

(یادداشت فنی)

## استفاده از آزمایش سیلندر و پیستون برای پیش‌بینی تاثیر ایجاد بار در گردش محصول لبه بر روی عملکرد آسیاهای غلتکی فشار بالا

رضا کازرانی نژاد<sup>۱\*</sup>، عباس سام<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: دی ۱۳۹۴، پذیرش: خرداد ۱۳۹۵)

### چکیده

مکانیزم غالب شکست در آسیاهای غلتکی فشار بالا (HPGR)، شکست فشارشی است. جهت تحقیقات پایه و کاربردی شکست فشارشی، آزمایش‌های ساده، سریع الانجام و دانش بنیان مورد نیاز است. بنابراین برای اولین بار در ایران با طراحی جدید و ساخت سیلندر و پیستون و همچنین پانچی برای جداسازی محصول مرکزی و محصول لبه، آزمایش‌های شکست فشارشی با فشار ۱۷۳۰ بار با استفاده از پرس هیدرولیکی قابل کنترل، بر روی خوراک خط چهارم این مجتمع انجام شد. محصول لبه با خوراک تازه با نسبت بار در گردش ۰/۸ با هم ترکیب شدند و در سیلندر با همان فشار، مجدداً مورد خردایش قرار گرفتند. در این حالت محصول نهایی با استفاده از بار در گردش به میزان ۲۵٪ کاهش یافت. بررسی ذرات کیک محصول آزمایش سیلندر و پیستون با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داد که تعداد کمی از آنها دارای ترک سطحی هستند. بنابراین، ایجاد بار در گردش محصول لبه، احتمال شکست یا ایجاد ترک را برای ذرات افزایش خواهد داد. با توجه به این نتیجه، فلوشیت پیشنهادی برای ایجاد بار در گردش در مقیاس صنعتی ارایه شد. همچنین جهت محاسبه انرژی مصرفی ویژه از گراف نیرو-جابجایی که از داده‌های آزمایش سیلندر و پیستون به دست آمد؛ استفاده شد. در واقع انرژی جذب شده در طی فشارش، تابعی از فشار اعمال شده بر پیستون است و از مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی، به دست می‌آید. این مساحت با استفاده از روش محاسبات عددی به نام فرمول ذوزنقه (trapezoid formula) محاسبه شد.

### کلید واژه‌ها

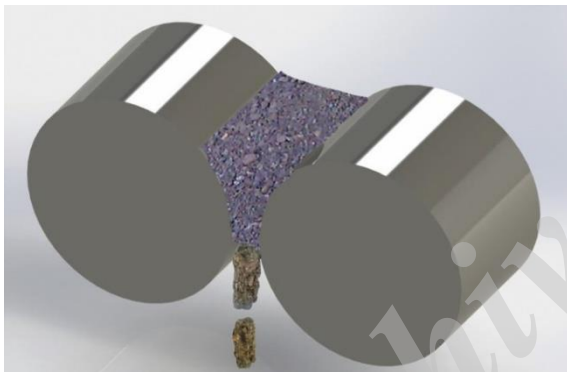
آسیای غلتکی فشار بالا، HPGR، بار در گردش، آزمایش سیلندر و پیستون (سیلندر و پیستون)، ریزترک

ارجاع به این مقاله:

کازرانی نژاد، ر.، سام، ع.، (۱۳۹۵)، استفاده از آزمایش سیلندر و پیستون برای پیش‌بینی تاثیر ایجاد بار در گردش محصول لبه بر روی عملکرد آسیاهای غلتکی فشار بالا، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۱)، ۶۵-۷۵.

## ۱- مقدمه

۱۴۰۰ کیلو وات و ظرفیت اسمی آن ۵۲۰ تن بر ساعت و با احتساب رطوبت خوراک، ۵۵۰ تن بر ساعت است. بنابراین به نظر رسید با ایجاد بار در گردش، علاوه بر استفاده از ظرفیت موثر *HPGR* برای افزایش کارایی مدار خردایش، بتوان محصول ریزتر و یکنواخت‌تری تولید نمود. ضمن اینکه مطالعات میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی<sup>۴</sup> نشان داد که تمام ذرات محصول در فرآیند شکست فشارشی دارای ریزترک نیست. در نتیجه با برگشت دادن بخشی از محصول به خوراک، فرصت مجدد دیگری به ذرات داده می‌شود که یا شکسته شوند یا ترک‌هایی در آنها ایجاد شود. البته از کان<sup>۵</sup> و همکاران نیز نشان داده‌اند که با ایجاد بار در گردش در *HPGR* نسبت خردایش و همچنین ضخامت و فشردگی کیک افزایش می‌یابد [۴] که این افزایش و فشردگی کیک، باعث افزایش ظرفیت دستگاه نیز می‌شود.

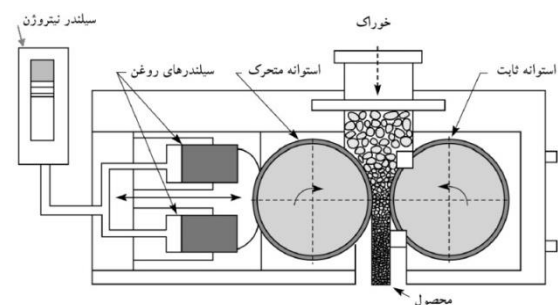
شکل ۲: نحوه عملکرد *HPGR*

اساساً در مورد چیدمان فلوشیت *HPGR*، سه حالت را می‌توان متصور شد [۵]:

- سنگ شکنی مدار باز یا مرحله پیش نرم‌کنی (*pre-grinding*) مانند مدار فعلی خط چهارم
- عملیات مدار بسته با طبقه‌بندی
- عملیات مدار بسته با برگشت بخشی از محصول (مثلاً محصول لبه)

در مورد عملیات مدار بسته با طبقه‌بندی، باید متذکر شد که سرنده‌کنی خشک می‌تواند تا اندازه روزنه سرنده پنج میلی‌متر انجام شود و برای حد جدایش کوچکتر باید از سرنده‌کنی تر استفاده شود. علاوه بر این‌ها، طبقه‌بندی می‌تواند با هیدروسیکلون یا کلاسیفایر هوایی انجام گیرد، ولی در هر حال باعث پیچیدگی بیشتر مدار، مخصوصاً زمانی که با کیک سخت وجود داشته باشد؛ می‌شود. در

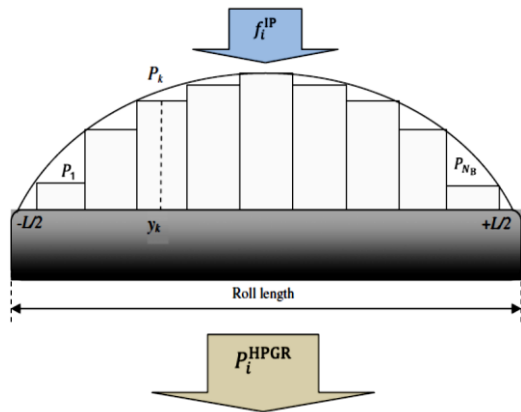
امروزه فلوشیت‌های مدار خردایش که از آسیاهای خودشکن و نیمه خودشکن استفاده می‌کنند، مراحل فرآیندی کمتری نیاز دارند که همین امر باعث کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی آنها شده است. اما شرط اصلی برای استفاده از خردایش خودشکن، وجود قطعات بزرگ کانسنگ است که نقش بار خرد کننده را ایفا می‌کنند. به طور تقریبی یک چهارم کانه باید دارای ابعاد ۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر باشد و به عنوان بار خرد کننده وارد آسیا شود. شرط دیگر این است که ذرات کوچکتر نباید به اندازه ذرات درشت‌تر، سخت باشند و در واقع سهولت خرد شدن ذرات ریز، ترجیح داده می‌شود [۱]. در نتیجه، در مواردی که این شرایط تامین نیست مانند خط چهارم تولید کنسانتره شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، از عملیات مرسوم خردایش مواد معدنی به اضافه آسیای غلتکی فشار بالا<sup>۱</sup> یا به اختصار *HPGR* استفاده شده است. شکل ۱ شمای کلی این دستگاه را نشان می‌دهد. در این دستگاه بر خلاف سنگ‌شکن‌های رایج، معمولاً ذرات خوراک ورودی کوچکتر از فاصله عملیاتی<sup>۲</sup> بین غلتک‌ها است (شکل ۲) و فاصله عملیاتی ثابت نیست. این فاصله عملیاتی به نوع کانه و شرایط تنظیم دستگاه بستگی دارد. در واقع در *HPGR* کاهش اندازه در یک بستر فشرده از ذرات اتفاق می‌افتد [۲]. بنابراین حتی ممکن است بزرگترین ذره<sup>۳</sup> محصول با بزرگترین ذره خوراک یکسان باشد.



شکل ۱: مقطع آسیای غلتکی فشار بالا شامل سیستم هیدرولیک [۳]

با مطالعه آماری داده‌های تابستان ۹۲ مربوط به خط چهارم، میانگین باردهی خوراک به *HPGR*، ۳۵۰ تن بر ساعت و میانگین توان مصرفی مجموع موتورهای آن ۳۰۴ کیلو وات به دست آمد. در حالی که توان موتورهای *HPGR*

همچنین همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، نیروی بیشتری به قسمت مرکزی غلتک‌های HPGR وارد می‌شود [۶]. بنابراین با توجه به مجموع دلایل گفته شده، محصولات لبه در HPGR قاعدتاً، درشت‌تر از محصول مرکزی هستند. بنابراین به نظر می‌رسد ساده‌ترین و منطقی‌ترین روش برای رفع این مشکل در خط چهارم تولید کنسانتره مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر، ایجاد بار در گردش به وسیله بازگرداندن محصول لبه HPGR به خوراک آن باشد.



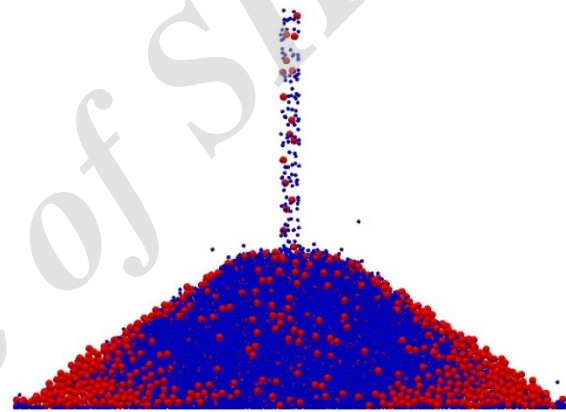
شکل ۵: نحوه توزیع نیرو در طول غلتک‌های HPGR [۶]

بدین منظور برای اولین بار، امکان‌سنجی ایجاد بار در گردش محصول لبه با استفاده از آزمایش سیلندر و پیستون<sup>۷</sup> به عنوان یک روش خلاقانه مد نظر قرار گرفت. البته این آزمایش قبلاً توسط کالالا<sup>۸</sup> و همکاران برای پیش‌بینی مصرف انرژی و توزیع اندازه ذرات محصول به کار گرفته شده است. آنها ادعا کرده‌اند که عملکرد HPGR آزمایشگاهی را می‌توان با آزمایش سیلندر و پیستون شبیه‌سازی کرد [۷]. جهت آشنایی بیشتر، در قسمت روش کار، تجهیزات مورد نیاز این آزمایش و نحوه انجام آن آمده است.

همانطور که ذکر شد، مهم‌ترین وجه تمایز HPGR با دیگر ماشین‌های خردایش، بهره‌گیری از عملکرد شکست بین ذره‌ای<sup>۹</sup> است که در بستر فشرده‌ای از مواد حاصل می‌شود. این بستر فشرده ناحیه فشرده‌گی یا تراکم نامیده می‌شود که از دهانه بحرانی تا دهانه عملیاتی ماشین ادامه دارد (شکل ۲). انتقال نیروی اعمالی به ذره خرد شونده، توسط ذرات احاطه‌کننده آن صورت می‌گیرد. با توجه به این حقیقت، می‌توان در آزمایشگاه این نوع شکست را با استفاده از پرس هیدرولیکی، سیلندر و پیستون شبیه‌سازی

ضمن هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی مدار بسته با طبقه‌بندی در مقایسه با مدار فاقد طبقه‌بندی، خیلی بیشتر است. بنابراین برای ایجاد بار در گردش برای خط چهارم، گزینه سوم چیدمان فلوشیت، یعنی ایجاد مدار بسته با برگشت بخشی از محصول، بدون طبقه‌بندی، پیشنهاد می‌شود.

خوراک HPGR از قیف خوراک‌دهی تعبیه شده در بالای آن تامین می‌شود. وقتی مواد به داخل این قیف ریخته می‌شود، پدیده جدانشینی (segregation) ذرات بزرگتر از ذرات کوچکتر اتفاق می‌افتد. در نتیجه ذرات درشت، بیشتر در دو طرف قیف یا بالای دو لبه غلتک HPGR قرار می‌گیرند (شکل ۳).



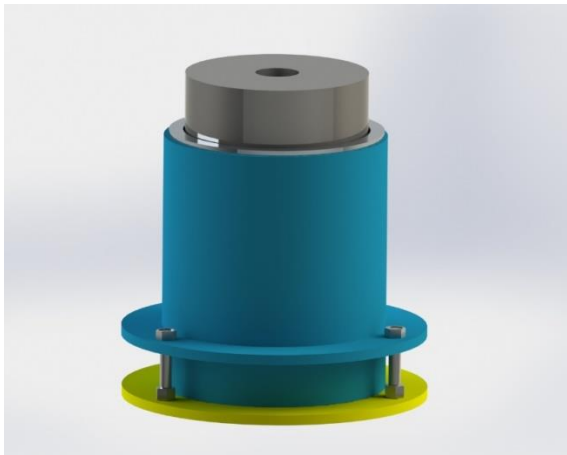
شکل ۳: جدانشینی ذرات درشت از ذرات کوچکتر در قیفی با خروجی شکافی<sup>۱۰</sup>

همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، بخشی از مواد خوراک HPGR در طی عملیات، در دو لبه انتهایی غلتک‌ها میانبر می‌زنند و بدون خردایش وارد قیف محصول HPGR می‌شوند. بدیهی است این محصول لبه، درشت‌تر از محصول مرکزی است.



شکل ۴: میانبرزدن خوراک در لبه‌های غلتک‌های HPGR

۱۲۰ درجه در محیط قاعده تعبیه شده‌اند، قابل جدا شدن است. لذا بعد از انجام آزمایش، وقتی که قاعده سیلندر باز شود، می‌توان کیک را از سیلندر خارج کرد (شکل ۱۰).



شکل ۸: طرح جدید ساخت سیلندر و پیستون برای انجام آزمایش



شکل ۹: ایجاد پخ با زاویه ۳۰ درجه و با عمق نیم سانتیمتر در قاعده پیستون

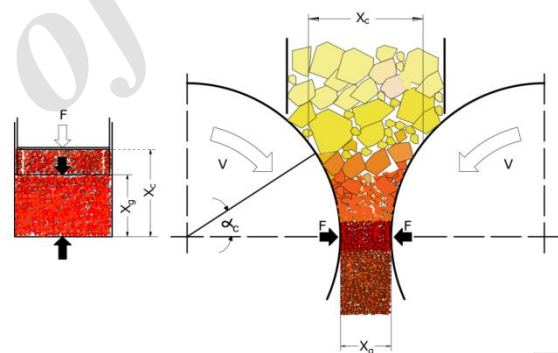


شکل ۱۰: کیک خروجی از سیلندر بعد از انجام آزمایش سیلندر و پیستون

کرد (آزمایش سیلندر و پیستون) (شکل ۶ شکل). حتی با این دستگاه مطابق آنچه در شکل ۷ دیده می‌شود، می‌توان ضخامت مواد را طبق مقیاس صنعتی در آزمایش بررسی شکست فشارشی مورد مطالعه قرار داد. داوانیام<sup>۱</sup> و همکاران نیز برای تعیین انرژی بهینه مصرفی در HPGR از سیلندر و پیستون استفاده کرده‌اند [۸].



شکل ۶: عملکرد خردایش در ناحیه فشرده‌گی HPGR



شکل ۷: تشابه فرآیند شکست در آزمایش سیلندر و پیستون و مقیاس صنعتی

## ۲- روش کار

جهت انجام آزمایش، سیلندر و پیستون به ترتیب به قطرهای ۱۰۰ و ۹۰ میلیمتر در مجتمع گل‌گهر ساخته شد (شکل ۸ و شکل ۹). انتخاب قطر کمتر پیستون نسبت به سیلندر به دو دلیل بود. یکی اینکه پیستون به راحتی در داخل سیلندر حرکت داشته باشد و به تله افتادن هوا مانع از حرکت آزادانه پیستون نشود. دوم اینکه اثر لبه در HPGR مقیاس صنعتی شبیه‌سازی شود. البته برای این منظور، پخ ۳۰ درجه‌ای نیز با عمق نیم سانتی‌متر در قاعده پیستون ایجاد شد (شکل ۹). در این طرح جدید، کف سیلندر از بدنه آن توسط سه عدد پیچ که با فواصل مساوی

یک حاصله به دست آید. مشخص گردید که با استفاده از سیلندر ۱۰۰ میلی‌متری و با خوراکی به وزن ۸۵۰ گرم می‌توان به کیکی با ضخامت در حدود ۳۰ میلی‌متر یعنی معادل ضخامت کیک در مقیاس صنعتی، دست یافت. لذا جهت بررسی تاثیر فشار در خریدایش فشارشی، تمامی آزمایش‌ها با نمونه‌های ۸۵۰ گرمی انجام شد.



شکل ۱۲: صفحه نمایش دستگاه پرس هیدرولیکی

جهت محاسبه انرژی مصرفی ویژه از گراف نیرو-جابجایی که از داده‌های آزمایش به دست می‌آید؛ استفاده شد (شکل ۱۳). در واقع انرژی جذب شده در طی فشارش، تابعی از فشار اعمال شده بر پیستون است و از مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی به دست می‌آید. این مساحت با استفاده از روش محاسبات عددی به نام فرمول دوزنقه<sup>۱۳</sup> محاسبه شد [۹]. حال اگر این انرژی جذب شده بر وزن مواد مورد آزمایش تقسیم شود، انرژی مصرفی ویژه به دست می‌آید. توزیع ابعادی مواد فشرده شده نیز با آزمایش تجزیه سرندي حاصل می‌شود.

یکی از مشکلاتی که در ارزیابی تفاوت محصول لبه و محصول مرکزی وجود داشت، جدا نمودن این دو محصول از یکدیگر بود. برای حل این مساله، پانچی با قطر داخلی ۸۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شد که به وسیله آن کیک محصول آزمایش سیلندر و پیستون، حاصل از نیروی ۱۱۰۰ کیلو نیوتن، به دو قسمت محصول لبه و محصول مرکزی از هم جدا شد (شکل ۱۴). در این آزمایش از خوراک ۱۲- میلی‌متر استفاده شده است. هر یک از این محصولات، مورد آزمایش تجزیه سرندي قرار گرفتند. با چندین بار تکرار این آزمایش، مقدار لازم از محصولات لبه برای ایجاد بار در گردش ۸۰٪ فراهم شد. ۳۷۵ گرم از محصول لبه با ۴۷۵

جهت اعمال فشار از دستگاه پرس هیدرولیکی موجود در آزمایشگاه مکانیک سنگ شرکت صنعتی و معدنی گل گهر استفاده شد (شکل ۱۱). این دستگاه که ساخت شرکت *CONTROLS* ایتالیا است، دارای ظرفیت بارگذاری سه مگانیوتن است که دامنه آزمایش‌های لازم در مورد *HPGR* را پوشش می‌دهد.



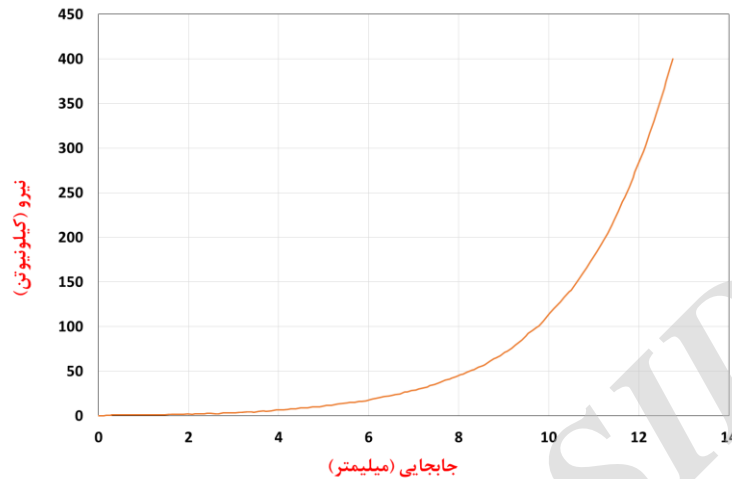
شکل ۱۱: پرس هیدرولیکی و ابزار اندازه‌گیری تغییر ارتفاع پیستون در آزمایشگاه مکانیک سنگ شرکت گل گهر

در هر لحظه میزان نیرو، فشار و نرخ بارگذاری بر روی صفحه نمایش دستگاه پرس هیدرولیکی، نشان داده می‌شود (شکل ۱۲). تغییر سرعت بارگذاری، از مزیت‌های این دستگاه است. این دستگاه پرس هیدرولیکی که در اصل برای اندازه‌گیری مشخصات تنش-کرنش نمونه سنگ است، دارای هشت کانال مجزا است. در ترکیب استاندارد، شش کانال برای اندازه‌گیری کرنش با نمایشگرهای الکتریکی کرنش و دو کانال برای اندازه‌گیری بار/فشار با تراگذرها<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود. در این تحقیق از دو کانال جابجایی و نیرو استفاده شد که کانال جابجایی متصل به حسگری است که میزان جابجایی دو فک بالا و پایین پرس هیدرولیکی یا در واقع میزان فشردگی بستر مواد داخل سیلندر را نشان می‌دهد. این حسگر در شکل ۱۱ شکل نشان داده شده است. همچنین داده‌های آزمایش توسط سیستم درخواست کننده اطلاعات<sup>۱۲</sup> نسبت به واحد زمان در یک پرونده متنی ذخیره می‌شوند. واحد زمان نیز قابل تنظیم است که در آزمایش‌ها روی یک ثانیه تنظیم شد. در واقع به ازای هر دقیقه از آزمایش، ۶۰ داده نیرو جابجایی ثبت می‌شود.

برای اینکه شرایط آزمایش با شرایط صنعت، مشابهت هر چه بیشتر داشته باشد، چند تست با فشار متوسط بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد، تا تخمینی از ضخامت

پیستون با نیروی ۱۱۰۰ کیلو نیوتن انجام شد و محصول آن مورد تجزیه سرنندی قرار گرفت.

گرم از خوراک تازه مخلوط شد تا ۸۵۰ گرم نمونه لازم برای آزمایش سیلندر و پیستون فراهم شود. این مواد داخل سیلندر ریخته شد و مجدداً بر روی آن آزمایش سیلندر و



شکل ۱۳: منحنی نیرو-جابجایی با نیروی حداکثر ۴۰۰ کیلو نیوتن

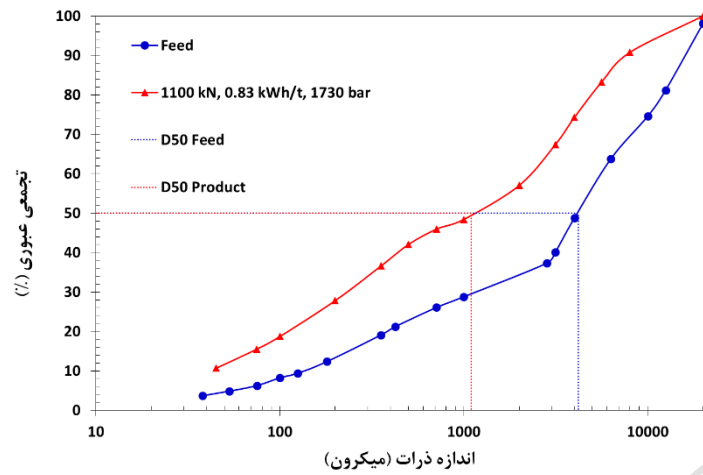


شکل ۱۴: تفکیک محصول مرکزی و محصول لبه با استفاده از پانچ ۸۰ میلی متری

تبدیل شده است. انرژی مصرفی ۳۱۷۳ ژول و انرژی مصرفی ویژه ۱/۰۲ کیلو وات ساعت بر تن است. نتایج آزمایش تجزیه سرنندی بر روی محصول مرکزی و محصول لبه آزمایش سیلندر و پیستون در شکل ۱۸ شکل ملاحظه می‌شود. همانطور که پیش‌بینی می‌شد، محصول لبه درشت‌تر از کل محصول آزمایش است.

### ۳- ارایه یافته‌ها و تحلیل نتایج

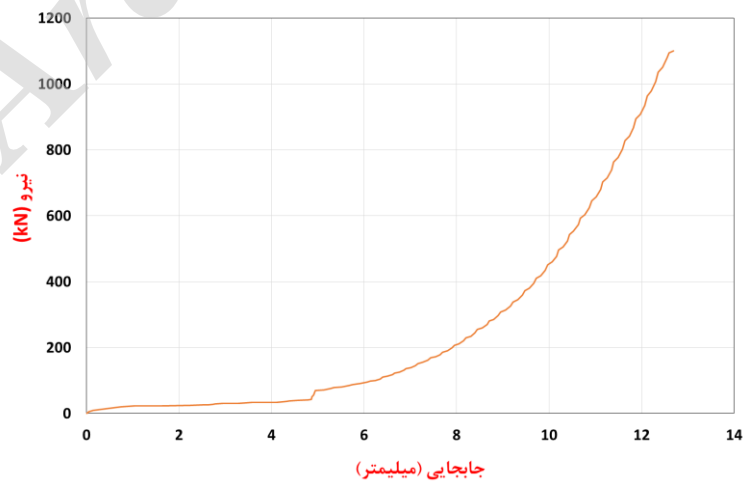
در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نتایج برای نیروی ۱۱۰۰ کیلو نیوتن یا فشار معادل ۱۷۳۰ بار آمده است. در این فشار ۴۲۰۰ میکرون در خوراک به ۱۱۰۰ میکرون در محصول کاهش یافته است و در نتیجه نسبت خردایش ۳/۸ را نتیجه داده‌است. تقریباً تمام محصول به کیک فشرده



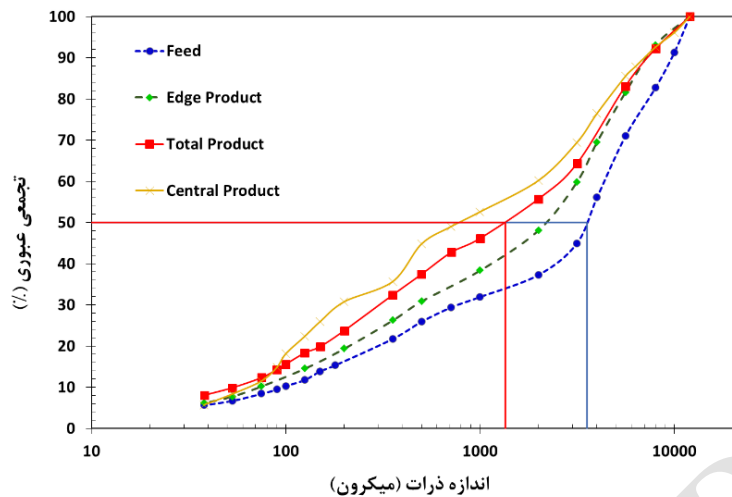
شکل ۱۵: دانه‌بندی خوراک و محصول آزمایش سیلندر و پیستون در نیروی  $1100\text{ kN}$



شکل ۱۶: کیک حاصل از آزمایش سیلندر و پیستون در نیروی  $1100\text{ kN}$



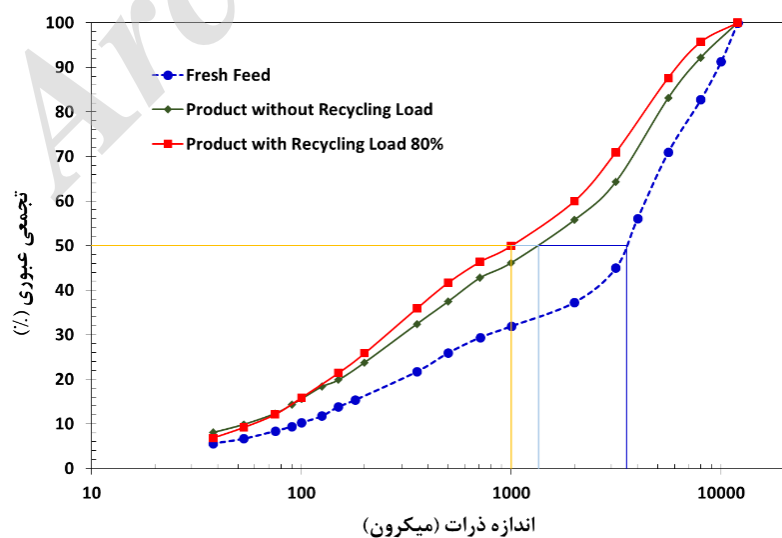
شکل ۱۷: نمودار نیرو-جابجایی برای آزمایش سیلندر و پیستون در نیروی  $1100\text{ kN}$



شکل ۱۸: تفاوت دانه‌بندی محصول مرکزی و محصول لبه آزمایش سیلندر و پیستون

نتیجه آن در شکل ۱۹ دیده می‌شود. البته مواد به کار گرفته شده برای ایجاد بار در گردش، از جمع‌آوری محصولات لبه چندین آزمایش ساده سیلندر و پیستون که بر روی خوراک تازه انجام شدند، استفاده شد. خوراک این آزمایش‌های تکراری، کاملاً مشابه بودند. در آزمایش سیلندر و پیستون بدون بار در گردش،  $D_{50}$  از ۳۵۵۰ میکرون در خوراک به ۱۳۵۰ میکرون در محصول می‌رسد در حالی که در حالت بار در گردش محصول لبه معادل ۰.۸٪،  $D_{50}$  محصول ۳۵۰ میکرون کاهش یافته و به ۱۰۰۰ میکرون می‌رسد. در نتیجه به نظر می‌رسد ایجاد بار در گردش محصول لبه در مدار  $HPGR$  خط چهارم تولید کنسانتره مفید باشد (شکل ۲۰).

در خط چهارم به دلیل مشکلات پایین دست مدار مثل محدودیت ظرفیت جداکننده‌های مغناطیسی شدت متوسط<sup>۱۴</sup>، خرابی فیلترهای نواری یا قفل شدن پاروهای تیکنر باطله، خوراک‌دهی با نرخ پایین‌تر از ظرفیت اسمی صورت می‌گیرد. همانطور که در مقدمه نیز ذکر شد، با توجه به اطلاعات تابستان ۹۲ به طور متوسط تنها ۳۵۰ تن بر ساعت از ظرفیت ۵۵۰ تنی  $HPGR$  استفاده شده است و موتورهای  $HPGR$  با کمتر از ۲۲ درصد از توان خود کار کرده‌اند. بنابراین با توجه به نتیجه تجزیه سرنندی بالا، برای امکان‌سنجی راه‌اندازی بار در گردش در  $HPGR$  صنعتی، با ایجاد بار در گردش معادل ۰.۸٪ از محصول لبه، آزمایش سیلندر و پیستون در نیروی ۱۱۰۰ کیلو نیوتن تکرار شد که

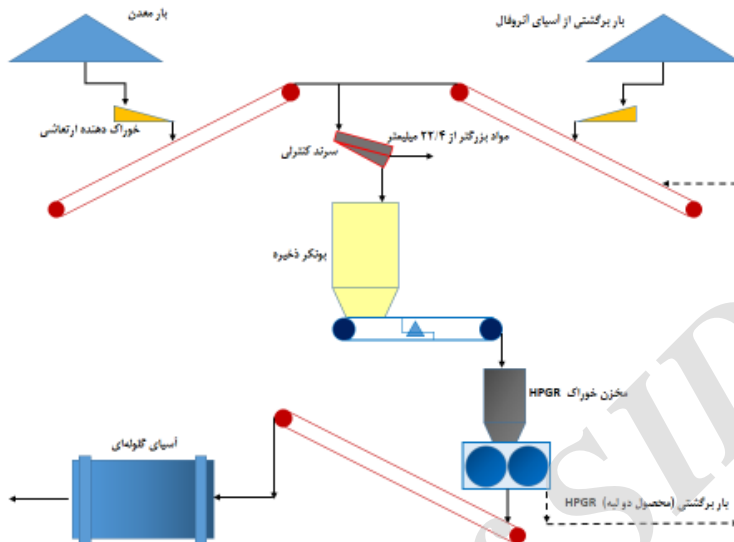


شکل ۱۹: نتایج آزمایش سیلندر و پیستون در بار در گردش ۰.۸٪



تنظیم هستند، استفاده نمود. با استفاده از این روش می‌توان میزان بار در گردش را تنظیم کرد. در شکل ۲۱ این روش نشان داده شده است.

در عمل برای جدا نمودن محصول لبه از محصول مرکزی برای ارسال به خوراک HPGR به عنوان بار در گردش، می‌توان از دو صفحه<sup>۱۵</sup> که از لحاظ مکانی قابل



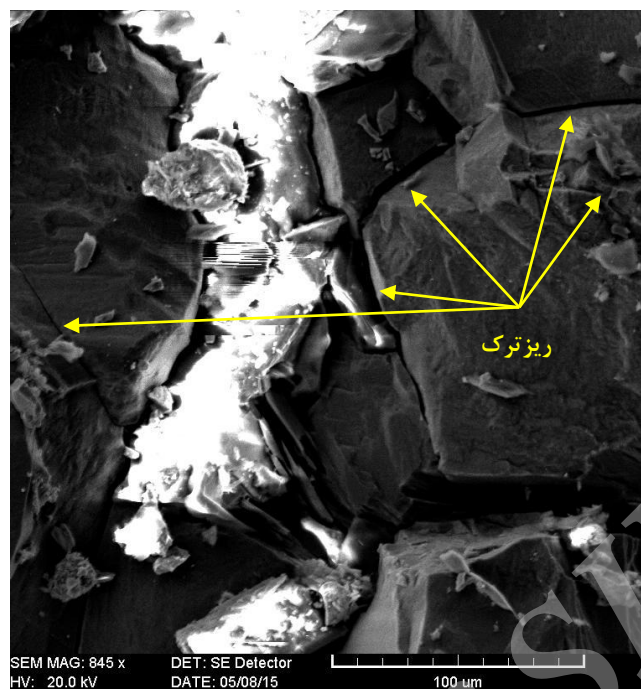
شکل ۲۰: فلوشیت پیشنهادی برای ایجاد بار در گردش در خط چهارم تولید کنسانتره



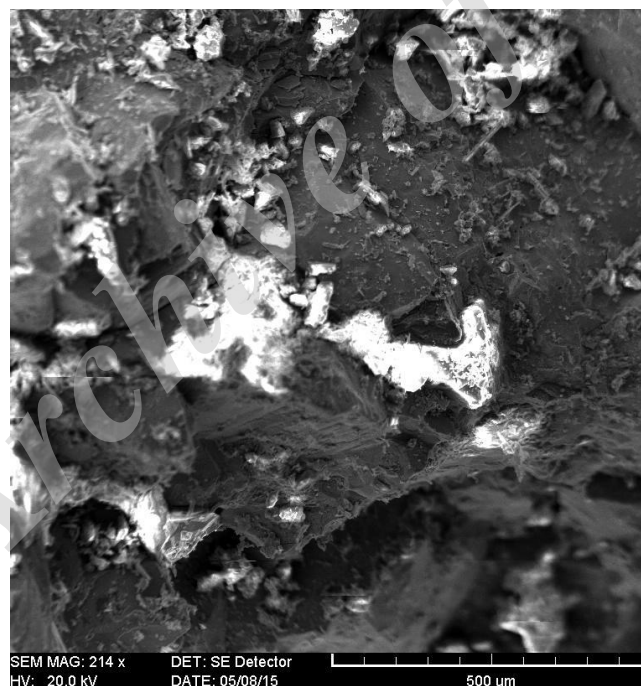
شکل ۲۱: روش پیشنهادی برای جدا کردن محصول لبه از محصول مرکزی در HPGR خط چهارم

زیادی از ذرات، هیچگونه ترکی مشاهده نشد (شکل ۲۳). لذا با ایجاد بار در گردش، به ذرات موجود در محصول این فرصت داده می‌شود تا در عملیات خردایش مجدد، احتمال شکستن یا ایجاد ترک در آنها افزایش یابد و باعث افزایش کارایی مدار خردایش شود.

برای بررسی دقیق‌تر، ذرات در دامنه ابعادی ۸ تا ۱۲ میلی‌متر از محصول آزمایش سیلندر و پیستون، برای مطالعه با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی انتخاب شدند. اگرچه در سطح ذراتی ریزترک‌ها قابل مشاهده است (شکل ۲۲ شکل) ولی بر روی سطح تعداد



شکل ۲۲: ریزترک‌های موجود در یک ذره از محصول آزمایش سیلندر و پیستون (بزرگنمایی ۸۴۵ برابر)



شکل ۲۳: تصویر سطح یک ذره از محصول آزمایش سیلندر و پیستون (بزرگنمایی ۲۱۴ برابر)

- از نتایج آماری داده‌های تابستان ۹۲ مربوط به خط چهارم، میانگین باردهی خوراک به *HPGR* ۳۵۲ تن بر ساعت و میانگین توان مصرفی مجموع موتورهای آن ۳۰۴ کیلو وات به دست آمد. در حالی که توان موتورهای *HPGR* ۱۴۰۰ کیلو وات و ظرفیت اسمی آن ۵۲۰ تن بر ساعت و با احتساب رطوبت خوراک، ۵۵۰ تن بر ساعت

#### ۴- نتیجه‌گیری

- برای اولین بار در ایران، تجهیزات آزمایش سیلندر و پیستون ساخته شد و امکان انجام این آزمایش فراهم شد.

- [5] Van der Meer, F.P. and Gruendken, A. (2010). "Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls", *Minerals Engineering* 23: 663-669
- [6] Hasanzadeh, V. and Farzanegan, A. (2011). "Robust HPGR model calibration using genetic algorithms", *Minerals Engineering*, 24: 424-432
- [7] Kalala, J.T., Dong, H. and Hinde, A.L. (2006). "Using piston-die press to predict the breakage behavior of HPGR"
- [8] Davaanyam, Z., Klein, B. and Nadolski, S. (2015). "Using piston press tests for determining optimal energy input for an HPGR operation", SAG conference, Vancouver, Canada
- [9] Darabi Golestan, F., Hezarkhani, A., Zare M. R. (Mathews, J.H. (1987). *Numerical Methods for Computer Science, Engineering and mathematics*, Prentice-Hall International. ISBN: 0-13-626565-0, QA297.M39.

است. در واقع کمتر از ۲۲ درصد از توان موتورهای HPGR مورد استفاده قرار گرفته است.

- هنگامی که به علت کمبود خوراک ورودی یا مشکلات ناشی از تجهیزات پایین دست کارخانه، کاهش نرخ خوراک ورودی به HPGR اجتناب ناپذیر است؛ به نظر می‌رسد ایجاد بار در گردش در HPGR، می‌تواند ضمن افزایش کارایی دستگاه HPGR، محصول نهایی ریزتر و یک‌دست‌تری را ایجاد نماید. شبیه‌سازی این پیشنهاد با استفاده از آزمایش سیلندر و پیستون نشان داد که D50 محصول با استفاده از بار در گردش ۸۰ درصد در شکست فشارشی به میزان ۲۵٪ کاهش می‌یابد.

- مطالعه ذرات محصول آزمایش سیلندر و پیستون در یک دامنه ابعادی مشخص با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داد که تعداد محدودی از ذرات دارای ترک‌های سطحی هستند. مطمئناً با ایجاد بار در گردش احتمال شکست یا ایجاد ترک در ذرات بیشتر خواهد شد.

- مداری با بار در گردش برای آسیای غلتکی فشار بالای خط چهارم تولید کنسانتره مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر پیشنهاد شد.

## ۵- قدردانی و سپاس

بدین‌وسیله از همکاری پرسنل پژوهشکده سنگ آهن و فولاد، امور فرآوری و آزمایشگاه مکانیک سنگ شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر قدردانی می‌شود.

## مراجع

- 1- High Pressure Grinding Rolls
- 2- gap
- 3- top size
- 4- SEM: Scanning Electron Microscopy
- 5- Ozcan
- 6- slot opening
- 7- Piston and Die Test (P&D Test)
- 8- Kalala
- 9- inter-particle breakage
- 10- Davaanyam
- 11- transducers
- 12- acquisition system
- 13- trapezoid formula
- 14- cobber
- 15- flap

[1] Noparast, M., Gharabaghi, M. and Abdollahi, H. (2000). "Introduction to AG and SAG Mills", Tehran, Noavar publication, (in Persian)

[2] Sam, A., Khoshdast, H. and Mehrani, A.P. (2011). "High Pressure Grinding Rolls Technology", Hormozgan University publication, (in Persian)

[3] Napier-Munn, T. J., Morrel, S., Morrison, R.D. and Kojovic, T. (1996). "Mineral comminution circuits-their operation and optimization" The University of Queensland, Brisbane, Australia.

[4] Ozcan, O., Aydogan, N.A and Benzer, H. (2014). "Effect of the operational parameters and recycling load on the high pressure grinding rolls (HPGR) performance", *Int. J. Miner. Process.*