲ ≤ v ≤ ۳/۵۹	۰/۹۴۷۸	Cr (%) = ۵۳/۷۵۳ ρ - ۲۱۲/۸
۵	۰/۴۵ ≤ m ≤ ۴/۵۲	۰/۴۵ ≤ v ≤ ۱/۰۲	۰/۹۶۸۷	Cr (%) = -۶۲/۸۷۳ ρ <sup>۲</sup> - ۶۱۹/۲۱ ρ - ۱۴۸۷
۶	۰/۱۶ ≤ m ≤ ۱/۹۸	۰/۱۶ ≤ v ≤ ۰/۴۵	۰/۹۰۳۸	Cr (%) = -۲۷/۹۵۹ ρ <sup>۲</sup> - ۲۹۷/۹۳ ρ - ۷۴۱/۷

مربوط به محدوده‌ی محاسباتی باطله است لذا نقاطی که در ناحیه سمت راست بالا قرار دارند قطعاتی از کنسانتره هستند که به درستی وارد کنسانتره شده‌اند و نقاطی که در ناحیه سمت چپ بالا می‌باشند قطعاتی از کنسانتره هستند که اشتباه وارد باطله شده‌اند. نقاطی که در ناحیه سمت چپ پایین می‌باشند قطعاتی از باطله هستند که به درستی وارد باطله شده‌اند و نقاطی که در ناحیه سمت راست پایین می‌باشند قطعاتی از باطله هستند که اشتباه وارد کنسانتره شده‌اند. از سوی دیگر نقاطی که روی خط  $y=x$  قرار گرفته‌اند دارای عیار محاسباتی و آنالیز شده یکسان هستند و هر چقدر نقاط روی شکل به این خط نزدیک‌تر باشند نشانگر صحت بالای عملکرد دستگاه می‌باشند. در فراکسیون اول تمام قطعات بدرستی تقسیم شده و دارای صحت بسیار بالایی می‌باشند. در فراکسیون دوم و سوم نیز تمام قطعات درست تقسیم شده ولی به لحاظ صحت نسبت به فراکسیون اول از صحت کمتری برخوردارند. در فراکسیون چهارم یک قطعه اشتباه به کنسانتره راه یافته و در فراکسیون پنجم در مجموع سه قطعه به صورت نادرست تقسیم شده که یک مورد به صورت اشتباه به کنسانتره و دو مورد به باطله راه یافته‌اند. در فراکسیون ششم نیز در مجموع سه قطعه به صورت نادرست تقسیم شده

برای اعتبار سنجی مدل از هر فراکسیون تعداد ۱۰ نمونه انتخاب یک بار توسط دستگاه عیار سنجی و تقسیم شد و بار دیگر با استفاده از آنالیز دستگاهی تعیین عیار گردید و نتایج آن در شکل‌های ۱۶ تا ۲۱ آمده است. برای تقسیم نمونه‌ها به دو قسمت باطله و کنسانتره عیار ۲۰ به عنوان پیش فرض در حافظه دستگاه ذخیره گردید. در این صورت قطعات دارای عیار ۲۰ و بالاتر توسط نوار نقاله دوم به بخش کنسانتره و کمتر از ۲۰ به بخش باطله هدایت خواهند شد.

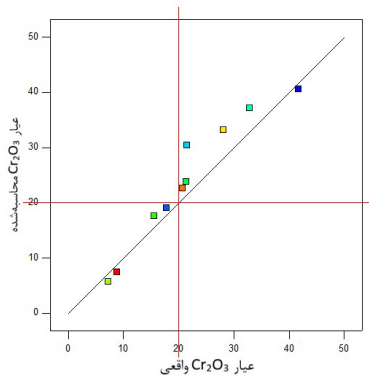
نتایج آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۶ تا ۲۱ آمده است محور افقی عیار کرومیت در نمونه که توسط آنالیز دستگاهی بدست آمده مشخص شده است و در محور عمودی عیاری که با توجه به حجم بدست آمده توسط اسکنر سه بعدی و وزن قطعه سنگ که توسط سنسور لودسل ثبت شده، تعیین شده است. حد جدایش در این نمودارها با خط قرمز رنگ مشخص شده و این خطوط افقی و عمودی نمودار را به ۴ قسمت تقسیم نموده است. خط قرمز افقی ناحیه را به دو قسمت کنسانتره و باطله تقسیم می‌کند که قسمت بالا کنسانتره و قسمت پایین باطله است. خط قائم نیز ناحیه را به دو محدوده تقسیم می‌کند که سمت راست محدوده محاسباتی کنسانتره و سمت چپ

که تمام آن‌ها به صورت اشتباه به کنسائتره راه پیدا کرده‌اند. آنالیز واریانس مطابق جدول ۴ برای تحلیل و مقایسه آورده شده است.

جدول ۴: جدول آنالیز واریانس

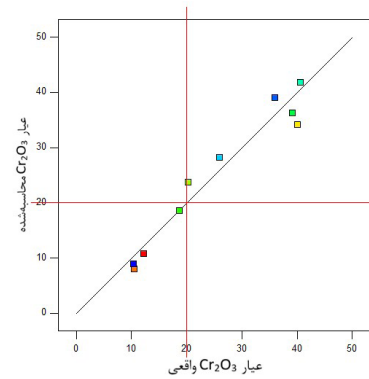
Table 4. Analysis of Variance Table

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p Value
Model	۱۹۹۴/۶۳	۲	۹۹۷/۳۱	۴۳/۵۱	۰/۰۰۰۱
Mass	۸/۲۳	۱	۸/۲۳	۰/۳۶	۰/۵۶۷۸
Volume	۱۶/۲۹	۱	۱۶/۲۹	۰/۷۱	۰/۴۲۷۱
Residual	۱۶۰/۴۵	۷	۲۲/۹۲	-	-
Cor Total	۲۱۵۵/۰۷	۹	-	-	-



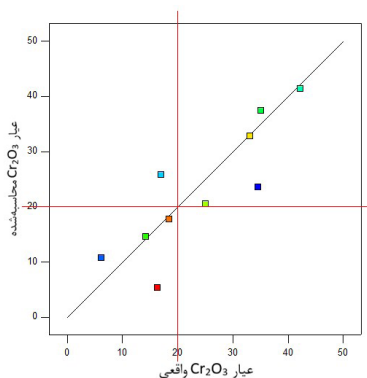
شکل ۱۷: عملکرد دستگاه بر روی نمونه‌های فراکسیون دوم

Fig. 17. Function of the device on the 2ed fraction samples



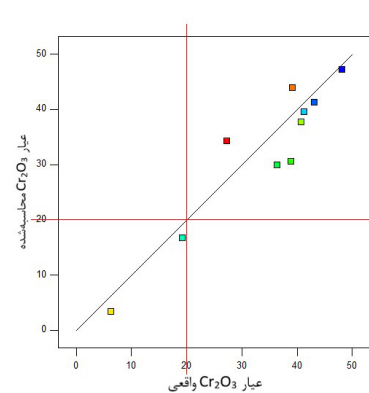
شکل ۱۶: عملکرد دستگاه بر روی نمونه‌های فراکسیون اول

Fig. 16. Function of the device on the 1st fraction samples



شکل ۱۹: عملکرد دستگاه بر روی نمونه‌های فراکسیون چهارم

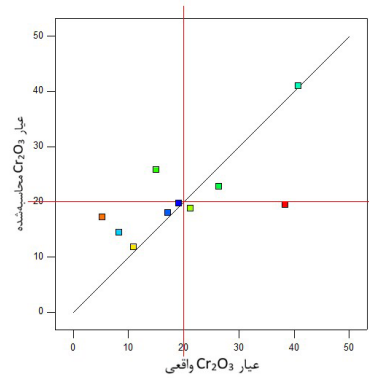
Fig. 19. Function of the device on the 4th fraction samples



شکل ۱۸: عملکرد دستگاه بر روی نمونه‌های فراکسیون سوم

Fig. 18. Function of the device on the 3th fraction samples

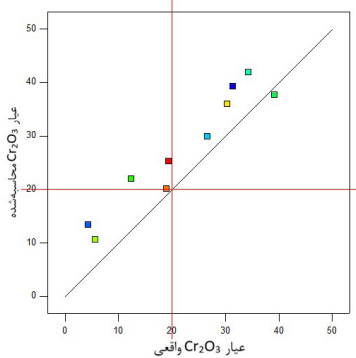
برای بررسی تاثیر دو پارامتر وزن و حجم از شکل ۲۲ استفاده شد. همانگونه که در این شکل مشخص است بخشی از مواد به باطله راه یافته و بخشی به قسمت کنسانتره راه یافته‌اند. در قسمت راه یافته به کنسانتره عامل جرم یک پارامتر با تاثیر مثبت و عامل حجم یک پارامتر با تاثیر منفی می‌باشد.



شکل ۲۰: عملکرد دستگاه بر روی نمونه‌های فراقسیون پنجم

Fig. 20. Function of the device on the 5th fraction samples

در نهایت برای بررسی کارایی جدایش هر فراقسیون از رابطه ۲ استفاده شد.



شکل ۲۱: عملکرد دستگاه بر روی نمونه‌های فراقسیون ششم

Fig. 21. Function of the device on the 6th fraction samples

$$SE = \frac{C.m.(c-f)}{F.f.(m-f)} \quad (2)$$

که در آن:

SE: کارایی جدایش

F: وزن خوراک بر حسب g

C: وزن کنسانتره بر حسب g

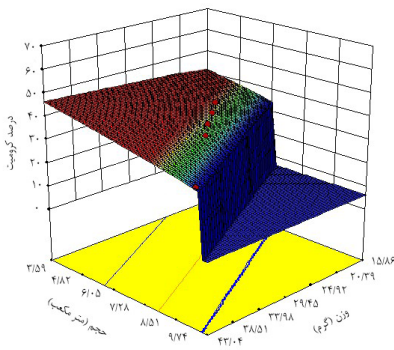
f: عیار خوراک بر حسب %

c: عیار کنسانتره بر حسب %

m: حداکثر عیار ممکن یک عنصر در کانی بر حسب %

با استفاده از فرمول فوق قابلیت جدایش برای تمام فراقسیون‌ها محاسبه

گردید که نتایج آن به شرح جدول زیر است.



شکل ۲۲: تاثیر دو پارامتر وزن و حجم بر جدایش کرومیت

Fig. 22. The effect of two parameters of weight and volume on chromite separation

جدول ۵: قابلیت جدایش فراقسیون‌ها

Table 5. Fractions Separation Ability

فراقسیون	عیار کنسانتره (%)	بازیابی (%)	کارایی جدایش
اول	۳۳/۱۱	۸۳/۹۲	۴۰/۳۶
دوم	۳۱/۱۵	۸۴/۰۲	۳۸/۲۱
سوم	۳۷/۴۵	۹۴/۳۷	۳۶/۳۹
چهارم	۲۷/۸۲	۷۹/۸۸	۳۴/۲۷
پنجم	۳۰/۸۸	۵۸/۳۳	۳۰/۵۷
ششم	۳۱/۲۵	۹۳/۲۹	۲۳/۸۲

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج حاصل از آنالیزها مدل جدایش برای هر یک از فراقسیون‌ها تعیین گردید و در نهایت بر مبنای استفاده از مدل بدست آمده تست‌هایی با چگالی‌های مختلف در هر محدوده‌ی ابعادی انجام شد و طبق نتایج بدست آمده در مورد دقت و صحت مدل تصمیم‌گیری شد. در نهایت برای انتخاب بهترین فراقسیون از کارایی جدایش هر فراقسیون استفاده شد. رابطه مستقیم میان کارایی جدایش و ابعاد قطعات سنگ وجود دارد به نحوی که هرچقدر ابعاد افزایش می‌یابند کارایی جدایش بیشتر می‌شود از طرفی استفاده از وسایل مکانیکی برای هدایت سنگ‌ها موجب کاهش



- [4] Wills, B., Napier-Munn, T., 2006. Mineral Processing Technology, Elsevier Science & Technology Books.
- [5] Rezaii. Bahram, 2015. Precoasting and physical processing in mineral processing, Amir Kabir University of Technology Publication. [In Persian]
- [6] JM Bergmann, 2011. Industrial Minerals (London), 2011 - Metal Bulletin Journals Ltd, 4(2011) 11-14.
- [7] Marinus Dalm. 2014. Application of near-infrared spectroscopy to sensor based sorting of a porphyry copper ore, Minerals Engineering. 58(2014) 7-16.
- [8] Joseph Lessard, 2015. Bridging the gap: Understanding the economic impact of ore sorting on a mineral processing circuit, Minerals Engineering, 65(2015).
- [9] G.R. Ballantyne, 2014. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores, Minerals Engineering. 65(2014) 109-114.
- [10] Steinert US, 2015. Sensor sorting: what's the real value of sensor-based sorting?"<<http://www.steinertglobal.com/us/en/products/sensor-sorting/steinert-xss-xray-sorting-system/>>(accessed 05.03.15), 88-97.
- کارایی دستگاه برای سنگ‌های با ابعاد کوچک می‌شود درحالی که استفاده از نوار نقاله دوم موجب بهبود عملکرد در قطعات سنگ کوچک‌تر نیز می‌شود. بهره‌گیری از این تکنیک در کنار سایر روش‌های سنگ‌جوری مانند پردازش تصویر و استفاده از امواج مادون قرمز که اکثراً سطح سنگ را ملاک جدایش قرار می‌دهند می‌تواند بسیار مفید باشد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که کرومیت منطقه سبزوار با عیار ۲۶/۱۶ درصد و کانی‌های مزاحم همراه پس از ورود به دستگاه سنگ‌جوری طراحی‌شده، کنسانتره اولیه‌ای معادل کرومیت ۳۳/۱۱ درصد و بازیابی ۸۳/۹۲ درصد تولید می‌کند.

#### مراجع

- [1] Joseph, Lessard., 2014. Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics, Minerals Engineering, 65(2014) 88-97.
- [2] Bond, F.C., 1961. Crushing and Grinding Calculations, Allis-Chalmers Manufacturing Company, (1961) 16.
- [3] de Bakker, J., 2014. Energy use of fine grinding in mineral processing, Metall. Mater. Trans. E 1E, (2014) 8-19.

Please cite this article using:

M.Ghorbani, B. Rezai, The study of Sabzevar chromite preconcentration with advanced ore sorting techniques, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(5) (2018) 877-886.  
DOI: 10.22060/ceej.2017.12738.5261

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



