



The Impact of Key Operating Conditions on Grinding Media Consumption in the SAG Mill of Sungun Copper Complex

Behzad Nemati Akhgar^{1*}, Mehdi Soleymani², Ramin Feyzi³, Parviz Pourghahramani⁴, Abolfazl Danesh⁵

¹Assistant Professor, Mining Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

³MSc, Mining Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran.

⁴Professor, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

⁵MSc, Mineral Processing Plant, Sungun copper complex, Tabriz, Iran.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article Type:

Original Research

Received: 10.23.2023

Revised: 02.16.2024

Accepted: 03.10.2024

Keyword:

Sungun Copper Complex

Comminution

Semi-autogenous Grinding

Grinding Media

*Corresponding Author:

Behzad Nemati Akhgar

Email: b.n.akhgar@urmia.ac.ir

The industrial data gathered from the control room of the Phase 2 plant and the initial processing of the data were utilized in the SIMKA software which determined 13 parameters affecting the consumption of media in semi-autogenous grinding. Based on the results, it was found that in multivariate analysis methods, the amount of filling increases with increasing input tonnage. The filling is directly related to input tonnage and power and is associated with ball charge, which increases with increasing ball charge. By increasing the level of the grinding load, the amount of mineral-mineral collision decreases, and the ball-ball collision increases, causing the consumption of grinding media. The simulation results clearly showed that in the face of the problems created, instead of changing the size of the balls and enlarging them, which leads to the breaking of liners and nets, it is recommended to increase the percentage of ball accumulation to its maximum (%15), particularly in hard feed. This study clearly shows that the effect of particle size is even greater than the effect of particle hardness.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The assigned project had a completely case-by-case view of SAG mill of Sungun and was carried out in order to investigate the key operating conditions in the amount of consumption of the cutting agent in SAG mill, Phase 2 of Sungun Copper Complex. Therefore, first, an overview of the goals and results obtained from previous research was conducted.

In 2018, Paul W. Cleary and colleagues conducted research on the development of models related to the shape and load of the charge to the performance parameters of SAG mill bearings and their use in the design of milling systems to calculate liner wear [1-4]. In 2020, Kiyoshi et al. conducted studies on the analysis of the operation of SAG mill under different conditions based on DEM and failure energy method. In order to obtain the optimal performance parameters of a SAG mill, in this paper, the Discrete Element Method (DEM) was used to simulate the particle breaking process by controlling three parameters, namely the mill speed ratio, mill filling level and steel ball ratio [9]. Previous studies show that the total energy distribution among different types of collisions changes only slightly with the increase in the speed of the collision. There is a slight decrease in total energy from stone to stone and stone to stone, while stone to stone is constant. The structure of the spectrum changes slightly with the location of the modal peak, and the energy dissipation rate also increases slowly. The rate of energy loss in the middle and upper parts of the collision energy range also increases.

Methodology

Initially, the operating parameters effective in the working conditions of the SAG mill were identified. The operating parameters of the SAG mill were input tonnage, power, speed, input torque, output torque, reject tension, solid percentage, filling percentage, bullet charge, liner profile, input feed granulation, pH and water consumption, and metallurgical data which were collected for 6 months (from the first of April to the end of September). Then, initial processing was carried out on the data.

Based on the investigations, there were two locations for the preparation of suitable samples of the feed entering the factory. The first location was next to the feeding bar for the SAG mill inside the factory shed. The second location to prepare this sample was the tunnel located under the mine's coarse stone warehouse after the belt feeders (apron feeder and vibrating feeder). The value of the bond ball work index was calculated using the following equation:

$$W_i \left(\frac{Kwb}{shr} \right) = \left(\frac{11/76}{P_i^{0/23}} \right) \left(\frac{1}{G_i^{0/75}} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{10}{P_{80}} - \frac{10}{F_{80}}}} \right) \quad (1)$$

Considering the obtained apparent density, the weight equivalent to 207 cubic centimeters of the mineral was determined and after transferring the materials and bullets into Asia for a certain number of rounds, it started at 86 rpm.

Impact fracture testing

To perform this test, stones with different dimensions were selected and placed under different energies to break. To apply different energies, a drop-load device was used. Using the following relationship, the height of the weight can be calculated as below:

$$E_{cs} = \frac{0.0272M_d(h_i - h_f)}{m} \quad (2)$$

Semi-autonomous power index test (SPI)

The main goal of this experiment was to obtain a relationship to determine the specific energy in an industrial SAG mill according to the size of the final product (P80) and the hardness of the stone. Specific energy was the power required to crush one ton per hour of mineral material in a certain size. Using the following empirical relationship, the required power for an industrial SAG mill was calculated as follows:

$$(Kwh / t) = (P_{80})^{-0.33} (2/2 + 0/t) \quad (3)$$

Results and discussion

Multivariate modeling and principal components showed that the metallurgical data obtained from the performance of the SAG mill can be modeled with two principal components, which can include the variance of the existing data with ($R^2=0.741$) and fit them well and predict with power ($Q^2=0.495$).

The reason for the low values of Q^2 was probably due to some measurement parameters not being well described by the model. By checking the parameters such as profile liner and granularity well by the model indicates that it is as low as the fit indices of the model. However, based on the values obtained for the modeling indices of the fitted model, the model was evaluated as acceptable and at the level of a good model.

Weighted chart analyses

Input tonnage, input tranion, filling percentage, and solid percentage were directly related to each other and had opposite relationships with liner profile and input feed granulation. On the other hand, the grouping of the data shows that the relationship of the data such as the input tranion pressure with the percentage of filling was positive, which increased with the increase of the tranion pressure and vice versa. Bullet charge had a positive relationship with output tranion pressure and power consumption. The more the bullet charge increased, the greater the power consumption.

Low power consumption is a sign of low input tonnage or low filling percentage, which increases with the increase of input tonnage of power consumption. By changing operational parameters such as increasing and decreasing the speed of grinding, the

dominant method changes, as the speed increases acts abrasively and the amount of bullets increases. The results of the data analysis with the greatest effect on the consumption of the crushing medium (factors such as the density, the amount of filling, the liner profile, and the granulation of the input feed) had the greatest effect on the consumption of pellets.

Conclusion

According to the results of the bond index, impact fracture, and SAG mill power index (SPI) tests, the feed is hard in terms of impact crushing and soft in terms of abrasion crushing, and increased power consumption. However, due to the lack of proportion in the input granularity, a huge difference in energy consumption was observed. Therefore, this study clearly demonstrates that the effect of particle size is even greater than the effect of particle hardness.

بررسی تاثیر شرایط عملیاتی کلیدی بر میزان مصرف واسطه خردایش در آسیای نیمه خودشکن فاز ۲ مجتمع مس سونگون

بهزاد نعمتی اخگر^{۱*}، مهدی سلیمانی^۲، رامین فیضی^۳، پرویز پورقهرمانی^۴، ابوالفضل دانش^۵

۱- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۳- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

۵- کارشناسی ارشد، مجتمع مس سونگون، تبریز، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

کلید واژگان:

مجتمع مس سونگون

خردایش

آسیای نیمه خودشکن

مصرف واسطه خردایش

در این تحقیق با استفاده از داده‌های صنعتی مستخرج از اتاق کنترل کارخانه و پرازش‌های اولیه روی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار ۱۳ (SIMCA)، پارامتر تاثیرگذار در مصرف واسطه در آسیای نیمه خودشکن مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج بدست آمده از روش‌های آنالیز چند متغیره مشخص گردید که با افزایش تناژ ورودی میزان پرشدگی افزایش می‌یابد. همچنین مقدار پرشدگی با تناژ ورودی و توان مصرفی ارتباط مستقیم دارد و با شارژ گلوله همراه است که با افزایش شارژ گلوله مصرف گلوله افزایش می‌یابد. با افزایش تراز بار خردکننده مقدار برخورد کانی به کانی کاسته می‌شود و برخورد گلوله به گلوله افزایش می‌یابد که این موضوع باعث مصرف واسطه خردایش می‌شود. نتایج حاصل از شبیه سازی به وضوح نشان داد که به‌جای تغییر در اندازه گلوله‌ها و بزرگتر کردن آنها که شکسته شدن آسترها و شبکه‌ها را در پی دارد، بهتر است درصد انباشتگی گلوله‌ها تا حد بیشینه آن (۱۵٪) افزایش یابد و بخصوص در مورد خوراک سخت از ماکزیمم پرشدگی گلوله استفاده شود. این مطالعه به صراحت نشان می‌دهد که تاثیر ابعاد ذرات ورودی بر روی خردایش حتی از تاثیر سختی آنها نیز بیشتر است.

*نویسنده مسئول: بهزاد نعمتی اخگر

پست الکترونیکی:

b.n.akhgar@urmia.ac.ir

مقدمه

کلیری و اون^۱ [۱] در مورد توسعه مدل‌های مربوط به شکل و بار شارژ به پارامترهای عملکرد آسیای نیمه خودشکن و استفاده از آنها در طراحی سیستم‌های آسیاکنی برای محاسبه سایش آستر تحقیقاتی را انجام دادند. مجموعه‌ای از ۲۲ شبیه‌سازی (DEM)^۲ سه‌بعدی برای درک و تعیین ارتباط بین مکان‌های بار اصلی و سه پارامتر مهم عملیاتی سطح پر کردن، ارتفاع بالابر و سرعت آسیا برای آسیای نیمه خودشکن عمومی استفاده می‌شود. شکل و محل بارگذاری با موقعیت شانه بار، پاشنه بار و فشار ضربه‌ای مشخص می‌شود و با تجزیه و تحلیل مسیر ذرات و تغییرات فشار بر روی آستر ارزیابی می‌شود. بر اساس نتیجه حاصل از این تحقیق مدل‌های پارامتری که به‌عنوان بهترین تناسب با داده‌های آسیا (DEM) ایجاد شده‌اند که برای ارتباط این ویژگی‌ها بین شکل بار و قدرت جذب به‌صورت پارامترهای عملیاتی استفاده می‌شوند. آنها همچنین امکان پیش‌بینی معکوس سطح پر کردن و ارتفاع بالابر (حالت سایش) از اندازه‌گیری ساختار بار و سرعت آسیا را دارند. چنین مدل‌هایی را می‌توان برای تفسیر داده‌های اندازه‌گیری تجربی برای آسیاهای نیمه خودشکن و استنباط ساختار بار استفاده کرد. این مقاله همچنین بررسی می‌کند که چگونه می‌توان از چنین مدل‌های عملیاتی برای ایجاد استراتژی‌های مدیریت عملیاتی (از نظر نحوه تغییر متغیرهای کنترلی مانند سطح پر کردن آسیا و سرعت آسیا) به‌منظور حفظ ویژگی‌های عملکردی انتخاب شده در چرخه عمر سایش آستر استفاده کرد [۲-۴].

لارسن^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۰ در مورد یک رویکرد جدید برای مدل‌سازی فعل‌و‌انفعالات فیزیکی بین محیط‌های پالپ آسیا و ساختار آسیا در آسیای‌های گلوله‌ای تحقیقاتی را انجام دادند [۵]. خرد کردن در یک فرایند مهم در صنعت فراوری مواد معدنی است. مدل‌سازی اختلاط تر در آسیاهای گلوله‌ای نیاز به مدل‌سازی هم‌زمان محیط آسیا و پالپ دارد. در مطالعه حاضر یک رویکرد جدید مبتنی بر روابط فیزیکی اساسی و قابل اندازه‌گیری برای مدل‌سازی برهمکنش بین پالپ، محیط آسیا و ساختار آسیا در یک آسیای گلوله‌ای تر استفاده می‌شود. این رویکرد بر اساس اتصال‌های دو طرفه بین مدل‌های^۴ DEM، PFEM و FEM است. برای مدل‌سازی پالپ، DEM برای مدل‌سازی پالپ، برای مدل‌سازی برخورد گلوله‌ها و FEM برای مدل‌سازی ساختار آسیا استفاده شد. پالپ هم به‌عنوان سیال نیوتنی با ویسکوزیته ثابت و هم به‌عنوان سیال غیرنیوتنی با ویسکوزیته وابسته به‌سرعت برشی مدل شد. مدل محاسباتی ارائه شده برای تعیین پویایی مدل‌های برخورد گلوله، قدرت و توزیع انرژی تماس بین ذرات استفاده شد. در نتیجه رویکرد عددی پیشنهادی قادر به نمایش تعاملات بین پالپ، محیط آسیا و ساختار آسیا در یک آسیا گلوله‌ای است. مدل توسعه‌یافته در مطالعه حاضر را می‌توان برای بررسی چگونگی تأثیر ویژگی‌های مختلف پالپ و محیط آسیا و همچنین پارامترهای عملیاتی بر کارایی یک آسیای گلوله‌ای تر استفاده کرد. در نهایت، نتیجه‌گیری می‌شود که مدل عددی حاضر ابزاری قدرتمند برای افزایش دانش و درک خرد کردن تر در آسیاهای گلوله‌ای است [۶-۸].

کیوشی^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۰ درباره تجزیه‌وتحلیل عملیات آسیای نیمه خودشکن تحت شرایط مختلف بر اساس DEM و روش انرژی شکست مطالعاتی را انجام دادند [۹]. به‌منظور به‌دست‌آوردن پارامترهای عملکرد مطلوب یک آسیای نیمه خودشکن، در این مقاله از روش عنصر گسسته (DEM) برای شبیه‌سازی فرآیند شکست ذرات با کنترل سه پارامتر، یعنی نسبت سرعت آسیا، سطح پر شدن آسیا و نسبت گلوله فولادی استفاده می‌شود. این روش اندازه ذرات، قدرت آسیا و کیفیت ذرات واجد شرایط خرد شده را شبیه‌سازی می‌کند که قدرت آسیا و مصرف انرژی آسیای نیمه خودشکن را نشان می‌دهد. در این مقاله، تغییرات خردایش یک آسیای نیمه خودشکن تحت شرایط پارامترهای مختلف

¹ Cleary & Owen

² Digital Element Model

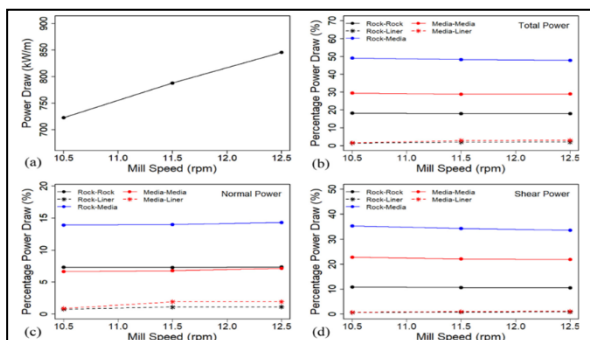
³ Larsson

⁴ Particle Finite Element Method

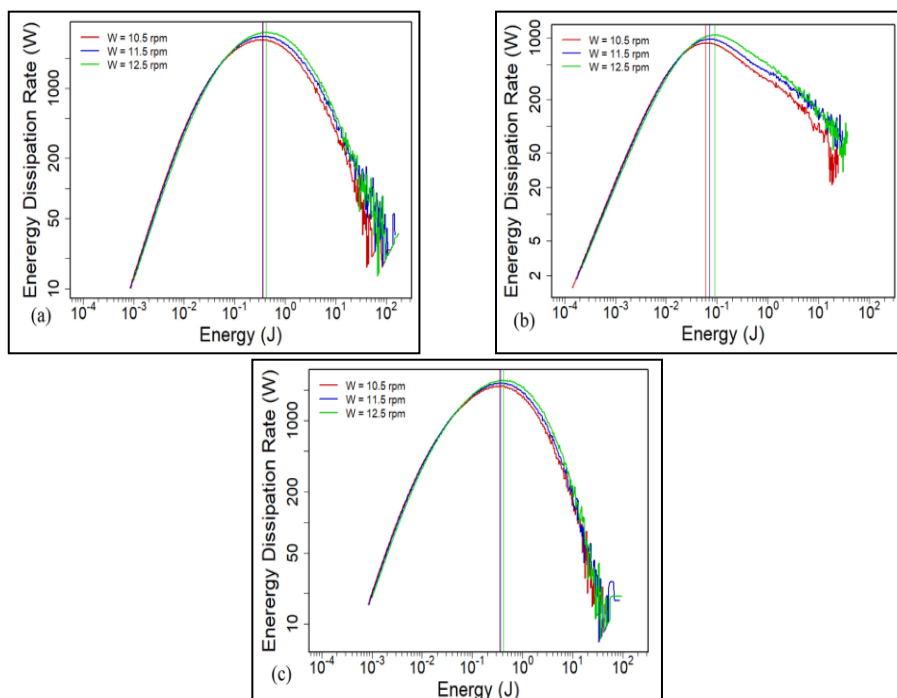
⁵ Xu

مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا آزمایشی در مورد تأثیر تغییر یک پارامتر بر عملکرد آسیا ایجاد می‌شود و سپس تأثیر سه تغییر پارامتر بر عملکرد آسیا مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این تغییرات با اندازه ذرات و قدرت آسیا مشخص می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی تحت مدل مطرح شده نشان می‌دهد که آسیا در شرایط مطلوب زمانی کار می‌کند که آسیا تحت شرایط ۸۰٪ سرعت بحرانی و ۱۵٪ سطح پر شدن و ۱۴٪ نسبت گلوله فولادی قرار گیرد. قدرت آسیا با افزایش نسبت سرعت آسیا به طور خطی افزایش نمی‌یابد؛ اما پس از ۸۵٪ سرعت بحرانی کاهش می‌یابد و در نهایت دوباره افزایش می‌یابد. نسبت بهینه گلوله فولادی در آسیای نیمه خودشکن بستگی به زمان شبیه‌سازی (زمان واقعی کار آسیا) و محدودیت قدرت نامی دارد. سرعت آسیا، نسبت سطح پر کردن و نسبت توپ فولادی می‌تواند به طور قابل توجهی بر خردایش تأثیر می‌گذارد و ایده‌آل‌ترین خردایش مواد که در این مقاله به دست آمده است مرجعی برای آسیای واقعی ارائه می‌دهد که مشابه مدل تحقیق است. هنگام انتخاب نسبت گلوله فولادی، باید زمان کار آسیا را در نظر گرفت [۱۹].

کلیری و اون در سال ۲۰۱۸ موضوع تأثیر تغییرات شرایط عملکرد بر محیط برخورد در آسیای نیمه خودشکن را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در این تحقیق، تغییرات ساختاری کمی در محیط برخورد در آسیای نیمه خودشکن بررسی شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان داد که افزایش سرعت آسیا اثر کمی بر توزیع انرژی برخورد میان انواع متفاوت برخوردها دارد. سه شرط عملیاتی دیگر آسیا همگی به کاهش در شکست ضربه‌ای و افزایش ساییدن منتهی می‌شود وقتی که ارتفاع بالابر کاهش و سطح پرشدگی بار افزایش و نسبت سنگ به گلوله کاهش می‌یابد. DEM در پیش‌بینی حرکت بار در آسیای نیمه خودشکن و توصیف محیط ساییدن از طریق طیف انرژی برخوردی مورد استفاده قرار می‌گیرد که به‌عنوان توزیع احتمال اتلاف انرژی در کل برخوردهای درون آسیا قابل طراحی می‌باشد. جریان نیرو جزء انرژی کاربردی در این نوع برخوردها، ساختار طیف انرژی، مکان پیک انرژی برخورد و سرعت اتلاف انرژی مربوطه جهت بررسی تأثیر سرعت آسیا، ارتفاع بالابر، سطح پرشدگی و ترکیب بار بر عملکرد ساییدن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. هدف این مقاله، اثبات نحوه کاربرد دقیق تر طیف انرژی DEM جهت استنباط و توصیف عملکرد آسیای نیمه خودشکن و استنباط عملکرد عملیاتی آسیای نیمه خودشکن می‌باشد. پیکربندی آستر دارای ۵۶ ردیف بالابر می‌باشد (که با دوبرابر قطر آسیای تناظر دارد) و طرح تهاجمی می‌باشد که مستعد قفل کردن بار در فضاهای نسبتاً باریک میان بالابرها می‌باشد. بزرگترین مولفه مصرف انرژی کل تقریباً ۵۰٪ متعلق به برخوردهای سنگ به واسطه می‌باشد که اهمیت بحرانی واسطه در ایجاد محیط برخوردی درون آسیا را اثبات می‌کند. برخوردهای واسطه به واسطه تقریباً ۳۰٪ جریان نیرو را مصرف می‌کنند این انرژی یا در ساییدن ذرات سنگ ریزتر استفاده می‌شود که در شبیه‌سازی DEM نشان داده نشده‌اند یا در فرسودگی واسطه اتلاف می‌شوند. جزء مصرف انرژی سنگ به سنگ تقریباً ۱۸٪ می‌باشد. دو نوع برخورد نهایی شامل سنگ به آستر و واسطه به آستر هستند که بسیار کوچکند و کمتر از ۲۰٪ را شامل می‌شوند و اساساً شکست سنگ را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند [۱۰]. اشکال ۱ و ۲ نشان می‌دهند که با افزایش سرعت آسیا توزیع انرژی کل میان انواع مختلف برخوردها تنها اندکی تغییر می‌کند. کاهش اندکی در سنگ به واسطه و واسطه به واسطه در انرژی کل وجود دارد درحالی‌که سنگ به سنگ ثابت می‌باشد. ساختار طیف با مکان پیک مودال مقدار کمی تغییر می‌کند و سرعت اتلاف انرژی نیز به آرامی افزایش می‌یابد. در سرعت اتلاف انرژی در بخش‌های میانی و فوقانی دامنه انرژی برخورد نیز افزایش پیدا می‌کند.



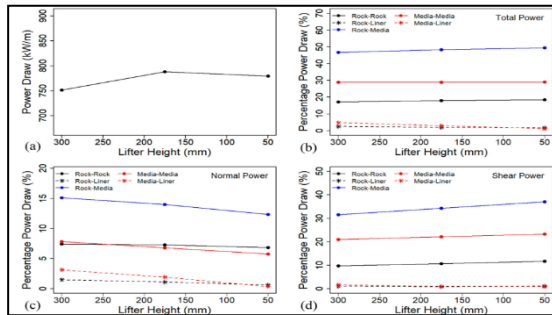
شکل ۱. (a) تغییر در جریان نیرو و توزیع مصرف انرژی با افزایش سرعت آسیا (b) نیروی کل، (c) نیروی نرمال و (d) نیروی برشی در شش نوع برخورد داخل آسیای SAG Mill [۱۰].



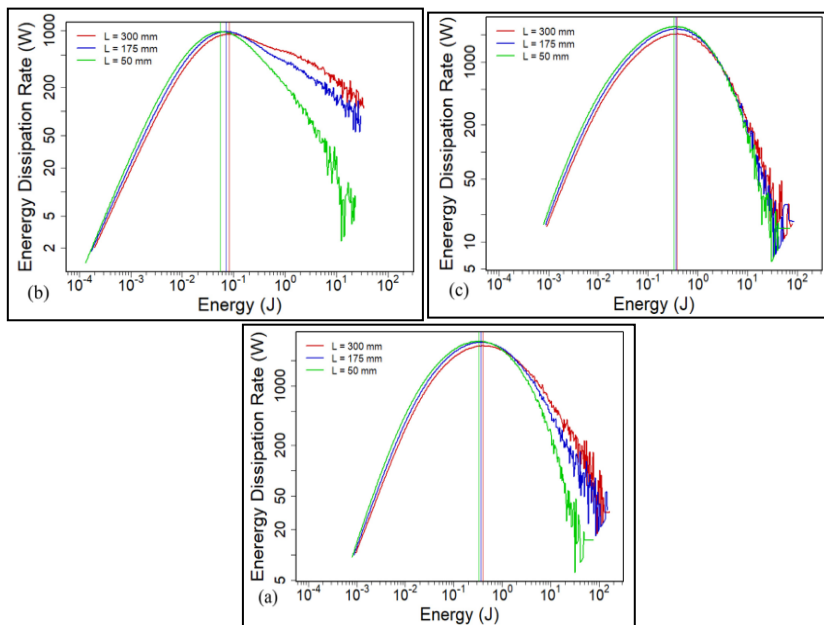
شکل ۲. تغییر در طیف انرژی کل در کل شرایط با افزایش سرعت آسیا (a) انرژی کل، (b) انرژی نرمال و (c) انرژی برشی [۱۰].

همچنین با کاهش ارتفاع بالابر جزء سنگ به واسطه به طور متوسط افزایش می‌یابد و جزء سنگ به سنگ اندکی افزایش می‌یابد درحالی‌که اجزاء واسطه به آستر و سنگ به آستر شدیداً کاهش می‌یابد. کاهش مصرف انرژی به دلیل برخوردهای خطی، کاهش شدید در اندازه جریان ریزشی است و فرسودگی آستر به دلیل عملیات آسیاکنی با جریان ریزشی بزرگ تحمیل می‌شود. کل مولفه‌های انرژی نرمال کاهش می‌یابد با افزایش اتلاف انرژی برشی به گونه‌ای تنظیم

می‌شوند که سهم افزایش برش درون بار را منعکس می‌کند؛ زیرا توسط آستر کاملاً حمایت نمی‌شود وقتی که ارتفاع بالابر کاهش می‌یابد. این توزیع مجدد مصرف انرژی می‌تواند به کاهش شکست ضربه‌ای و به خریدایش سایشی منتهی شود کاهش در انرژی بر خورد می‌تواند به درشت شدن اندک محصول ختم شود. وقتی که بالابرها شدیداً پوسیده می‌شوند جریان نیرو ابتدا افزایش و سپس اندکی کاهش می‌یابد. در اشکال ۳ و ۴ موارد اشاره شده مشخص شده است.

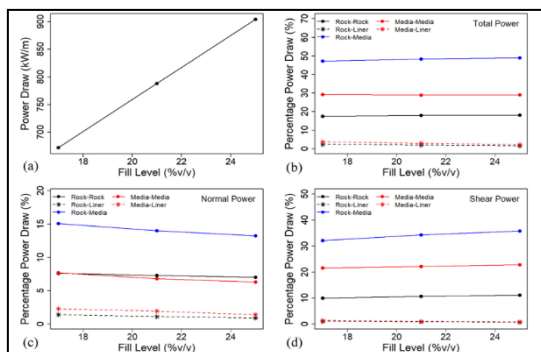


شکل ۳. (a) تغییر در جریان نیرو و توزیع مصرف انرژی با کاهش ارتفاع بالابر، (b) نیروی کل، (c) نیروی نرمال، (d) نیروی برشی در شش نوع برخورد مختلف داخل آسیا SAG Mill [۱۰].

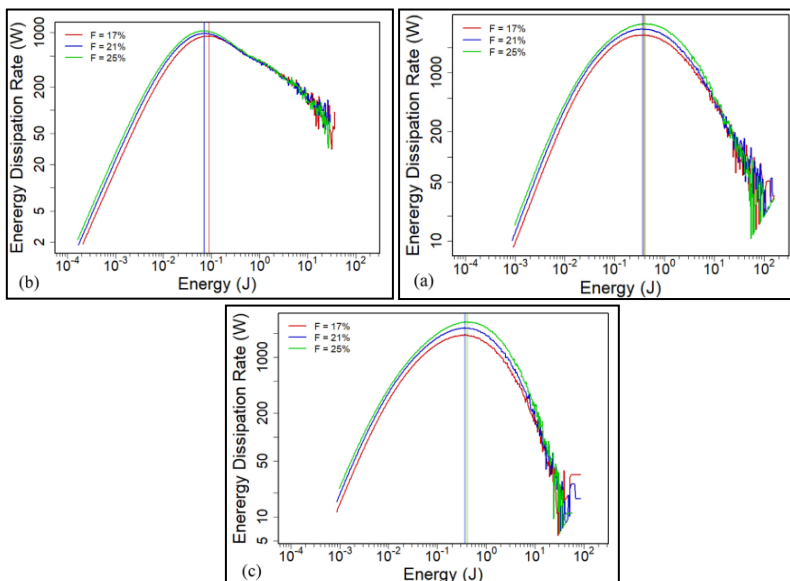


شکل ۴. تغییر در طیف انرژی کل در کل برخوردها با کاهش ارتفاع بالابر (a) انرژی کل، (b) انرژی نرمال و (c) انرژی برشی [۱۰].

نتایج بدست آمده (اشکال ۵ و ۶) ثابت کرده است که با افزایش سطح پرشدگی بار، تنها در اجزاء سنگ به واسطه و سنگ به سنگ شاهد افزایش کم مصرف انرژی هستیم و میزان مصرف انرژی مربوط به جزء واسطه ثابت باقی می ماند. در این اثر متقابل جزء واسطه به آستر کاهش شدیدی نشان می دهد که منجر به کاهش بزرگ در اندازه زون ضربه ای می شود. میزان سطح پرشدگی بار با مصرف انرژی به صورت خطی افزایش می یابد. مکان پیک انرژی برشی مودال با افزایش سطح پرشدگی تغییر نمی کند که در عوض تنها به سرعت اتلاف انرژی بالا در عرض دامنه انرژی منتهی می شود که این مسئله در نتیجه وزن بیشتر بار است.

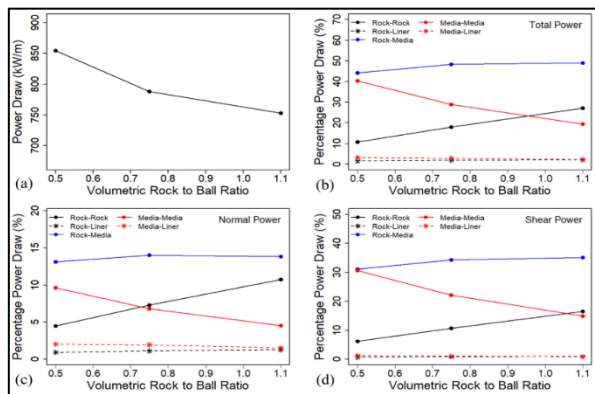


شکل ۵. (a) تغییر در جریان نیرو و توزیع مصرف انرژی با افزایش سطح پرشدگی، (b) نیروی کل، (c) نیروی نرمال، (d) نیروی برشی در شش نوع برخورد مختلف داخل آسیا SAG Mill [۱۰].

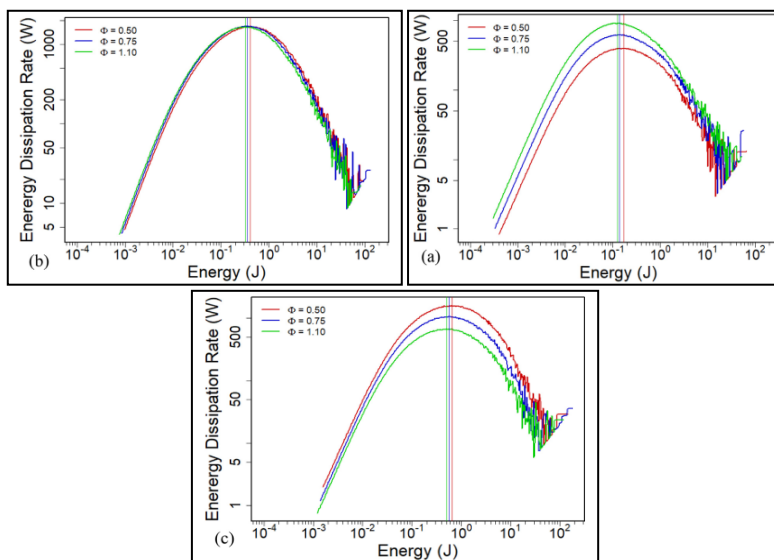


شکل ۶. تغییر در طیف انرژی کل در کل برخوردها با افزایش سطح پرشدگی (a) انرژی کل، (b) انرژی نرمال و (c) انرژی برشی [۱۰].

در خاتمه با افزایش نسبت حجمی سنگ به سنگ خردکننده (ترکیب بار) تغییر اندکی در ساختار بار نمایان می‌شود (اشکال ۷ و ۸). همچنین وقتی که ترکیب بار به علت افت متوسط چگالی تغییر می‌کند، مقدار نیرو اعمالی به سنگ‌ها برای خردایش نیز کاهش می‌یابد. کاهش شدید در انرژی تلف شده ناشی از برخورد سنگ به سنگ (وقتی که سنگ‌های واسطه خردایش در آسیا نیمه خودشکن کاهش می‌یابد) دلیل کاهش در اعمال نیرو در طی مرحله خردایش می‌شود. این موضوع با تجربه صنعتی مطابقت دارد جایی که با کاهش نسبت سنگ به گلوله، بازدهی توان بیشتر می‌شود [۱۰؛ ۱۱].



شکل ۷. (a) تغییر در جریان نیرو و توزیع مصرف انرژی با افزایش نسبت حجمی سنگ به گلوله، (b) نیروی کل، (c) نیروی نرمال، (d) نیروی برشی در شش نوع برخورد مختلف داخل آسیا SAG Mill [۱۰].



شکل ۸. تغییر در طیف انرژی کل در کل برخوردها با افزایش نسبت حجمی سنگ به گلوله (a) برخوردهای سنگ به سنگ، (b) برخوردهای سنگ به واسطه و (c) برخوردهای واسطه به واسطه [۱۰].

روش انجام آزمایش

جمع آوری و پردازش داده‌ها

برای شروع کار پارامترهای عملیاتی تأثیرگذار در شرایط کارکرد آسیای نیمه خودشکن را شناسایی کرده که پارامترهای عملیاتی آسیای نیمه خودشکن عبارت‌اند از: تناژ ورودی، توان، سرعت، ترانسیون ورودی، ترانسیون خروجی، تناژ برگشتی، درصد جامد، درصد پرشدگی، شارژ گلوله، نیم‌رخ لاینر، دانه‌بندی خوراک ورودی، pH و آب مصرفی داده‌های متالوژیکی بازه ۶ ماه (اول فروردین تا آخر شهریور) جمع آوری گردید و پس از آن پردازش‌های اولیه روی داده‌ها صورت گرفت.

معرفی روش آنالیز چندمتغیره

تجزیه و تحلیل داده‌های چندمتغیره^۱ MVDA یک تکنیک آماری است برای تجزیه تحلیل داده‌های تولید شده از بیش از یک منبع یا چندین متغیر استفاده می‌شود. (MVDA) یک روش آماری مرتبط برای سازمان‌دهی داده‌ها، تجسم و درک روابط بین نقاط مختلف ارائه می‌دهد. این تکنیک کمک می‌کند علت و معلول را درک و موارد پرت را پیدا کنید علاوه بر این به شما کمک می‌کند تا بفهمید که چگونه نقاط داده مختلف از منابع مختلف می‌توانند بر یکدیگر تأثیر بگذارند. پس از این تحلیل چندمتغیره نتایج تفسیر می‌شوند.

محل تهیه نمونه از خوراک آسیای نیمه خودشکن

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته دو محل برای تهیه نمونه مناسب از خوراک ورودی به کارخانه وجود دارد. محل اول در کنار نوار خوراک دهنده به آسیای نیمه خودشکن در داخل محل سوله کارخانه است. در کنار نوار امکان جای دادن بشکه وجود داشته و همچنین می‌توان بشکه‌های پر را با استفاده از جرثقیل به کف کارخانه منتقل نمود. از معایب محل ذکر شده می‌توان به ارتفاع زیاد نوار نصب شده و همچنین طول مفید کمتر آن (حدود ۶ متر) اشاره نمود. محل دوم برای تهیه این نمونه، محل تونل موجود در زیر انبار درشت سنگ معدن بعد از خوراک‌دهنده‌های نوار (آپرون فیدر و وایبره فیدر) می‌باشد که ارتفاع نوار از کف تونل در حدود ۲ متر بوده و همچنین محدودیت خاصی از بابت طول دسترسی به نوار وجود ندارد. حمل و نقل بشکه‌ها نیز به راحتی با استفاده از لیفتراک یا مینی لودر به راحتی امکان‌پذیر است. از طرفی نوار برگشت‌دهنده مواد مانده روی سرنده نیز بعد از این محل مواد برگشتی را روی نوار تخلیه می‌کند، لذا نمونه تهیه شده نمونه‌ای صرفاً از خوراک تازه ورودی به مدار خواهد بود. با توجه به مطالب فوق، تصمیم گرفته شد تا در روز نمونه‌گیری، نمونه خوراک مدار از این محل تأمین شود.

¹ Multivariate Data Analysis



شکل ۹. نمایی از استوک پایل.



شکل ۱۰. تونل زیر استوک پایل.

اهداف نمونه‌برداری

کلیه نمونه‌گیری‌های انجام شده به‌منظور دستیابی به اهداف زیر انجام گرفته‌اند:

- تعیین توزیع دانه‌بندی خوراک، محصول و بار در گردش آسیا و d_{80} آن
- تعیین روند خردایش و تغییرات وزن بار داخل آسیا و سرعت آسیا
- تعیین تغییرات سختی خوراک آسیا و نحوه اثرگذاری این پارامتر بر عملکرد آن
- تعیین تأثیر عواملی چون درصد جامد و زمان ماند بر خردایش مواد
- تعیین نحوه اثرگذاری عواملی چون شارژ گلوله و اندازه گلوله‌ها
- تعیین درصد بار در گردش و حداکثر ابعاد خروجی از آسیا

به‌منظور بررسی عملکرد آسیای نیمه خودشکن مجتمع مس سونگون و همچنین اطلاع از انحرافات شرایط عملیاتی نسبت به زمان طراحی، نمونه‌گیری‌هایی در جهت تعیین توزیع دانه‌بندی خوراک و محصول آسیا و بار در گردش آن انجام گرفت که این نمونه‌گیری‌ها شامل ۲ سری نمونه‌برداری در تاریخ ۱۳۹۹/۰۸/۲۰ و ۱۴۰۰/۰۲/۲۴ می‌باشد که وزن نمونه تهیه شده به ترتیب ۱۰۵۰ و ۱۱۷۷ کیلوگرم است.

آماده‌سازی نمونه‌ها

در هر سری نمونه‌برداری، پس از انتقال به آزمایشگاه متالورژی ابتدا نمونه‌ها خشک شده و هر کدام به‌صورت زیر دانه‌بندی شدند. در مورد خوراک ابتدا همه آن از سرند (۴/۷۵) میلیمتری عبور داده شده سپس مواد عبوری از این سرند با استفاده از تقسیم‌کننده مجرائی برای بدست آوردن نمونه معرف (۵ کیلوگرم) تقسیم می‌شود. نهایتاً با استفاده از سری سرندها، تا ابعاد ۴۰۰ مش دانه‌بندی می‌شوند. در مورد محصول آسیا نیز روال کار همین گونه بود با این تفاوت که پس از خشک کردن کامل پالپ همه نمونه از سرند (۲/۳۶) میلیمتری عبور داده شده و سپس مواد زیر سرندها با تقسیم‌کننده مجرائی تا بدست آوردن نمونه معرف (۲ کیلوگرم) تقسیم می‌شوند. از آنجائی که سرند کردن ذرات زیر ۴۰۰ مش در حالت خشک به سختی انجام شده و از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد لذا نمونه‌های بدست آمده از تقسیم کن ابتدا با سرند ۴۰۰ مش مورد شستشو قرار می‌گرفت تا بخش اعظم ذرات زیر ۴۰۰ مش از آن خارج شوند که پس از خشک کردن و توزین مقدار آن محاسبه شد و سپس کار دانه‌بندی به‌صورت خشک ادامه می‌یابد.

برای تعیین اندیس کار از یک آسیای آزمایشگاهی به نام آسیای باند استفاده می‌شود که با توجه به اینکه روش اصلی باند برای تعیین اندیس کار وقت گیر است، از روش نعمت‌اللهی [۱۱] رای این منظور استفاده می‌شود. اندیس کار باند مقاومت مواد در برابر آسیا کنی را اندازه‌گیری می‌کند و برابر است با مقدار انرژی لازم برای خرد کردن یک تن کوچک (۰/۹۰۷ تن) از ماده معدنی از ابعاد تئوری بی نهایت تا ابعادی که ۸۰٪ محصول از سرندها به دهانه ۱۰۰ میکرون عبور کند. این اندیس معمولاً در یک سیکل بسته و در آزمایشگاه تعیین می‌شود. هرچند مقدار این اندیس معمولاً در روند عملی طراحی آسیاهای نیمه خودشکن و محاسبه انرژی موردنیاز برای خردایش در این آسیاها کاربردی ندارد ولی استفاده از این اندیس برای مقایسه سختی یا قابلیت نرم شوندهای سنگ‌های مختلف می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

ابعاد آسیا ۲۰۵ × ۲۰۵ × ۲۰۷ حجم موردنیاز ۲۰۷ سانتی‌مترمکعب است که بقیه پارامترها نسبت به روش باند به نسبت (۲/۳۳) کوچک شده‌اند. مقدار بار خردکننده مورد استفاده در این آزمایش ۸۵ گلوله به وزن تقریبی ۵/۹ کیلوگرم به ترکیب ابعادی جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱. ترکیب ابعادی گلوله‌ها.

تعداد گلوله‌ها	قطر گلوله‌ها (mm)
۱۳	۳۸/۱
۲۰	۳۱/۷۵
۳	۲۵/۴
۲۱	۱۹/۰۵
۲۸	۱۵/۸۷

پس از اتمام آزمایش، مقدار اندیس کار گلوله‌ای باند با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$W_i \left(\frac{Kwh}{sh} \right) = \left(\frac{11/76}{P_i^{0/23}} \right) \left(\frac{1}{G_i^{0/75}} \right) \left[\frac{1}{\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}} \right] \quad [12] \quad (1)$$

در این رابطه W_i مقدار اندیس کار گلوله‌ای باند برحسب کیلووات ساعت بر تن کوچک، P_i اندازه دهانه سرد کنترل برحسب میکرون، G_i مقدار میانگین نرمه تولید شده در سه مرحله آخر آزمایش برحسب گرم بر دور و F_{80} ، P_{80} ابعاد بار اولیه و محصول خرد شده برحسب میکرون می‌باشد. برای تعیین اندیس کار باند پس از تهیه نمونه معرف آن را تا زیر ۶ مش خرد نموده، سپس F_{80} و چگالی ظاهری آن (به کمک پیکنومتر) تعیین می‌شود. با تعیین اندازه سرد کنترل، مقدار مواد ریزتر از دهانه این سرد (a) تعیین می‌شود.

با در نظر گرفتن چگالی ظاهری به دست آمده، وزن معادل ۲۰۷ سانتی‌متر مکعب از ماده معدنی تعیین شده و پس از انتقال مواد و گلوله‌ها به داخل آسیا به تعداد دور مشخصی (که بر اساس تجارب گذشته ۵۰ تا ۲۰۰ دور تعیین می‌شود) با سرعت ۸۶ دور بر دقیقه راه‌اندازی می‌شود. پس از اتمام دوره‌ها مواد تخلیه شده و با سرد کنترل دانه‌بندی می‌شود. با در نظر گرفتن میزان مواد ریزتر از سرد کنترل (a) و وزن مواد عبوری از سرد کنترل میزان نرمه خالص تولید شده به ازای یک دور چرخش آسیا و بار در گردش آن محاسبه می‌شود. سپس با اضافه نمودن ماده (از نمونه‌های تقسیم شده) وزن مواد به مقدار اولیه رسانده می‌شود. تعداد دور مرحله بعدی با در نظر گرفتن (a) و وزن موادی که باید خرد شوند تا به بار در گردش ۲۵۰٪ بررسی و تعیین می‌شود. آسیا شروع به کار نموده و این روند تا زمانی که آسیا به تعادل برسد ادامه می‌یابد. سپس نرمه سه مرحله آخر آزمایش را با هم مخلوط نموده و به کمک آن P_{80} تعیین می‌شود نهایتاً با استفاده از رابطه تعیین اندیس کار می‌توان مقدار اندیس کار گلوله‌ای باند را به دست آورد. از نتایج تست باند می‌توان برای تعیین درجه سختی مواد معدنی و قابلیت خردایش آنها در آسیاهای گلوله‌ای و میله‌ای استفاده نمود. جدول زیر تقسیم بندی سنگ‌ها را بر اساس مقدار اندیس کار باند نشان می‌دهد.

آزمایش شکست ضربه‌ای

برای انجام این آزمون سنگ‌هایی با ابعاد مختلف انتخاب و تحت انرژی‌های مختلف قرار داده می‌شوند تا بشکنند. برای اعمال انرژی‌های مختلف از دستگاه بار افتان استفاده می‌شود. دستگاه مورد نظر متشکل از یک وزنه افتان با وزن و ارتفاع سقوط متغیر می‌باشد. به هنگام انجام آزمایش، نمونه مورد نظر مابین دو سندان تخت فولادی قرار داده می‌شود و در اثر سقوط وزنه خرد می‌شود. بدیهی است که با تغییر ارتفاع سقوط و وزنه‌ها می‌توان محدوده وسیعی از انرژی (۱/۰ تا ۵۰ کیلووات ساعت بر تن) را در حین اعمال به نمونه انتقال داد. مطابق جدول زیر، ۱۰۰ کیلوگرم از نمونه در ۵ بخش طبقه بندی می‌شود.



شکل ۱۱. دستگاه بار افتان در آزمایشگاه کانه آرایی واحد متالورژی.

برای اعمال انرژی لازم می توان ارتفاع و وزن سقوط وزنه‌ها را تغییر داد. انرژی لازم برای هر سطح را می توان به کمک جدول راهنمای (۲)، انتخاب و با استفاده از رابطه زیر ارتفاع سقوط وزنه را محاسبه نمود.

جدول ۲. اندیس کار باند.

ویژگی	نرم	متوسط	سخت	خیلی سخت
اندیس کار باند	۷-۹	۹-۱۴	۱۴-۲۰	>۲۰

$$E_{cs} = \frac{0.0272M_d(h_i - h_f)}{\bar{m}} [۱۳] \quad (۲)$$

که در آن:

- m : جرم متوسط ذراتی که خرد می شوند (gf)
- d : وزن وزنه‌های افتان (بار خردکننده) (kg)
- h_i : ارتفاع اولیه سقوط (cm)
- h_f : ضخامت مواد مابین دو سندان پس از سقوط وزنه (cm)

جدول ۳. ابعاد فراکسیون‌ها و سطوح انرژی مربوطه.

آزمایش	۱۳/۲، ۱۶-	۱۹، ۲۲/۴-	۲۶/۵، ۳۱/۵-	۳۷/۵، ۴۵-	۵۳، ۶۵-
	mm	mm	mm	mm	mm
سطح انرژی	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱	۰/۱
سطح انرژی	۱	۱	۱	۰/۲۵	۰/۲۵
سطح انرژی	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۱	۰/۵

سپس ذرات شکسته به صورت جداگانه جمع‌آوری شده و دانه‌بندی آن تعیین می‌گردد با استفاده از نمودارهای دانه‌بندی t_{10} که برابر مقدار درصد تجمعی عبوری از سرنده به اندازه یک دهم میانگین هندسی ابعاد اولیه فراکسیون تحت آزمایش است محاسبه می‌شود. رابطه زیر بیانگر ارتباط بین شدت شکست (t_{10}) و انرژی مخصوص شکست (E_{cs}) می‌باشد:

$$t_{10} = A(1 - e^{-bE_{cs}}) [۱۳] \quad (۳)$$

مقادیر A و b مرتبط با سختی کانسنگ در برابر شکست ضربه‌ای می‌باشد. مقدار پارامتر A شکست نمونه در سطوح انرژی بسیار بالاتر از آنچه در آسیاهای نیمه خودشکن می‌تواند رخ دهد را بیان می‌کند. پارامتر b مبین شیب کلی منحنی $t_{10} - E_{cs}$ در سطوح انرژی پایین می‌باشد. لازم به ذکر است که پارامترهای A و b وابستگی داخلی دارند چرا که مقدار یکی از آنها دیگری را تغییر می‌دهد. از آنجائی که A و b به هم وابسته و مرتبط هستند معمولاً حاصل $A \times b$ را گزارش می‌نماید که بیانگر سختی کانسنگ در برابر ضربه می‌باشد.

آزمایش شاخص توان آسیای نیمه خودشکن SPI

هدف اصلی در این آزمایش، دستیابی به رابطه‌ای جهت تعیین انرژی ویژه در آسیای نیمه خودشکن صنعتی با توجه به اندازه محصول نهایی (P_{80}) و سختی سنگ است. انرژی ویژه عبارت است از توان لازم برای خرد کردن یک تن بر ساعت ماده معدنی در یک اندازه معین.

برای انجام آزمایش از آسیای نیمه خودشکن آزمایشگاهی (قطر $30/5$ و طول $10/2$ سانتی‌متر) استفاده می‌شود. 15% حجم آسیا با گلوله‌هایی با ابعاد 25 میلیمتر پر شده و آسیا هنگام کار با سرعت 70% سرعت بحرانی می‌چرخد. خوراک مورد آزمایش، ابتدا با سنگ شکن فکی به زیر 19 میلی‌متر رسانده می‌شود سپس 2000 گرم از آن با ترکیب 400 گرم از روی سرند $12/7$ میلی‌متر و 1600 گرم از زیر سرند $12/7$ میلی‌متر انتخاب می‌شود. مخلوط این دو به داخل آسیا ریخته شده و اولین مرحله خردایش با در نظر گرفتن یک زمان دلخواه (معمولاً ۲ ساعت) انجام می‌شود. هدف آزمایش تعیین زمان خردایش لازم برای رسیدن ترکیب مزبور از 20% روی سرند $12/7$ میلی‌متر به 20% درصد (400 گرم) روی سرند $1/7$ میلی‌متر است. مواد بعد از هر مرحله خردایش دانه‌بندی شده و در صورت نرسیدن وزن مواد روی سرند به وزن مطلوب خردایش با همان ترکیب ادامه خواهد یافت. زمان رسیدن به این نقطه برحسب زمان (t) شاخص توان آسیای نیمه خودشکن نامیده می‌شود. با استفاده از رابطه تجربی زیر توان مورد نیاز برای آسیای نیمه خودشکن صنعتی محاسبه می‌شود.

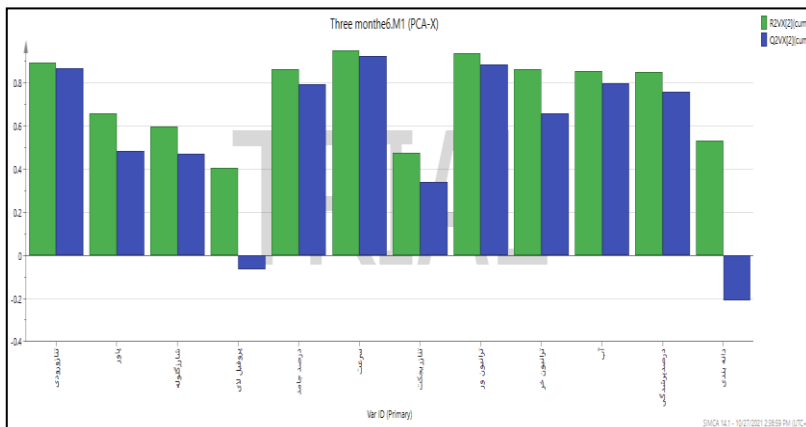
$$(Kwh/t) = (P_{80})^{-0/33} (2/2 + 0/1t) \quad (4)$$

در این رابطه:

- P_{80} : 80% محصول عبوری آسیا SPI
- t : زمان رسیدن محصول آسیای SPI به $P_{80}=1/7$ mm می باشد.

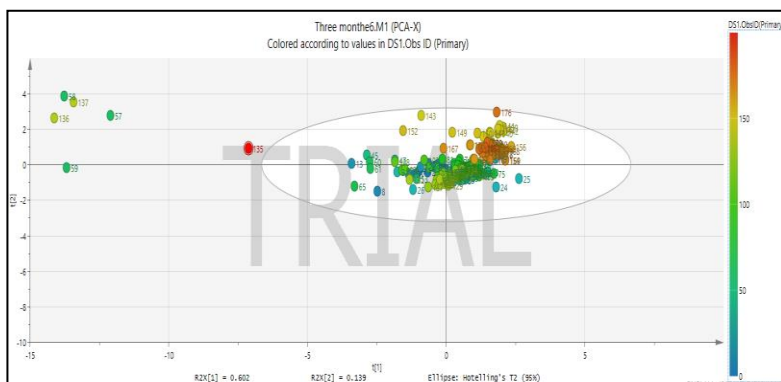
نتایج و بحث

مدل‌سازی چندمتغیره و مولفه‌های اصلی نشان داد که داده‌های متالورژیکی حاصل از عملکرد آسیای نیمه خودشکن قابلیت مدل‌سازی با دو مؤلفه‌ی اصلی بوده که می‌توان با $(R^2=0/741)$ واریانس داده‌های موجود را دربرگرفته و آنها را به‌خوبی با قدرت $(Q^2=0/495)$ پیش‌بینی نماید.

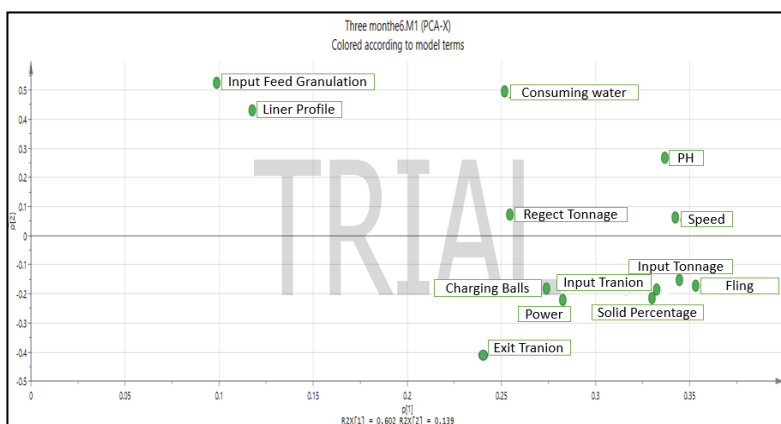


شکل ۱۲. میزان مشارکت پارامترها در مدل.

علت پایین بودن مقادیر Q^2 دلیل اندازه‌گیری برخی مقادیر اندازه‌گیری می‌باشد بطوری که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که برخی از پارامترهای اندازه‌گیری بخوبی توسط مدل تشریح نمی‌شود بررسی پارامترها نظیر پروفیل لاینر، دانه‌بندی بخوبی توسط مدل تشریح نمی‌شوند و به همان اندیس‌های برازش مدل پایین می‌باشد ولی بر اساس مقادیر بدست آمده برای شاخص‌های مدل‌سازی مدل برازش شده مدل قابل قبول و در حد مدل خوبی ارزیابی می‌گردد. به منظور بررسی روند تغییرات بوجود آمده در مدار خردایش در ۶ ماه منتهی به انجام طرح، نمودارهای وزنی و امتیازی برای داده‌های موجود تهیه و بهترین گروه‌بندی آنها در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند. بر اساس تصویر سازی چند متغیره بعد داده‌ها کاهش و تفسیر آنها تسهیل می‌گردد. بررسی نمودار امتیازی حاصل از مولفه‌های اصلی (۱ و ۲) در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که مشاهدات ۱۸۰ روزه مدار خردایش برحسب زمان عملیات به خوبی از هم تفکیک شده و گروه‌بندی از خود نشان می‌دهند. بطوری که مشاهدات ۱ تا ۱۳۰ به فاصله اندکی از مشاهدات ۱۳۰ تا ۱۸۲ تفکیک شده‌اند. مشاهدات سبز و آبی منطبق روی هم دیده می‌شوند. بنابراین بطور واضح دیده می‌شود که گروه‌بندی مشاهدات نشان می‌دهد که تغییرات واضحی در مدار خردایش بر حسب زمان عملیات انجام گرفته است. جهت بررسی اینکه چه عواملی سبب گروه‌بندی مشاهدات مدار خردایش شده است، نمودار وزنی در شکل که تصویر متغیرهای اندازه‌گیری در مشاهدات مختلف می‌باشد، تهیه و در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. نمودار امتیازی و تصویر مشاهدات بر حسب مولفه‌های اصلی ۱ و ۲.



شکل ۱۴. (نمودار وزنی) تصویر متغیرها بر حسب مولفه‌های اصلی ۱ و ۲.

تحلیل‌های نمودار وزنی

تناژ ورودی، ترانسیون ورودی، درصد پرشدگی و درصد جامد با یکدیگر ارتباط مستقیم دارند و با پروفیل لاینر و دانه‌بندی خوراک ورودی رابطه عکس دارند. از طرفی گروه‌بندی داده‌ها نشان می‌دهند که ارتباط داده‌ها نظیر فشار ترانسیون ورودی با درصد پرشدگی مثبت بوده که با افزایش درصد پرشدگی فشار ترانسیون نیز افزایش پیدا می‌کند و برعکس. شارژ گلوله با فشار ترانسیون خروجی و پاور مصرفی ارتباط مثبت دارد هر چقدر میزان شارژ گلوله افزایش می‌یابد میزان پاور مصرفی افزایش می‌یابد.

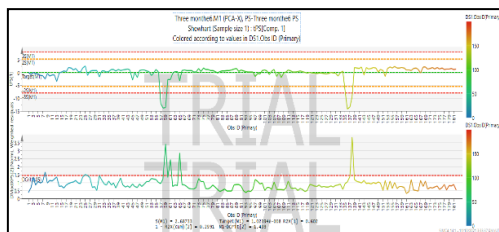
تأثیر شارژ گلوله در مدل‌سازی بیشتر بوده و با تناژ ورودی، درصد پرشدگی و پاور مصرفی ارتباط مستقیم دارد به این معنی که با افزایش تناژ ورودی میزان شارژ گلوله افزایش می‌یابد و پروفیل لاینر کمترین مقدار را داراست و حالت کلی با افزایش شارژ گلوله میزان مصرف واسطه خردایش افزایش می‌یابد. از محل تصویر شدگی نشان می‌دهد که دانه‌بندی خوراک ورودی با پروفیل لاینر ارتباط مستقیم دارد و با شارژ گلوله ارتباط عکس دارد؛ چون دانه‌بندی خوراک ورودی و پروفیل لاینر به طور ثابت اندازه‌گیری نمی‌شود و با افزایش فشار ترانسیون و پاور مصرفی میزان شارژ گلوله تعیین می‌شود.

پاور مصرفی کم نشان از کم‌بودن تناژ ورودی یا درصد پرشدگی کم آسیا است که با افزایش تناژ ورودی پاور مصرفی افزایش می‌یابد. با تغییر پارامترهای عملیاتی نظیر افزایش و کاهش سرعت آسیا روش غالب تغییر می‌کند هر چه قدر سرعت افزایش می‌یابد به طور سایشی عمل نموده و میزان مصرف گلوله افزایش می‌یابد. نتیجه حاصل از تجزیه تحلیل داده‌ها که بیشترین تأثیر را در مصرف واسطه خردایش دارند عواملی چون تناژ ورودی، میزان پرشدگی، پروفیل لاینر و دانه‌بندی خوراک ورودی بیشترین تأثیر را در مصرف گلوله را دارند.

کنترل آماری فرایند

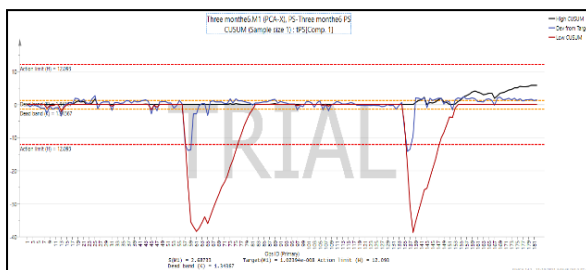
استفاده از نمودارهای مربوطه امکان تشخیص اینکه یک فرایند به طور نرمال و مورد انتظار کار می‌کند یا نه و در صورت وجود آشفتگی‌هایی در فرایند دلایل آنها را برحسب داده‌های دیتابیس (متغیرها) جهت کنترل و تصحیح ارائه می‌نماید برای این منظور از نمودارهای شوارت، کیوسام و ایوما یا نمودار میانگین وزنی متحرک نمایی استفاده می‌شود. در این نمودارها محدوده‌های هشدار آماری برحسب $2SD$ و $3SD$ مشخص می‌شوند، به طوری که اگر فرایند تحت کنترل باشد ۹۵٪ داده‌ها در داخل محدوده قرار می‌گیرند و محدوده کنترلی ۹۹٪ را شامل می‌شوند. در صورت وجود مشاهداتی خارج از حد کنترل تغییراتی در سیستم نیاز است تا فرایند موجود و جاری را تحت کنترل در بیاورد.

در شکل ۱۵ نمودار شوارت به همراه نمودار $DModx$ برای داده‌های یک دوره ۶ ماه در مدار خردایش (SAG) تهیه ارائه شده است. با ترکیب این نمودار با $DModx$ مشاهدات خارج از محدوده را می‌توان به خوبی تشخیص داد. براساس نمودارهای مذکور مشخص است که تغییرات روزانه‌ای محدود و غیر قابل کنترل در مدار رخ داده است ولی مهم تر آن که، بر حسب زمان یک جابجایی اساسی در فرایند مشاهده می‌شود و گویای آن است که در صورت عدم تغییرات در فرایند خردایش انحراف اساسی و غیر قابل کنترل رخ خواهد داد.

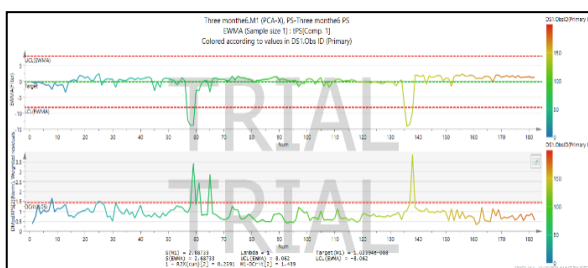


شکل ۱۵. نمودار شوارت و $DModx$ برای داده‌های فرایند.

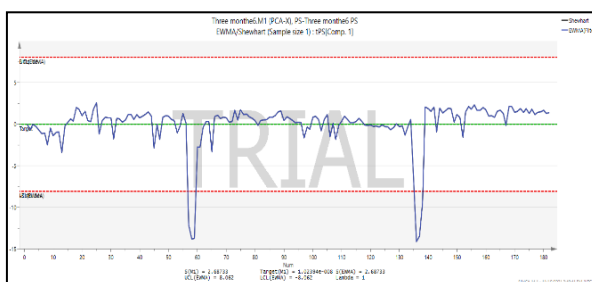
همانند نمودار شوارت، نمودار کیوسام آشفنگی‌های زیادی و محدود در فرآیند به دلیل قطعی جریان برق آشکار می‌سازد. شکل ۱۶ براساس نمودار کیوسام نشان داده شده مشاهده می‌شود که ۵ آشفنگی محدودتر از نمودار شوارت در محدوده‌های زمانی محدودتر در فرآیند خردایش رخ داده که این آشفنگی‌ها در نمودار شوارت قابل تشخیص نیست.



شکل ۱۶. نمودار کنترلی کیوسام برای فرآیند خردایش.



شکل ۱۷. ترکیب نمودار میانگین وزنی متحرک نمایی با DModx برای دیتا بیس مدار مس سونگون.



شکل ۱۸. ترکیب نمودار شوارت با نمودار میانگین وزنی متحرک نمایی.

بر اساس بررسی‌های آماری چندمتغیره به روش تصویر نمایی و نمودارهای کنترل آماری شکل ۱۷ و ۱۸ مشخص است که بر حسب زمان تغییرات و آشفنگی‌های قابل ملاحظه‌ای در مدار خردایش بر حسب زمان در حال رخ دادن است. بایستی ابتدا عیب‌یابی و سپس جهت بهبود فرآیند خردایش اقدام نمود. که این آشفنگی‌ها مربوط به قطع برق یا اورهال کارخانه است.

نتیجه گیری

در مورد پر شدگی کلی آسیا دیده می شود که با افزایش ۵ درصدی آن (از ۳۰ به ۳۵) درصد، کاهش چشمگیری در تناژ بار در گردش یعنی افزایش نرخ خردایش مواد با ابعاد بحرانی، روی داده است. ولی این کاهش با افزایش چشمگیر در زمان ماند همراه می باشد و این تغییرات در مورد خوراک سخت، حادث می باشد. بطور کلی تأثیر این پارامتر مثبت ارزیابی نمی شود و مقدار ۳۰ درصد برای این پارامتر مناسب می باشد هر چند مطلوب است که در مورد خوراک سخت کمی بیشتر هم باشد. با توجه به نمودار توزیع دانه بندی، d_{80} خوراک ورودی آسیای نیمه خودشکن ۸۶/۶۹ میلی متر است. با توجه به نتایج آزمایش های اندیس باند، شکست ضربه ای و شاخص توان آسیای نیمه خودشکن (SPI) نشان می دهد که خوراک از نظر خردایش ضربه ای سخت و از لحاظ خردایش سایشی نرم است و باعث افزایش توان مصرفی می شود اما به دلیل عدم تناسب در دانه بندی ورودی شاهد اختلافی شگرف در مصرف انرژی هستیم؛ بنابراین این مطالعه به صراحت نشان می دهد که تأثیر ابعاد ذرات حتی از تأثیر سختی ذرات نیز بیشتر است.

- ۱- میزان پر کردن کانی اثر معنی داری بر توان آسیا SAG و انرژی بر خورد ذرات کانی دارد.
- ۲- با افزایش میزان کانی، میزان توان مصرفی افزایش می یابد و انرژی بر خورد ذرات کانی کاهش می یابد.
- ۳- میزان پر کردن کانی اثر برجسته ای بر فرسایش لاینر و گلوله های فولادی دارد. وقتی میزان کانی پایین است، افزایش میزان کانی می تواند به طور معنی داری فرسایش لاینر و گلوله های فولادی را کاهش دهد. در حالی که وقتی میزان کانی بالا است، تداوم افزایش میزان کانی به سختی بر فرسایش لاینر و گلوله اثر می گذارد.
- ۴- تغییر پر شدگی گلوله در مورد خوراک سخت که با افزایش ۶/۵ درصدی از (۸/۵٪ به ۱۵٪) همراه بود با توجه به نتایج شبیه سازی مثبت ارزیابی شد. دلیل این موضوع این بود که مقدار پر شدگی بیشتر گلوله بر روی روند کاهش تناژ بار در گردش و کاهش زمان ماند مؤثر است. بطور کلی پیشنهاد می شود که در مواجهه با خوراک های سخت به جای استفاده از گلوله های بزرگتر از انباشتگی بالای گلوله های فعلی استفاده گردد. در مورد درصد جامد داخل آسیای نیمه خودشکن باید ابراز داشت که کاهش درصد جامد (از ۶۵/۵ به ۵۵/۵) در خوراک سخت مثبت ارزیابی می شود. در مقابل افزایش درصد جامد تأثیر منفی با خود به همراه دارد.

تشکر و قدردانی

در پایان از مجتمع مس سونگون و کلیه عزیزانی که با همکاری خود امکان انجام این پژوهش را فراهم ساختند، تشکر و قدردانی می نمایم.

References

- [1] Cleary, P. W., & Owen, P. (2018). Development of models relating charge shape and power draw to SAG mill operating parameters and their use in devising mill operating strategies to account for liner wear. *Minerals Engineering*, 117, 42-62. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.12.007>
- [2] Tomczak, J., Pater, Z., & Bulzak, T. (2018). The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(1), 5-12. <https://doi.org/10.24425/118901>

- [3] Zurnadzhy, V. I., Efremenko, V. G., Wu, K. M., Lekatou, A. G., Shimizu, K., Chabak, Y. G., Zotov, D. S., & Dunayev, E. V. (2020). Quenching and Partitioning-Based Heat Treatment for Rolled Grinding Steel Balls. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 51(6), 3042-3053. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05737-w>
- [4] Bulzak, T., Pater, Z., Tomczak, J., & Wójcik, Ł. (2020). On some problems of producing grinding media by cross wedge rolling combined with upsetting. *Minerals Engineering*, 151(2), 106305. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106305>
- [5] Larsson, S., Pålsson, B. I., Parian, M., & Jonsén, P. (2020). A novel approach for modelling of physical interactions between slurry, grinding media and mill structure in wet stirred media mills. *Minerals Engineering*, 148, 106180. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106180>
- [6] Owen, P., & Cleary, P. W. (2015). The relationship between charge shape characteristics and fill level and lifter height for a SAG mill. *Minerals Engineering*, 83, 19-32. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.009>
- [7] Ghasemi, A. R., Razi, E., & Banisi, S. (2020). Determining a lower boundary of elasticity modulus used in the discrete element method (DEM) in simulation of tumbling mills. *Advanced Powder Technology*, 31(4), 1365-1371. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.01.014>
- [8] Rong, W., Li, B., Feng, Y., Song, T., Qi, F., & Liu, Z. (2022). Numerical analysis of wall shear stress in a rotating drum based on two fluid model. *Powder Technology*, 408(234), 117716. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117716>
- [9] Xu, L., Bao, S., & Zhao, Y. (2020). Multi-level DEM study on liner wear in tumbling mills for an engineering level approach. *Powder Technology*, 364, 332-342. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.004>
- [10] Cleary, P. W., & Owen, P. (2019). Effect of particle shape on structure of the charge and nature of energy utilisation in a SAG mill. *Minerals Engineering*, 132, 48-68. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.006>
- [11] Nematollahi, H. (1997). *Mining (Volume 2)* (2 ed.). University of Tehran Printing and Publishing Institute. <https://www.gisoom.com/book/1117790>
- [12] Bond, F. C. (1952). The third theory of comminution. *Trans. American Institute of Mining, Min. Eng.*, 193, 484-494. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573105975448006528>
- [13] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996). *Mineral comminution circuits: their operation and optimisation* (T. J. Napier-Munn, Ed.). University of Queensland. <https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:357349>