



## Comparison of Hpgr and Traditional Breakage Methods on Breakage Function and Selection Function of Low-Grade Iron Ore

Paniz habibzadeh<sup>1</sup>, Parviz pourghahremani<sup>2\*</sup>

1. Master of mineral processing, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, Paniz.habibzadeh97@gmail.com

2. Professor, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran, pourghahremani@sut.ac.ir

Received: 2024/06/21- Accepted: 2024/11/24

### Abstract

High-pressure grinding rolls (HPGR) have been widely used in the mineral crushing industry due to their energy efficiency and improved mineral liberation. This research examined the effect of HPGR and traditional crushing methods on low-grade iron ores' breakage and selection functions. The breakage function was calculated using Bèrubè, Herbst & Fuerstenau, and Modified Herbst & Fuerstenau methods, and it was observed that HPGR increases the breakage function ( $B_{i1}$ ) for most size fractions, resulting in higher percentages of finer particles after grinding compared to traditional crushing methods. However, this difference diminishes as the particle size decreases. The selection function analysis showed that HPGR increased particle breakage rate compared to traditional methods. Moreover, the selection function of the samples peaked at  $-1.410+1.680$  mm before declining, suggesting that the highest breakage rate occurred at this size. The Broadbent-Calcut method also revealed that the value of  $\Phi$  varied for different sizes, indicating a non-normalized breakage function. Additionally, the value of  $\gamma$  for HPGR-crushed samples was lower than traditional methods, indicating that HPGR produced finer particles.

### Keywords

HPGR, Iron ores, Breakage function, Selection function.

---

\* Corresponding Author



## 1- INTRODUCTION

comminution is a high-energy-consuming process, representing 30-50% of energy consumption in mines and 2-3% of total energy consumption (Aminalroaya et Pourghahramani; Tromans, 2008). As ore grades decline, there is a pressing need to reduce minerals to achieve the required liberation for effective mineral processing (Aminalroaya et Pourghahramani). High-pressure rolls (HPGR) offer a promising solution due to their pressure-based crushing mechanism that significantly increases liberation. (Napier-Munn et al., 1996). HPGR is often called mill or crusher, depending on the specific application requirements. (Van der Meer et Gruendken 2010). The crushing occurs between two rotating cylinders, where particles can undergo either single-particle or inter-particle crushing (Tavares, 2005). Single-particle crushing occurs if the largest feed particle is larger than the gap between the rollers. In contrast, inter-particle crushing occurs in a particle bed if the largest particle is smaller than the roller gap (Klaus Schönert, 1988). Population balance modeling is commonly employed to describe comminution processes, in which particles of various sizes are transformed into smaller particles at distinct rates determined by the population balance model (PBM) (Napier-Munn et al., 1996). The PBM has been successfully applied to various crushing and grinding equipment, including HPGR. HPGR modeling with the PBM is relatively simple, assuming a zero-residence time and no internal classification. Thus, only the breakage and selection functions must be determined (Anticoi et al., 2018). Significant progress has been made in modeling HPGR performance, with the pioneering work by Morrell et al. serving as a cornerstone. Their comprehensive model consists of three distinct components: a granularity prediction model to calculate the particle size distribution of the product, an outlet model to determine the flow rate of particles through the HPGR, and an energy consumption model to assess the energy requirements of the process (Daniel et Morrell 2004). Morrell et al.'s granularity prediction model partitioned HPGR's crushing zone into three distinct regions: pre-crushing, edge-effect crushing, and compression. Pre-crushing and edge-effect crushing primarily involve single-particle fracture induced by impact on the cylinder surface. At the same time, the compression region is characterized by inter-particle fracture under pressure, where the bulk of the fracture process occurs. Notably, the compression region is the most critical area for particle fracture in HPGR (Daniel et Morrell 2004; Morrell, Shi, et Tondo 1997). Shonert divided the space between the rollers into three zones: the acceleration, compression, and release zones. In the acceleration zone, particles are accelerated by gravity and frictional forces due to sliding between the rollers' surface and the material bed, flowing towards the compression zone where inter-particle crushing under high pressure occurs. The release zone represents a transition region with decreasing pressure, where the particles leave the device (Wang et al., 2013; K Schönert, 1979). HPGR produces two distinct particle fractions: the cake, which is the innermost portion of the rollers with the highest pressure and highest product density, and the edge product, which is generated in the outermost part of the rollers where the pressure is lowest (Klaus Schönert, 1988). This dual-product characteristic of HPGR offers unique opportunities for the selective processing of minerals. This research aimed to investigate the effect of HPGR on product characteristics compared to traditional crushing methods. This was accomplished by performing bond work index tests, granulometry analysis, breakage, and selection function tests on HPGR and jaw crusher products.

## 2- METHODS

A representative iron ore sample was selected to investigate the effect of HPGR on the breakage and selection functions. Following initial crushing, one portion of the sample was crushed using HPGR in a closed circuit with a -6 mesh control sieve. In contrast, the other portion was processed using a jaw crusher, as illustrated in the flow diagram in Figure 1. The resulting products from the HPGR and jaw crusher were sieved, and 300 grams of single-sized samples were collected from each size fraction. Grinding tests were conducted for durations ranging from 10 to 50 seconds. After

each grinding interval, the samples were re-sieved, and grinding continued until 40-60% of the original material remained unground. Due to the non-normalized nature of the failure functions, these functions were analyzed separately for each size fraction to ensure accurate results.

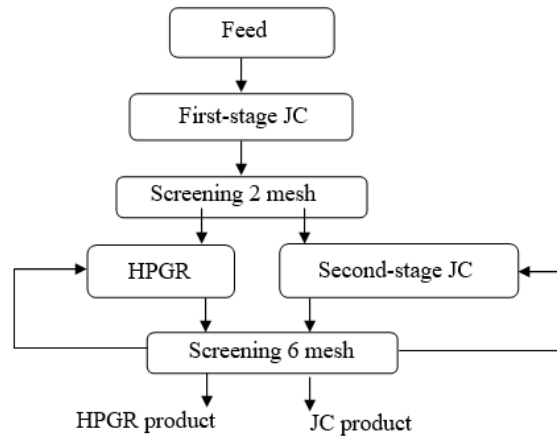


Figure 1- Flow diagram for breakage and selection function

### 3- FINDINGS AND ARGUMENT

The cumulative breakage function was obtained for the HPGR product and the product from JC for the fractions of  $(-3.360 + 2.380)$ ,  $(-2.380 + 2)$ ,  $(-2.380 + 1)$ ,  $(-1.680 + 1.410)$  and  $(-1.410 + 1)$  mm using three methods: H & F, modified H & F, and the cumulative failure function. The results of the breakage function for the  $(-3.360 + 2.380)$  size fraction are presented in Figure 2. The semi-logarithmic plot of the fraction of material retained on the sieve for the size fractions shows that the slope of the plot line represents the value of the breakage function for the first sieve ( $S_j$ ).

The results showed that the breakage function for both samples is non-normalizable. Furthermore, it was observed that, despite the differences in results among the applied methods, in all three approaches, the cumulative breakage function values ( $B_{i,1}$ ) obtained from the HPGR product were higher than those of the jaw crusher product in most size fractions. This indicates that the fraction of material broken from the initial size to smaller sizes than  $i$  is more significant for HPGR, meaning that the HPGR product produces finer material after a single breakage event. This finding suggests that the HPGR product exhibits lower resistance to breakage, which can be attributed to particle weakening and interparticle breakage mechanisms in the HPGR system. Additionally, by calculating the non-cumulative breakage function ( $b_{i,1}$ ), which represents the percentage of material retained on a sieve after a single breakage event, it was observed that for the HPGR product, this value decreases for larger sieves and increases for smaller sieves. This further confirms that the HPGR system generates finer products.

The results for the selection function values of both samples initially increased, reaching a maximum at the size fraction  $(-1.680 + 1.410)$  mm, then decreased as the particle size became finer. This trend indicates that as materials become finer, more particles are broken, peaking at this size fraction before declining. This behavior may be due to the uniform size of the grinding media used. It is suggested that using larger grinding media would improve the breakage of coarser particles. Nevertheless, the selection function values for both samples were consistently higher during HPGR comminution compared to the jaw crusher. In other words, the HPGR product is broken down more rapidly during grinding than the jaw crusher product. This finding confirms that high-pressure comminution accelerates breakage kinetics, enhancing the overall grinding process efficiency.

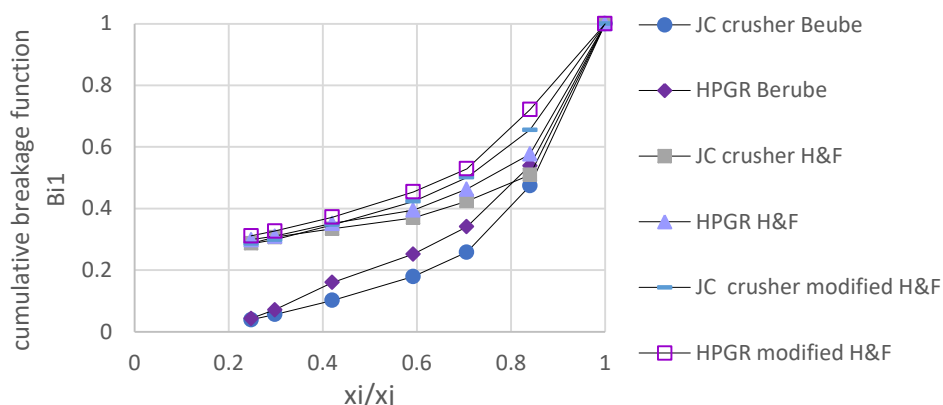


Figure 2- cumulative breakage function was for the HPGR product and JC product for the +2.380-3.360 mm size fractions

#### 4- CONCLUSIONS

- HPGR was found to decrease  $P_{80}$ , but this difference was reduced with ball milling. Examination of the  $K_d$  values revealed a wide particle size distribution in the HPGR product, which may be attributed to the distinct crushing mechanisms of the edge and layer under pressure in HPGR.
- The breakage function ( $B_{ij}$ ) measurements revealed that HPGR increased the breakage function in most fractions, suggesting that HPGR generated finer particles than traditional crushing methods.
- The selection function increased up to a specific size, after which it decreased, indicating that particles of similar sizes were selected. However, the HPGR product exhibited a higher selection function than traditional JC, signifying faster crushing rates. This implies that HPGR products were more susceptible to crushing, resulting in a higher breakage rate.
- The fitting of Broadbent's model confirmed that the HPGR product displayed a lower  $\gamma$  value than traditional crushing, indicating the production of finer particles by HPGR. This result suggests that HPGR generated a more uniform particle distribution than traditional crushing methods.
- The existence of varying  $\Phi$  values across different size fractions implies that the breakage function of the samples is not normalized. This suggests that the crushing mechanism within HPGR may generate a more heterogeneous distribution of particle sizes than traditional crushing, resulting in a non-normalized breakage function.

#### REFERENCES

- Aminalroaya, Alireza, et Parviz Pourghahramani. 2022. «Investigation of particle breakage and weakening behaviors in multi-component feed grinding by High-Pressure Grinding Rolls (HPGR).» *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 43 (2): 217-32.
- Anticoi, Hernan, Eduard Guasch, Sarbast Ahmad Hamid, Josep Oliva, Pura Alfonso, Maite Garcia-Valles, Marc Bascompta, Lluís Sanmiquel, Teresa Escobet, et Rosa Argelaguet. 2018. «Breakage function for HPGR: Mineral and mechanical characterization of tantalum and tungsten ores.» *Minerals* 8 (4): 170.
- Daniel, Michael John, et Stephen Morrell. 2004. «HPGR model verification and scale-up.» *Minerals Engineering* 17 (11-12): 1149-61.
- Morrell, S, F Shi, et LA Tondo. 1997. «Modelling and scale-up of high-pressure grinding rolls.»

- Proc. XX International Mineral Processing Congress, eds. HB von Blottnitz and H. Hohberg.
- Napier-Munn, Timothy J, Stephen Morrell, Robert D Morrison, et Toni Kojovic. 1996. «Mineral comminution circuits: their operation and optimization.»
- Schönert, K. (1979). «Aspects of the physics of breakage relevant to comminution.» Fourth Tewksbury Symposium, University of Melbourne.
- Schönert, K. (1988). «A first survey of grinding with high-compression roller mills. » *International Journal of Mineral Processing* 22 (1-4): 401–12.
- Tavares, L. (2005). «Particle weakening in high-pressure roll grinding.» *Minerals Engineering* 18 (7): 651–57.
- Tromans, D. (2008). «Mineral comminution: energy efficiency considerations.» *Minerals Engineering* 21 (8): 613–20.
- Van der Meer, F P<sup>†</sup>, et A Gruendken. 2010. «Flowsheet considerations for optimal use of high-pressure grinding rolls.» *Minerals Engineering* 23 (9): 663-69.
- Wang, C, S Nadolski, O Mejia, J Drozdiak, et B Klein. 2013. «Energy and cost comparisons of hpgr-based circuits.» *Engineering and Mining Journal* 214 (12): 102.



مقاله پژوهشی

بررسی تابع شکست و انتخاب در کانی‌های کم عیار آهن با آسیای غلطکی فشار بالا

پانید حبیب زاده<sup>۱</sup>، پرویز پورقهرمانی<sup>۲\*</sup>

۱. کارشناسی ارشد فرآوری، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، Paniz.habibzadeh97@gmail.com  
۲. استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران، pourghahramani@sut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

چکیده

آسیای غلطکی فشار بالا (HPGR) مدت زیادی است که در صنعت خردایش مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد و دارای مزیت‌هایی از جمله کاهش مصرف انرژی و افزایش درجه آزادی است. در این تحقیق، تاثیر خردایش با HPGR و روش‌های سنتی خردایش بر روی نمونه کم عیار آهن با تابع شکست و انتخاب مورد بررسی قرار گرفت. تابع شکست به روش بقوبه، هرست فورستانو و هرست فورستانو اصلاح شده محاسبه شد و مشاهده شد که در اکثر ابعاد HPGR باعث افزایش تابع شکست (B<sub>ij</sub>) می‌شود و این به این معنی است که میزان درصد عبوری از یک سرنده خاص بعد از آسیا شدن، در محصول HPGR بیشتر است؛ اما با ریزتر شدن ذرات این اختلاف کم می‌شود. نتایج تابع انتخاب نشان داد که خردایش با HPGR باعث افزایش سینتیک خردایش می‌شود. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تابع انتخاب نمونه‌ها تا اندازه ۱/۴۱۰+۱/۶۸۰- میلی‌متر افزایش یافته و بعد از آن کاهش پیدا کردند که بیانگر این است که بیشترین آهنگ شکست در این سایز اتفاق افتاده است. نتایج به دست آمده از روش برادبنت-کالکات نشان داد که مقدار  $\Phi$  برای هر اندازه متفاوت است؛ به عبارتی تابع شکست نمونه‌ها غیرنرمال شونده‌اند، از طرفی مقدار  $\gamma$  برای نمونه‌های خرد شده با HPGR کمتر از روش سنتی است که نشان‌دهنده تولید ذرات ریزتر به وسیله HPGR است.

کلمات کلیدی

HPGR، کانسنگ آهن، تابع شکست، تابع انتخاب.

## ۱- مقدمه

خردایش یک فرآیند با مصرف انرژی بالا است و حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد مصرف انرژی در معادن و ۲ تا ۳ درصد کل مصرف انرژی را به خود اختصاص می‌دهد [۱]. امروزه با کاهش عیار معادن، کانی‌ها نیاز به کاهش ابعاد بیشتری برای رسیدن به درجه آزادی مطلوب برای فرآیندهای پرعیارسازی دارند [۲]. بر اساس مطالعات انجام شده، مشخص شد که مکانیزم تحت فشار، موثرترین مکانیزم برای افزایش درجه آزادی است. سنگ‌شکن غلتکی فشار بالا<sup>۱</sup> HPGR به علت دارا بودن مکانیزم تحت فشار، درجه آزادی را افزایش می‌دهد و به دنبال آن فرآیند پرعیارسازی را بهبود می‌بخشد [۳]. HPGR بسته به نیاز می‌تواند به‌عنوان آسیای غلتکی فشار بالا یا سنگ‌شکن غلتکی فشار بالا شناخته شود [۴]. خردایش مواد ما بین استوانه‌های فشار بالا به صورت بین ذره‌ای<sup>۲</sup> و تک ذره<sup>۳</sup> انجام می‌شود [۵]. هنگامی که بزرگترین ذره خوراک از فاصله بین غلتک‌ها بزرگ‌تر باشد، در این صورت خردایش تک ذره انجام می‌گیرد؛ اما هنگامی که بزرگترین ذره خوراک از فاصله بین غلتک‌ها کوچک‌تر باشد، ذره در تماس با دیگر ذرات و تحت فشار باشد، خردایش بین ذره‌ای یا شکست در یک بستر<sup>۴</sup> اتفاق می‌افتد [۶].

فرآیندهای خردایش عمدتاً بر اساس مدل موازنه جمعیت<sup>۵</sup> توصیف می‌شوند که در آن ذرات از محدوده اندازه‌های مختلف به ذرات کوچکتر تبدیل می‌شوند؛ یعنی ثابت سرعت برای هر کسر اندازه وجود دارد که سرعت ناپدید شدن آن را تعیین می‌کند [۳]. موازنه جمعیت برای مدل‌سازی انواع تجهیزات خردایش و آسیاکنی از جمله HPGR به کار می‌رود. مدل موازنه جمعیت برای HPGR ها ساده است، چون زمان ماند صفر در نظر گرفته می‌شود، همچنین طبقه‌بندی داخلی شکل نمی‌گیرد و فقط باید تابع شکست و انتخاب محاسبه شود [۷].

تحقیقات زیادی در زمینه مدلسازی HPGR انجام شده است، یکی از اساسی‌ترین تحقیقات توسط مورل و همکارانش انجام شده است. این مدل شامل سه بخش مختلف: یک مدل برای پیش‌بینی دانه‌بندی ذرات تولیدی، یک مدل برای دهانه

خروجی و یک مدل برای مصرف انرژی بود [۸]. در مدلی که برای پیش‌بینی دانه‌بندی ذرات تولیدی بود، مناطق خردایش در HPGR را به سه ناحیه پیش خردایش، خردایش با تاثیر لبه و فشرده‌سازی تقسیم کرده‌اند. مکانیزم خردایش در دو ناحیه پیش خردایش و خردایش با تاثیر لبه از نوع شکست تک ذره است که در اثر ضربه با سطح استوانه‌ها رخ می‌دهد. در ناحیه فشرده‌سازی شکست به صورت بین‌ذره‌ای و تحت فشار است و غالب فرآیند شکست در این منطقه رخ می‌دهد که مهم‌ترین ناحیه خردایش در HPGR است [۸، ۹]. شونت نیز فضای بین دو غلتک در HPGR به سه زون مختلف؛ زون شتاب‌گیری<sup>۶</sup>، زون فشرده‌سازی<sup>۷</sup> و زون رهاسازی<sup>۸</sup> تقسیم کرد. منطقه اول، زون شتاب‌گیری است که مواد مستقیم وارد این منطقه می‌شوند، ذرات در این ناحیه به وسیله شتاب‌گرانش و نیروهای اصطکاکی که ناشی از لغزش بین سطح غلتک‌ها و بستر مواد است شتاب گرفته و به سمت زون فشرده‌سازی جریان می‌یابند. بعد از این منطقه ذرات وارد زون فشرده‌سازی می‌شوند و خردایش تحت فشار در این ناحیه انجام می‌گیرد. آخرین منطقه زون رهاسازی است که فشار در این ناحیه کم و سپس صفر می‌شود و ذرات از دستگاه خارج می‌شوند [۱۰، ۱۱]. ذرات خروجی از HPGR به دو صورت است؛ بخش اول که به صورت کیک<sup>۹</sup> متراکم تولید می‌شود و حاصل مرکز غلتک‌ها، جایی که بیشترین مقدار فشار وجود دارد، است و محصول بعدی در جایی که فشار کمترین مقدار را دارد، به نام محصول لبه، تولید می‌شود [۶].

در حال حاضر، کاربردهای HPGR در مدارهای خردایش شامل موارد زیر است:

- سنگ‌شکنی مرحله دوم [۱۲، ۱۳]
- آسیاکنی مرحله اول قبل از آسیای گلوله‌ای [۱۴]
- آسیاکنی مرحله دوم [۱۵]
- آسیاکنی قبل از هیپ فروشویی [۱۶]
- آسیای بار برگشتی قلوه‌سنگ‌ها<sup>۱۰</sup> یا ذرات بحرانی آسیای نیمه خودشکن که به راحتی خرد نمی‌شوند و باعث اشغال حجم آسیای نیمه خودشکن و آسیای گلوله‌ای پایین دست می‌شوند [۴].

<sup>6</sup> Acceleration zone

<sup>7</sup> Compression zone

<sup>8</sup> Extrusion zone

<sup>9</sup> Flake

<sup>10</sup> Pebbles

<sup>1</sup> High-pressure-grinding rolls

<sup>2</sup> Inter particle

<sup>3</sup> Single particle

<sup>4</sup> Particle-bed comminution

<sup>5</sup> Population balance model (PBM)



شکل ۱- HPGR موجود در آزمایشگاه کانه آرایبی دانشگاه صنعتی سهند



شکل ۲- محصول بدست آمده از HPGR که به صورت کیک درآمده است

### ۲-۳- تابع شکست

توزیع اندازه ذرات حاصل از شکست سنگ با تابع شکست توصیف می‌شود. در واقع وقتی یک ذره به اندازه اولیه  $z$  ذراتی با اندازه  $i=z+1$  تولید می‌کند، ذرات به صورت تصادفی توزیع می‌شوند، توزیع این ذرات را می‌توان با تابع شکست تجمعی نشان داد. تابع شکست را با  $B_{ij}$  نشان می‌دهند و نشان‌دهنده کسری از ذرات است که از اندازه  $z$  شکسته می‌شوند و از  $i$  کوچکترند. تابع شکست را می‌توان به صورت غیرتجمعی  $b_{ij}$  نیز نشان داد که بیانگر درصدی از مواد است که از اندازه  $z$  شکسته شده و در اندازه  $i$  ظاهر می‌شوند (رابطه ۱) [۱۷].

$$b_{ij} = B_{i-1,j} - B_{ij} \quad (1)$$

در این تحقیق HPGR به عنوان سنگ‌شکن ثانویه استفاده شد و نتایج خردایش با آن روی محصول خروجی بررسی شد که به این منظور با آزمایش‌های اندیس کار باند، دانه‌بندی و آزمایش‌های تابع شکست و انتخاب روی محصول خروجی HPGR و سنگ شکن فکی انجام شد.

### ۲- مواد، تجهیزات و تئوری تحقیق

#### ۲-۱- نمونه مورد استفاده

در این پژوهش از دو نمونه کانسنگ آهن با عیارهای مختلف استفاده شد. نمونه‌های مورد نیاز از کانسنگ کم‌عیار آنومالی شمالی متعلق به شرکت سنگ آهن ایران مرکزی تهیه شد. نمونه‌ها ابتدا با سنگ‌شکنی فکی اولیه در مدار باز و پس از آن با سنگ‌شکن فکی ثانویه در مدار بسته خرد شدند. در این تحقیق آهن کل به روش تیتراسیون، آهن دو ظرفیتی به روش تیتراسیون و ساتماگان و ده اکسید اصلی به روش XRF آنالیز شدند. تمامی آنالیزها در آزمایشگاه معدنی چغارت انجام شد.

#### ۲-۲- HPGR آزمایشگاهی

HPGR آزمایشگاه دانشگاه صنعتی سهند شامل دو غلتک با سرعت دورانی ثابت، طول ۲۰ و قطر ۱۵ سانتی‌متر است. این غلتک‌ها با نیروی حاصل از الکتروموتور که از طریق چرخ زنجیر منتقل می‌شود، می‌چرخند. موقعیت یکی از غلتک‌ها ثابت و غلتک دیگر متناسب با نیروی وارد شده از بار ورودی حرکت می‌کند. نیروی لازم برای حرکت غلتک متحرک به وسیله جک هیدرولیک تامین شده که این نیرو با دو عدد بازو به دو سر غلتک وارد می‌شود. حرکت جک هیدرولیک نیازمند فشار روغن است که این روغن فشرده با پکیج پمپ روغن ایجاد و تامین می‌شود. فشار تولید شده در پکیج روغن و همچنین فشار روغن برگشتی از جک‌های هیدرولیک با دو عدد مانومتر فشار اندازه‌گیری و نشان داده می‌شود. خردایش نمونه‌ها در HPGR با فشار عملیاتی ۱۱۰ بار معادل نیروی فشاری ویژه ۷/۵ مگاپاسکال انجام شد و دهانه عملیاتی برای تمامی آزمایش‌ها روی ۳ میلی‌متر تنظیم شد. همچنین ورود بار به وسیله قیف مخصوص و به صورت خفه انجام گرفت.

محصولات خروجی HPGR، در اثر فشار زیادی که به وسیله غلتک‌ها اعمال می‌شود، متراکم شده و به صورت کیک از دستگاه خارج می‌شوند (شکل ۲)؛ از این رو باید برای جدایش ذرات فرآیند دی-آگلومراسیون انجام شود. در آزمایشگاه این کار با الک‌های آزمایشگاهی و تعدادی گلوله انجام شد.

روش بقوبه یک روش ساده برای محاسبه تابع شکست است که با استفاده از رگرسیون انجام می‌شود و به صورت رابطه کسر مواد درشت‌تر از سرند  $i$  در زمان‌های مختلف پیشنهاد می‌شود (روابط ۶ و ۷):

$$\ln(W_i) = E(i) + F(i)t + G(i)t^2 \quad (6)$$

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{\text{عبوری از سرند 2}}{\text{عبوری از سرند 1}} \quad (7)$$

که در آن:

$W_i$ : درصد جرم ذرات درشت‌تر از سرند  $i$   
 پارامترهای رگرسیون  $E(i)$ ،  $F(i)$  و  $G(i)$  و  $t$  زمان بر حسب ثانیه است.

تابع شکست تجمعی نیز از رابطه ۸ قابل محاسبه است:

$$B_{i1} = \frac{F_i}{F_1} \quad (8)$$

### ب- روش هرست فورستانو

اساس روش هرست فورستانو این فرض است که تابع شکست ذرات نرمال‌شونده است، به عبارتی ذرات ثانویه مستقل از ذرات اولیه‌اند. این فرض برای زمان‌های خریداری کم صدق می‌کند. در این روش تغییرات در تجمع ذرات با رابطه ۹ بیان می‌شود که در آن  $y_i(t)$  آهنگ تولید ذرات ریز و  $F_i$  ثابت نرخ است، همچنین ارتباط تابع شکست و تابع انتخاب با رابطه ۱۱ بیان می‌شود. بنابراین برای تخمین تابع شکست، با رگرسیون خطی  $y_i(t)$  نسبت به زمان، شیب خط که برابر  $B_{i1}S_1$  است تعیین شده با تقسیم بر تابع انتخاب طبقه اول، مقدار تابع شکست  $B_{ij}$  بدست می‌آید.

$$\frac{dy_i(t)}{dt} = F_i \quad (9)$$

$$F_i = B_{ij}S_j \quad (10)$$

$$B_{ij} = \frac{F_i}{S_j} \quad (11)$$

### ج- هرست فورستانو اصلاح شده

در روش هرست فورستانو اصلاح شده، زمان خریداری خیلی کوتاه فرض نشده، به عبارتی  $Y_i(t) \neq 0$  و رابطه به صورت رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ خلاصه می‌شود:

$$\frac{dY_i(t)}{dt} = F_i(1 - Y_i(t)) \quad (12)$$

رابطه‌ای که به بهترین صورت می‌تواند تابع شکست را برازش کند و از طریق محاسبات برگشتی قابل محاسبه است به صورت رابطه ۲ توسط برادبنت و کلکات ارائه شده است:

$$(1 - \Phi_j) \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^\beta + B_{ij} = \Phi_j \left(\frac{x_i}{x_j}\right)^\gamma \quad (2)$$

که در آن:

$x_j$ : اندازه سرند اولیه

$x_i$ : اندازه سرند  $i$  ام

$\Phi$ ،  $\beta$  و  $\gamma$ : پارامترهای توزیع دانه‌بندی ماده خرد شده

$\gamma$ : مقدار مواد دانه ریزی که از بزرگترین سایز ذرات تولید می‌شود و همچنین به طور مستقیم به کارآیی عملیات خردایش مربوط می‌شود.

پارامتر  $\beta$  کنترل‌کننده شکل توزیع اندازه ذرات بعد از شکست و پارامتر  $\Phi$  برای توصیف توزیع محصولات شکسته شده بعد از یک مرحله خردایش استفاده می‌شود [۱۸].

اگر مقادیر تابع شکست مستقل از اندازه اولیه باشد، تابع شکست را قابل نرمال شدن<sup>۱</sup> می‌نامند و می‌توان با استفاده از یک سایز تابع شکست را محاسبه کرد (رابطه ۳):

$$b_{ij} = b_{i+1j+1} \quad (3)$$

اگر تابع شکست وابسته به اندازه اولیه باشد، تابع شکست غیر قابل نرمال کردن<sup>۲</sup> است (رابطه ۴)، در این صورت  $\Phi$  با کاهش سایز ذرات، افزایش می‌یابد و از رابطه ۵ قابل محاسبه است. اگر تابع شکست قابل نرمال شدن باشد، مقدار  $\delta$  صفر است.

$$b_{ij} \neq b_{i+1j+1} \quad (4)$$

$$\Phi_j = \Phi_1 \left[\frac{x_j}{x_1}\right]^{-\delta} \quad (5)$$

### ۲-۳-۱- روش تعیین عددی تابع شکست

در این تحقیق از روش بقوبه<sup>۳</sup>، هرست فورستانو<sup>۴</sup>، هرست فورستانو اصلاح شده<sup>۵</sup> و رابطه برادبنت و کلکات برای تعیین تابع شکست استفاده شد.

### الف- روش بقوبه

<sup>1</sup> Normalizable

<sup>2</sup> Non-normalizable

<sup>3</sup> Bérubé

<sup>4</sup> Herbst & Fuerstenau

<sup>5</sup> Modified Herbst & Fuerstenau

تر تا ۳۷- میکرون سرند و بخش‌های درشت پس از خشک کردن به روش خشک دانه‌بندی شدند.

### ۳-۲- اندیس کار باند

آزمایش اندیس کار گلوله‌ای باند<sup>۱</sup> برای بررسی تاثیر HPGR روی قابلیت خردایش مواد معدنی در آسیای گلوله‌ای انجام شد. هدف آزمایش اندیس کار آسیای گلوله‌ای باند، تعیین اندیس کار استاندارد است که به صورت توان ویژه لازم، برای کاهش ذره از اندازه بینهایت تا اندازه‌ای که ۸۰ درصد مواد از سرند ۱۰۰ میکرون عبور کند، تعریف می‌شود. این آزمایش شامل یک سری خردایش ناپیوسته در آسیای گلوله‌ای است. برای تعیین اندیس کار باند، نمونه معرف تا ۶ مش خرد شده و پس از دانه‌بندی مقدار  $F_{80}$  و چگالی ظاهری تعیین شد. با در نظر گرفتن چگالی ظاهری بدست آمده، وزن معادل ۲۰۷ سانتی‌متر مکعب از ماده معدنی تعیین شده و پس از انتقال به داخل آسیا گلوله‌ای به تعداد دور مشخص و با سرعت ۸۶ دور دقیقه آسیا شدند. بعد از هر خردایش محتویات آسیا، سرند شده و سپس جرمی از ماده برای رسیدن به وزن اولیه خوراک استفاده می‌شود. مدت زمان هر خردایش طوری در نظر گرفته می‌شود که جرم کسر روی سرندی به طور ثابت ۲/۵ برابر بیشتر از جرم زیر سرندی شود. تحت این شرایط، آزمایش شبیه عملکرد آسیای پیوسته با بار در گردش ۲۵۰ درصد می‌شود. پس از به تعادل رسیدن آسیا مقدار  $P_{80}$  تعیین می‌شود و در نهایت با استفاده از رابطه ۱۶ می‌توان مقدار اندیس کار گلوله‌ای بدست آورد:

$$w_i = \frac{11.76}{p_i^{0.23} \times G_i^{0.82} \left( \frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (1)$$

که در آن:

$G_i$ : مقدار ماده‌ای که در اثر یک دور گردش آسیا خرد می‌شود

(مقدار نرمه تولید شده به ازای یک دور گردش آسیا)

$P_1$ : دهانه سرند کنترلی

$F$ : ابعاد بار اولیه بر مبنای ۸۰ درصد عبور کرده از سرند

$P$ : ابعاد محصول بر مبنای ۸۰ درصد عبور کرده

تعداد و اندازه گلوله‌های استفاده شده در آزمایش اندیس کار باند در جدول ۱ آمده است.

$$\ln(1 - Y_i(t)) = -F_i t \quad (1)$$

بنابراین برای تخمین تابع شکست باید با رگرسیون خطی نیمه لگاریتمی  $1 - Y_i(t)$  نسبت به زمان، شیب خط که برابر  $B_{i1}S_1$  یا همان  $F_i$  است تعیین شده و با تقسیم بر تابع انتخاب طبقه اول، تابع شکست بدست می‌آید [۱۷]. این سه روش هر کدام جواب‌های متفاوتی برای تابع شکست می‌دهند ولی می‌توان از هر سه روش برای توجیه رفتار مواد در خردایش استفاده کرد.

### ۲-۴- تابع انتخاب

سینتیک خردایش با تابع انتخاب بیان می‌شود. اکثراً ذرات در خردایش از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کنند. در برخی موارد ممکن است به دلیل ناهمگن بودن سنگ معدن یا طبقه‌بندی داخلی سینتیک خردایش از مرتبه اول پیروی نکند [۱۹]. در هنگام آسیا شدن مواد در زمان  $t$  ثانیه مقداری از مواد شکسته شده و از سایز اولیه به سایزهای پایین‌تر می‌رود. مقدار این مواد که برای شکسته شدن انتخاب شده‌اند را تابع انتخاب می‌نامند. تابع انتخاب به عوامل مختلف مانند اندازه ذره، اندازه گلوله و اندازه آسیا بستگی دارد. برای ذرات درشت به دلیل کوچک بودن اندازه گلوله‌ها هر برخورد ذره و گلوله منجر به شکست نمی‌شود به همین دلیل تابع انتخاب با افزایش سایز ذرات به یک مقدار بیشینه می‌رسد و بعد از آن با افزایش اندازه ذرات کاهش می‌یابد [۲۰]. برای سرند اول دانه‌بندی بعد از خردایش که مواد درشت‌تر به آن اضافه نمی‌شود تابع انتخاب به صورت رابطه ۱۴ و ۱۵ تعریف می‌شود:

$$\frac{dm_1(t)}{dt} = -S_1 m_1 \quad (2)$$

$$m_1(t) = m_1(0)e^{-S_1 t} \quad (3)$$

که اگر نمودار  $\ln\left(\frac{m(t)}{m(0)}\right)$  برحسب زمان رسم شود، شیب خط مقدار  $S_1$  را بیان می‌کند [۲۱].

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- آنالیز ابعادی

برای این منظور نمونه‌های اولیه با سنگ‌شکن فکی اولیه در مدار باز و سپس به وسیله سنگ‌شکن فکی ثانویه و HPGR در مدار بسته با سرند کنترلی ۶ مش مورد خردایش قرار گرفتند. دانه‌بندی نمونه‌ها با استفاده از تجزیه سرندی تا ۳۷- میکرون به روش تر انجام شد؛ به طوری که نمونه‌های مورد نظر به روش

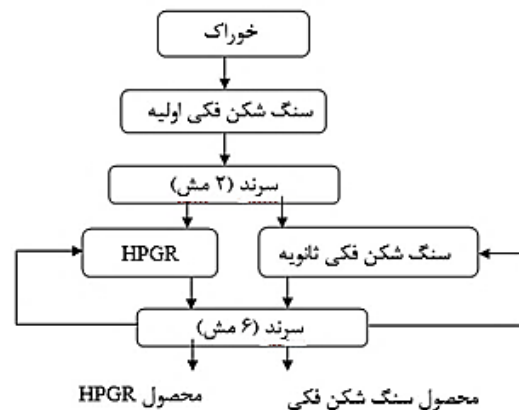
<sup>1</sup> Bond work index

جدول ۱- تعداد و قطر گلوله‌های آزمایش اندیس کار باند

تعداد	قطر (میلی‌متر)
۱۳	۳۸,۱۰
۲۰	۳۱,۷۵
۳	۲۵,۴۰
۲۱	۱۹,۰۵
۲۸	۱۵,۸۷

### ۳-۳- تابع شکست و انتخاب

برای بررسی تاثیر HPGR بر تابع شکست و انتخاب، ابتدا نمونه معرف انتخاب شده و پس از خردایش اولیه، بخشی از نمونه با HPGR و بخش دیگر با سنگ شکن فکی در مدار بسته با سرند کنترلی ۶ مش طبق فلوشیت شکل ۳ خرد شد.



شکل ۳- فلوشیت خردایش استفاده شده برای تست‌های تاثیر HPGR بر تابع شکست و تابع انتخاب

محصول HPGR و سنگ شکن فکی دانه‌بندی شده و از هر بخش ابعادی تک‌سایز ۳۰۰ گرم نمونه تهیه و در مدت زمان‌های کوتاه ۱۰ تا ۵۰ ثانیه با ترکیب گلوله‌های ثابت، آسیا شده و پس از هر زمان آسیاکنی نمونه‌ها مجدداً دانه‌بندی شد. آسیاکنی تا زمانی که ۴۰ تا ۶۰ درصد مواد از اندازه اولیه باقی بماند، ادامه داده شد. با فرض اینکه توابع شکست نمونه‌ها غیرنرمال شونده‌اند، توابع برای هر بخش ابعادی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته شد. سری سرندهای مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده‌است.

### ۳-۴- نرم افزار مورد استفاده

برای محاسبه تابع شکست و انتخاب از صفحه گسترده Excell و نرم‌افزار KMPCSim استفاده شد. نرم‌افزار

KMPCSim تابع شکست را به سه روش بقوبه، هربست فورستانو و هربست فورستانو اصلاح شده و تابع انتخاب را محاسبه می‌کند. برای محاسبه تابع شکست در صفحه گسترده اکسل به روش بقوبه، رابطه درجه ۲ برای مقادیر تجمعی مواد روی سرند بر حسب  $t$  برازش شد. برای روش هربست فورستانو، رابطه خطی مقادیر تجمعی عبوری و برای روش هربست فورستانو اصلاح شده رابطه خطی مقادیر  $\ln(1-Y_i(t))$  بر حسب زمان برازش شد که  $Y_i(t)$  همان مقادیر ذرات عبوری از سرند است. همچنین با حداقل کردن مربعات خطا تابع شکست تابع شکست محاسبه شده به روش هربست فورستانو اصلاح شده و رابطه برادبنت و کالکات پارامترهای رگرسیون  $\Phi$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  محاسبه شد. برای محاسبه تابع انتخاب در Excell نمودار  $\ln(m(t)/m(0))$  بر حسب زمان رسم شد که شیب خط حاصل مقدار  $S_1$  را نشان داد.

### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- آنالیز شیمیایی

از نمونه مورد استفاده، دو سری جزو نمونه انتخاب و برای آنالیز شیمیایی ده اکسیدی به روش XRF، آنالیز آهن دو ظرفیتی به روش ساتماگان و تیتراسیون و آنالیز آهن کل به آزمایشگاه ارسال شد. آنالیز شیمیایی نمونه‌های آهن در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول ۲- سری سرندهای مورد استفاده در آنالیز سرندی

شماره سرند	اندازه سرند (مش)	اندازه سرند (میکرون)
۱	۸	۲۳۸۰
۲	۱۰	۲۰۰۰
۳	۱۲	۱۶۸۰
۴	۱۴	۱۴۱۰
۵	۱۸	۱۰۰۰
۶	۲۵	۷۱۰
۷	۳۰	۵۹۰

۴ آنالیز آهن کل و آهن دوظرفیتی با روش تیتراسیون و ساتماگان

نام نمونه	Fe (درصد)	FeO tit (درصد)	FeO sat (درصد)
نمونه ۱	۲۴,۷۴	۱۱,۰۰	۸,۵۶
نمونه ۲	۲۴,۹۰	۱۱,۴۰	۸,۹۰
میانگین	۲۴,۸۲	۱۱,۲۰	۸,۷۳

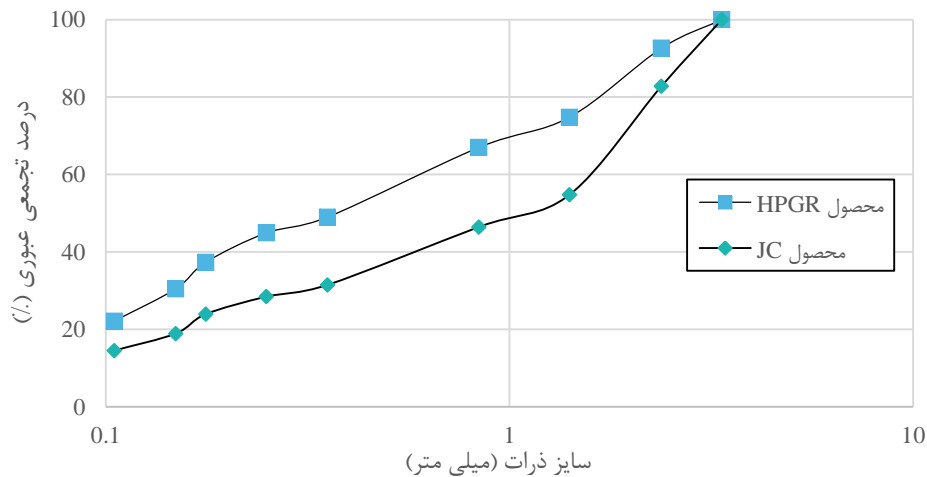
جدول ۴- آنالیز شیمیایی ده اکسیدی به روش XRF (بر حسب درصد)

نام نمونه	TiO <sub>2</sub>	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	S	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaO
نمونه ۱	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۵۳/۲۰	۶/۴۲	۰/۶۷	۰/۰۵	۲/۶۴	۰/۲۲	۲/۳۹
نمونه ۲	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۵۲/۵۷	۶/۳۰	۰/۶۶	۰/۰۵	۲/۶۲	۰/۲۲	۲/۳۸
میانگین	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۵۲/۸۹	۶/۳۶	۰/۶۷	۰/۰۵	۲/۶۳	۰/۲۲	۲/۳۹

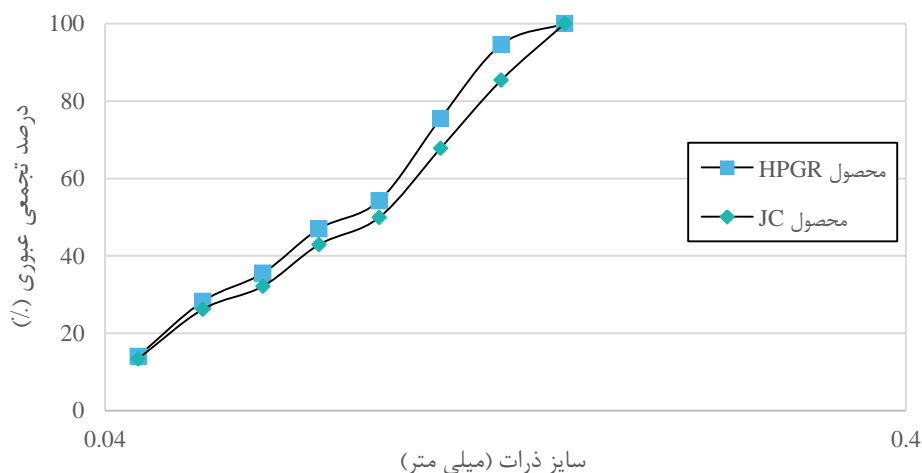
## ۲-۴- آنالیز ابعادی

مقایسه منحنی‌های دانه‌بندی محصولات سنگ‌شکن فکی و HPGR نشان می‌دهد که HPGR محصول ریزتری تولید کرده است (شکل ۴) که با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد [۲۲]. پالم ریز بودن محصول حاصل از خردایش تحت فشار را خردایش بین ذره‌ای که در HPGR اتفاق می‌افتد مرتبط دانست [۲۳].

مقادیر P80 برای محصول JC به‌ترتیب ۲/۲۸ و برای محصول HPGR ۱/۶۹ میلی‌متر بدست آمده است. آسیابکنی محصولات سنگ‌شکن فکی و HPGR در مدار بسته تا ۱۵۰- میکرون (شکل ۵) نشان می‌دهد که با کاهش سایز ذرات تاثیر خردایش تحت فشار کاهش می‌یابد اما محصول HPGR همچنان ریزتر است.



شکل ۴- توزیع ابعادی محصول سنگ شکنی فکی و HPGR



شکل ۵- توزیع ابعادی محصول سنگ شکنی فکی و HPGR بعد از آسیابکنی تا ابعاد ۱۵۰ میکرون در مدار بسته

آورده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج اختلاف مشهودی باهم نداشته و از حدود اطمینان بالایی دارد.

جدول ۵- مقادیر  $D_w$  و  $K_d$  برای محصول HPGR و JC

$K_d(\%)$		$D_w(\text{mm})$	
HPGR	JC	HPGR	JC
۱۰٫۸۸	۸٫۱۴	۰٫۸۱	۱٫۲۵

جدول ۶- مقایسه مقادیر محاسبه شده تابع شکست با نرم افزار Excell و KMPCSim برای فراکسیون ۲٫۳۸۰-۳٫۳۳۶ میلی‌متر

روش بقوبه				
نرم افزار KMPCSim		نرم افزار Excell		شماره سرند (i)
HPGR	سنگ شکنی سنتی	HPGR	سنگ شکنی سنتی	
۱	۱	۱	۱	۱
۰٫۵۳۹	۰٫۴۷۳	۰٫۵۳۹	۰٫۴۷۴	۲
۰٫۳۴۱	۰٫۲۵۸	۰٫۳۴۱	۰٫۲۵۸	۳
۰٫۲۵۱	۰٫۱۷۸	۰٫۲۵۲	۰٫۱۷۹	۴
۰٫۱۶۰	۰٫۱۰۲	۰٫۱۶۰	۰٫۱۰۲	۵
۰٫۰۷۱	۰٫۰۵۶	۰٫۰۷۱	۰٫۰۵۶	۶
۰٫۰۴۳	۰٫۰۳۸	۰٫۰۴۳	۰٫۰۳۹	۷
روش هربست فورستانو				
نرم افزار KMPCSim		نرم افزار Excell		شماره سرند (i)
HPGR	سنگ شکنی سنتی	HPGR	سنگ شکنی سنتی	
۱	۱	۱	۱	۱
۰٫۵۷۸	۰٫۵۰۹	۰٫۵۷۷	۰٫۵۰۹	۲
۰٫۴۶۳	۰٫۴۲۴	۰٫۴۶۳	۰٫۴۲۴	۳
۰٫۳۹۴	۰٫۳۷۰	۰٫۳۹۵	۰٫۳۷۰	۴
۰٫۳۵۱	۰٫۳۳۴	۰٫۳۵۲	۰٫۳۳۴	۵
۰٫۳۱۱	۰٫۳۰۷	۰٫۳۱۰	۰٫۳۰۷	۶
۰٫۲۳۰	۰٫۲۸۸	۰٫۲۹۹	۰٫۲۸۷	۷
روش هربست فورستانو اصلاح شده				
نرم افزار KMPCSim		نرم افزار Excell		شماره سرند (i)
HPGR	سنگ شکنی سنتی	HPGR	سنگ شکنی سنتی	
۱	۱	۱	۱	۱
۰٫۷۲۲	۰٫۶۵۵	۰٫۷۲۱	۰٫۶۵۵	۲
۰٫۵۲۹	۰٫۵۰۱	۰٫۵۲۹	۰٫۵۰۱	۳
۰٫۴۵۴	۰٫۴۲۳	۰٫۴۵۴	۰٫۴۲۳	۴
۰٫۳۷۲	۰٫۳۴۸	۰٫۳۷۲	۰٫۳۴۷	۵
۰٫۳۲۷	۰٫۲۳۰	۰٫۳۲۷	۰٫۲۹۹	۶
۰٫۳۱۲	۰٫۲۸۶	۰٫۳۱۱	۰٫۲۸۶	۷

برای بررسی محصول خردایش با HPGR و خردایش به روش سنتی، میانگین وزنی اندازه ذرات ( $D_w$ ) و ضریب تغییرات آن ( $K_d$ ) از رابطه ۱۷ محاسبه شد:

$$K_d = \frac{\sqrt{\sum (d_i - D_w^2) r_i}}{D_w} \quad (17)$$

$$D_w = \frac{\sum r_i d_i}{\sum r_i}$$

که در آن:

$D_w$ : میانگین وزنی اندازه ذرات (میلی‌متر)

$K_d$ : ضریب تغییرات اندازه ذرات (درصد)

$d_i$ : میانگین عددی هر فراکسیون (میلی‌متر)

$r_i$ : درصد وزنی هر سایز

$D_w$ : میانگین وزنی هر فراکسیون (میلی‌متر) [۲۴].

همانطور که در جدول ۵ مشخص است محصول HPGR،  $D_w$  کمتر و  $K_d$  بیشتری نسبت به محصول سنگ شکن فکی دارد و این به این معنی است که HPGR محصول دانه ریزتر با محدوده ابعاد وسیع‌تری ایجاد کرده است که می‌تواند به علت اختلاف مکانیزم شکست در لبه‌ها و لایه فشاری باشد. بنابراین HPGR با اینکه ذرات ریزتری تولید کرده است ولی اندازه ذرات نسبت به محصول سنگ شکن فکی غیریکنواخت‌تر بوده که مشابه نتایج بدست آمده توسط مطالعات پیشین بود [۲۴].

#### ۴-۳- نتایج اندیس کار باند

اندیس کار باند برای محصول JC و HPGR به ترتیب ۱۱٫۹۸ و ۱۱٫۰۸ بدست آمد و مشاهده شد خردایش با HPGR باعث کاهش اندیس کار باند در آسیای گلوله‌ای شده است. جانکویک وجود میکروترک در محصول HPGR عامل اصلی کاهش اندیس کار باند بیان کرده است [۲۵]. کاهش اندیس کار به معنی کاهش مقاومت و ضعیف‌شدگی ذرات در برابر نیروی خردایش است؛ بنابراین با افزایش ظرفیت آسیا در مدارهای مختلف همراه است. این امر موجب کاهش میزان مصرف انرژی به ازای واحد تن در مدارهای پایین‌دستی می‌شود [۵].

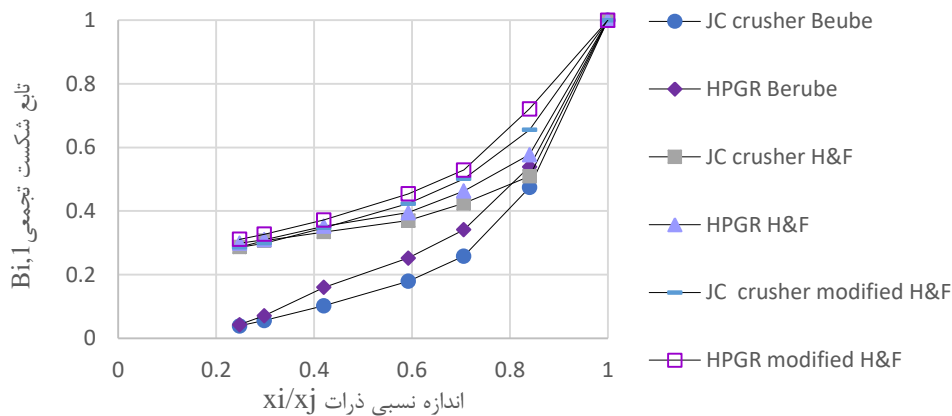
#### ۴-۴- نتایج تابع شکست و انتخاب

تابع شکست و انتخاب با استفاده از نرم‌افزار Excell و KMPCSim به سه روش بقوبه، هربست فورستانو و هربست فورستانو اصلاح شده محاسبه شد و نتایج بدست آمده از هر دو روش برای فراکسیون ۲٫۳۸۰+۳٫۳۶۰ میلی‌متر در جدول ۶

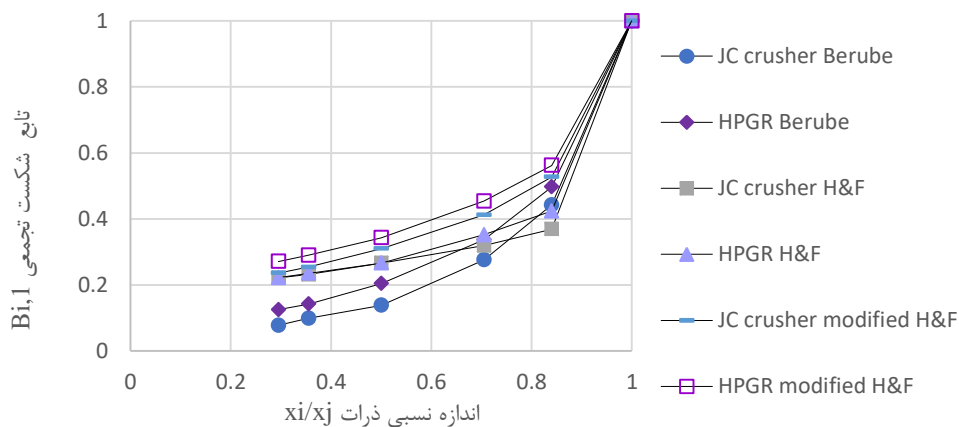
تابع شکست تجمعی بدست آمده از محصول HPGR بیشتر از سنگ شکن فکی است و این به این معنی است که کسری از مواد که از اندازه اولیه شکسته شده و کمتر از اندازه  $i$  است، در حالت خردایش با HPGR بیشتر است و به عبارتی محصول HPGR پس از یک بار شکست محصول ریزتری تولید می کند. این موضوع نشان می دهد که محصول HPGR مقاومت کمتری در برابر خردایش دارد که می تواند به علت ضعیف شدگی ذرات و شکست از مرز ذرات در سیستم خردایش HPGR باشد. همچنین با محاسبه تابع شکست غیرتجمعی  $bi_{i,1}$  که بیانگر درصد مواد باقی مانده روی سرند بعد از یک بار شکست است، مشاهده می شود که این مقدار برای محصول HPGR در سرندهای بزرگتر کاهش و در سرندهای کوچکتر افزایش یافته است و این امر نیز نشان دهنده این است که HPGR محصول ریزتری تولید می کند (جدول ۷ و ۸).

تابع شکست تجمعی بدست آمده از محصول HPGR و سنگ شکنی به روش سنتی برای فراکسیون های  $(+۲/۳۸۰)$  و  $(-۳/۳۶۰)$ ،  $(+۲)$  و  $(-۲/۳۸۰)$ ،  $(-۲+۱/۶۸۰)$ ،  $(-۱/۶۸۰+۱/۴۱۰)$  و  $(+۱-۱/۴۱۰)$  میلی متر به سه روش بقوبه، H & F و H & F اصلاح شده در شکل های ۷ تا ۱۱ آورده شده است. نمودار نیمه لگاریتمی کسر مواد باقی مانده روی سرند برای فراکسیون های ابعادی در شکل ۱۲ آورده شده است که آن شیب خط نمودار مقدار تابع شکست برای سرند اول ( $S_j$ ) نشان می دهد. نتایج به دست آمده برای تابع انتخاب در جدول ۹ آورده شده است.

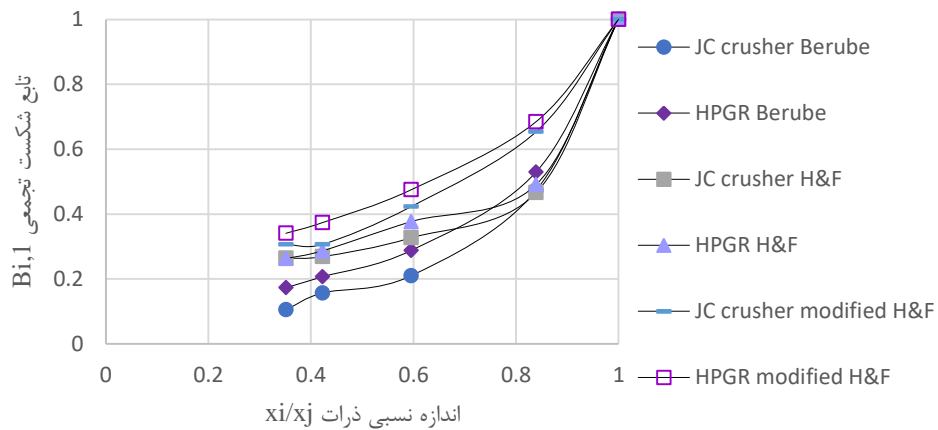
نتایج بدست آمده نشان داد که تابع شکست هر چهار نمونه غیرقابل نرمال شونده است. در ادامه نتایج مشاهده شد با وجود اینکه روش های استفاده شده نتایج مختلفی نشان دادند ولی در هر سه روش در اغلب فراکسیون ها مقادیر توابع شکست تجمعی



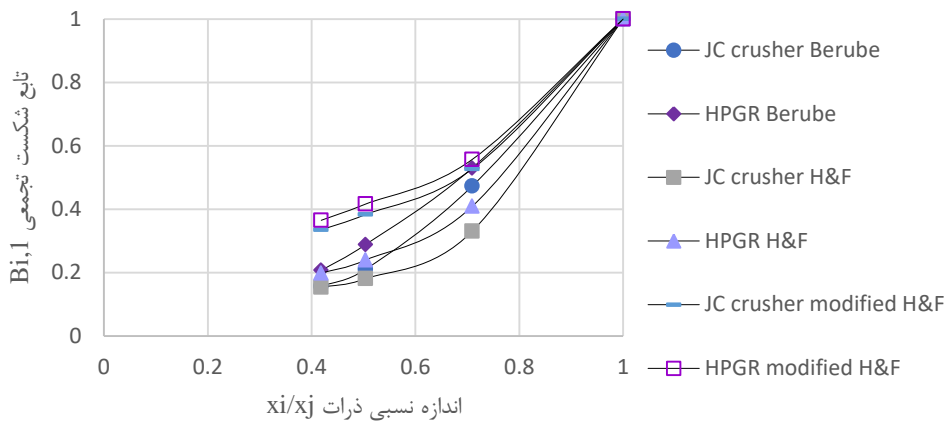
شکل ۳- نمودار تابع تجمعی شکست در حالت خردایش با HPGR و خردایش به روش سنتی برای اندازه  $+۲/۳۸۰$  - میلی متر به روش بقوبه، H & F و H & F اصلاح شده



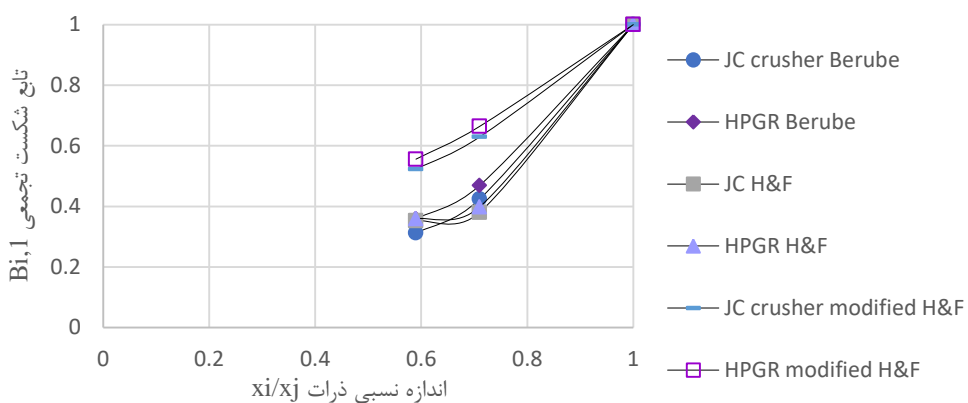
شکل ۸- نمودار تابع تجمعی شکست در حالت خردایش با HPGR و خردایش به روش سنتی برای اندازه  $+۲/۳۸۰$  - میلی متر به روش بقوبه، H & F و H & F اصلاح شده



شکل ۹- نمودار تابع تجمعی شکست در حالت خردایش با HPGR و خردایش به‌روش سنتی برای اندازه  $1.68 + 2.00$  میلی‌متر به روش بقوبه، H & F و اصلاح‌شده H & F



شکل ۱۰- نمودار تابع تجمعی شکست در حالت خردایش با HPGR و خردایش به‌روش سنتی برای اندازه  $1.41 + 1.68$  میلی‌متر به روش بقوبه، H & F و اصلاح‌شده H & F



شکل ۱۱- نمودار تابع تجمعی شکست در حالت خردایش با HPGR و خردایش به‌روش سنتی برای اندازه  $1.00 + 1.41$  میلی‌متر به روش بقوبه، H & F و اصلاح‌شده H & F

مواد درصد بیشتری از مواد خرد می‌شوند و در این سایز به بیشترین مقدار رسیده و پس از آن کاهش می‌یابند. این امر

نتایج مقادیر تابع انتخاب برای هر دو نمونه ابتدا افزایش و بعد از سایز  $1.680 - 1.410$  کاهش می‌یابد؛ یعنی با ریزتر شدن



جدول ۹- تابع انتخاب بدست آمده از خردایش با HPGR و سنگ شکن فکی

نرم افزار KMPCSim			نرم افزار Excell			محدوده دانه بندی (میلی متر)
اختلاف نسبی (درصد)	Si		اختلاف نسبی (درصد)	Si		
	HPGR	سنگ شکن فکی		HPGR	سنگ شکن فکی	
۲۲,۱۵۵	۰,۰۲۰۴	۰,۰۱۶۷	۲۲,۸۹۱	۰,۰۲۰۴	۰,۰۱۶۶	-۳,۳۳۶ + ۲,۳۸
۲۵,۸۹۶	۰,۰۳۱۶	۰,۰۲۵۱	۲۶,۲۹۴	۰,۰۳۱۷	۰,۰۲۵۱	-۲,۳۸ + ۲,۰۰
۲۴,۰۴۵	۰,۰۳۲۵	۰,۰۲۶۲	۲۴,۰۴۵	۰,۰۳۲۵	۰,۰۲۶۲	-۲,۰۰ + ۱,۶۸
۲۳,۰۲۸	۰,۰۳۹۰	۰,۰۳۱۷	۲۴,۸۴۰	۰,۰۳۹۲	۰,۰۳۱۴	-۱,۶۸ + ۱,۴۱
۲۶,۵۹۹	۰,۰۳۷۶	۰,۰۲۹۷	۲۴,۷۴۹	۰,۰۳۷۳	۰,۰۲۹۹	-۱,۴۱ + ۱,۰۰

جدول ۱۰- پارامترهای مدل برادبنت و کالکات را در حالت خردایش با HPGR و خردایش به روش سنتی

اختلاف نسبی (درصد)		HPGR		سنگ شکنی معمولی		شماره سرند (i)
$\gamma$	$\Phi$	$\gamma$	$\Phi$	$\gamma$	$\Phi$	
۴۷,۶۹	۴,۵	۰,۵	۰,۵۲۲۵	۰,۹۵۵۹	۰,۵	۱
۳۰,۳۰	۰	۰,۷۱۵۱	۰,۵	۱,۰۲۶	۰,۵	۲
۲۹,۵۴	۶,۶۸	۰,۵	۰,۵۳۳۴	۰,۷۰۹۷	۰,۵	۳
۸,۹۵	۴,۷	۰,۵	۰,۵۲۳۵	۰,۵۴۹۲	۰,۵	۴
۴,۳۹	۲۸,۲۸	۰,۵۵۲۱	۰,۷۴۷۸	۰,۵۴۶۱	۰,۵۸۲۹	۵

تجهیز باشد. همچنین این پارامتر در فراکسیون‌های مختلف به دلیل غیرنرمال بودن توابع شکست متغیر است

#### ۵- نتیجه گیری

- HPGR باعث کاهش  $P_{80}$  می شود ولی وقتی نمونه‌ها با آسیای گلوله‌ای خرد می شوند این اختلاف کمتر می شود. همچنین بررسی مقادیر  $K_d$  نشان می دهد که محصول HPGR دارای محدوده وسیعی از ذرات است که می تواند به علت اختلاف مکانیزم خردایش در لبه و لایه تحت فشار باشد.
- نتایج تابع شکست  $(B_{i,1})$  که به سه روش بقوبه، هریست فورستانو و هریست فورستانو اصلاح شده اندازه گیری شد، نشان داد که تقریباً در همه فراکسیون‌ها، HPGR باعث افزایش تابع شکست شده است. این امر نشان می دهد HPGR کارایی خردایش بیشتری نسبت به سنگ شکن فکی دارد.
- تابع انتخاب تا یک اندازه معین بیشتر شده و بعد از آن کم می شود که می تواند به علت هم سایز انتخاب کردن گلوله‌ها باشد ولی، محصول HPGR تابع انتخاب بزرگ تری نسبت به سنگ شکنی سنتی دارد یا به عبارتی آهننگ شکست

جدول ۱۰ پارامترهای مدل برادبنت و کالکات را در حالت خردایش با HPGR و خردایش به روش سنتی مقایسه می کند. در صورتی که خردایش در شرایط مشابه و برای ماده مشابه انجام شود مقدار  $\beta$  را به عنوان یک ویژگی ثابت از آن ماده در نظر گرفته می شود. در بسیاری از مطالعات تجربی و کاربردهای صنعتی مقدار  $\beta$  برای کانی‌های آهن مقدار ثابت ۳/۵ در نظر گرفته شده است [۲۷، ۲۸]. پارامتر  $\gamma$  توصیف کننده مقدار مواد دانه ریز و درشت تولید شده از بالاترین طبقه سرندي است؛ به عبارتی مقادیر بالای آن نشان دهنده این است که توزیع ذرات ناشی از شکست سنگ نزدیک به بزرگ ترین فراکسیون و مقادیر پایین آن، بیان کننده خردایش ریزتر و موثرتر است [۲۹]. HPGR باعث کاهش پارامتر  $\gamma$  شده است که با کوچکتر شدن ذرات این اختلاف کم شده است و همان طور که در بررسی توابع شکست نیز آورده شد، HPGR محصول دانه ریزتری تولید می کند. پارامتر  $\Phi$  به توزیع اندازه ذرات شکسته شده بعد از یک مرحله شکست اشاره دارد و افزایش آن نشان دهنده افزایش شکستگی ذرات به اندازه‌های ریزتر، توزیع وسیع تر اندازه ذرات و بهبود کارایی خردایش است [۳۰]. پارامتر  $\Phi$  هنگام خردایش با HPGR افزایش یافته است که می تواند به علت مکانیزم تحت فشار و ایجاد ریزترک‌ها در این

13. Rule, C., D. Minnaar, and G. Sauermann, *HPGR-revolution in platinum?* Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. 109(1): p. 23-30.
14. Kessler, M. and E. Burchardt, *HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS—A PROMISING AND COST-EFFECTIVE TECHNOLOGY OF ORE PRETREATMENT IN MINERAL PROCESSING.* Eurasian Mining, 2015. 1: p. 13-16.
15. Gardula, A., et al. *First Year of Operation of HPGR at Tropicana Gold Mine—Case Study.* in *Proceedings of the 8th International Conference on Autogenous Grinding, Semi-autogenous Grinding and High-Pressure Grinding Roll Technology, Vancouver, BC, Canada.* 2015.
16. Carter, R.A., *HPGRs Grind Out Larger Role in Plant Productivity.* Engineering and Mining Journal, 2020. 221(10): p. 44-47.
17. Herbst, I. and D. Fuerstenau, *The zero order production of fine sizes in comminution and its implications in simulation.* ~rans. AiME 241, 538, 1968. 548.
18. Ipek, H., *Effect of grinding media shapes on breakage parameters.* Particle & Particle Systems Characterization, 2007. 24(3): p. 229-235.
19. Fuerstenau, D., A. De, and P. Kapur, *Linear and nonlinear particle breakage processes in comminution systems.* International Journal of Mineral Processing, 2004. 74: p. S317-S327.
20. Das, A., A. Bück, and J. Kumar, *Selection function in breakage processes: PBM and Monte Carlo modeling.* Advanced Powder Technology, 2020. 31(4): p. 1457-1469.
21. Nomura, S., K. Hosoda, and T. Tanaka, *An analysis of the selection function for mills using balls as grinding media.* Powder technology, 1991. 68(1): p. 1-12.
22. Guo, X., S. Dai, and Q. Wang, *Influence of different comminution flowsheets on the separation of vanadium titanomagnetite.* Minerals Engineering, 2020. 149: p. 106268.
23. Palm, N., et al., *The effect of using different comminution procedures on the flotation of sphalerite.* Minerals Engineering, 2010. 23(11-13): p. 1053-1057.
24. Liu, L., et al., *Comparison of grinding characteristics in high-pressure grinding roller (HPGR) and cone crusher (CC).* Physicochemical problems of mineral processing, 2017. 53.
25. Jankovic, A., et al., *Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an air classifier.* Minerals engineering, 2015. 71: p. 133-138.

سریع‌تری دارد.

- برآزش مدل برادبنت و ثابت کرد که محصول HPGR نسبت به سنگ‌شکنی سنتی مقدار  $\gamma$  کمتری نشان می‌دهد که این خود نشان‌دهنده ذرات ریزتر تولیدی با HPGR است.
- افزایش مقدار  $\Phi$  در محصول HPGR نشان‌دهنده توزیع وسیع‌تر از ذرات است و وجود مقادیر مختلف  $\Phi$  نشان‌دهنده این موضوع است که توابع شکست نمونه‌ها غیرنرمال شونده است.

#### منابع

1. Tromans, D., *Mineral comminution: energy efficiency considerations.* Minerals engineering, 2008. 21(8): p. 613-620.
2. Kelly, E.G. and D.J. Spottiswood, *Introduction to mineral processing.* 1982.
3. Napier-Munn, T.J., et al., *Mineral comminution circuits: their operation and optimisation.* 1996.
4. Van der Meer, F.P. and A. Gruendken, *Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls.* Minerals Engineering, 2010. 23(9): p. 663-669.
5. Tavares, L., *Particle weakening in high-pressure roll grinding.* Minerals Engineering, 2005. 18(7): p. 651-657.
6. Schönert, K., *A first survey of grinding with high-compression roller mills.* International Journal of Mineral Processing, 1988. 22(1-4): p. 401-412.
7. Anticoi, H., et al., *Breakage function for HPGR: Mineral and mechanical characterization of tantalum and tungsten ores.* Minerals, vol. 8, no. 4. 2018.
8. Daniel, M.J. and S. Morrell, *HPGR model verification and scale-up.* Minerals Engineering, 2004. 17(11-12): p. 1149-1161.
9. Morrell, S., F. Shi, and L. Tondo. *Modelling and scale-up of high pressure grinding rolls.* in *Proc. XX International Mineral Processing Congress, eds. HB von Blottnitz and H. Hohberg.* 1997.
10. Wang, C., *Development of a comprehensive HPGR model using large experimental data sets.* 2021, University of British Columbia.
11. Schönert, K. *Aspects of the physics of breakage relevant to comminution.* in *Fourth Tewksbury Symposium, University of Melbourne.* 1979.
12. Palaniandy, S., R. Halomoan, and H. Ishikawa, *TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit—The multi-component approach.* Minerals Engineering, 2019. 133: p. 10-18.

29. Makokha, A.B. and M.H. Moys, *Towards optimising ball-milling capacity: effect of lifter design*. Minerals Engineering, 2006. 19(14): p. 1439-1445.
30. Tavares, L.M. and R.M. de Carvalho, *Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills*. Minerals Engineering, 2009. 22(7-8): p. 650-659.
31. Aminalroaya, A. and P. Pourghahramani, *Investigation of particles breakage and weakening behaviors in multi-component feed grinding by High Pressure Grinding Rolls (HPGR)*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022. 43(2): p. 217-232.
26. Barani, K. and H. Balochi, *Comparative study on the effect of using conventional and high pressure grinding rolls crushing on the ball mill grinding kinetics of an iron ore*. Physicochemical problems of Mineral processing, 2016. 52.
27. Austin, L.G., et al., *Simulation of wet ball milling of iron ore at Carajas, Brazil*. International Journal of Mineral Processing, 2007. 84(1-4): p. 157-171.
28. Barani, K. and A. Omarzehi, *Comparative Study of the Breakage Mechanisms on Minerals Liberations and Particles Shape in the Flotation of Copper Sulfide Ore*. Journal of Mineral Resources Engineering, 2021. 6(2): p. 105-122.