

بهبود کارایی آسیاب‌کنی در مدار آسیای گلوله‌ای و غلتکی فشار بالا در یکی از کارخانه‌های فولاد سیرجان

مهدی اشرف زاده^۱، محمدرضا گرمسیری^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد فراوری، گروه مهندسی معدن، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان

(دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۰۵، پذیرش ۱۳۹۷/۰۶/۱۴)

چکیده

مدار خردایش کارخانه ۲ مجتمع فولاد سیرجان ایرانیان شامل آسیای غلطکی فشار بالا (HPGR) در مدار بسته با سرند تر است که محصول آن وارد آسیای گلوله‌ای که در مدار بسته با هیدروسیکلون و جداکننده مغناطیسی شدت متوسط قرار دارد، می‌شود. در این مدار از یک آسیای گلوله‌ای دارای قطر ۵/۵ متر که با سه هیدروسیکلون در مدار بسته خوراک‌دهی می‌شود، استفاده می‌شود. در این پژوهش افزایش کارایی مدار خردایش به کمک بهبود راندمان آسیاب‌کنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور تاثیر تناژ ورودی به آسیای گلوله‌ای بر عیار و دانه‌بندی کنسانتره نهایی در مقیاس صنعتی بررسی شد. همچنین تاثیر توان کشی آسیا بر دانه‌بندی محصول مورد ارزیابی قرار گرفت. در این راستا از K_{80} برای ارزیابی کمی ابعاد ذرات استفاده شد. علاوه بر آن از یک روش جدید بر مبنای موازنه جرم برای محاسبه دبی ورودی به آسیا استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش تناژ ورودی به آسیا ابعاد ذرات در سرریز هیدروسیکلون و کنسانتره نهایی کاهش می‌یابد و علاوه بر آن با افزایش توان کشی آسیا ابعاد محصول نهایی کاهش یافت.

کلمات کلیدی

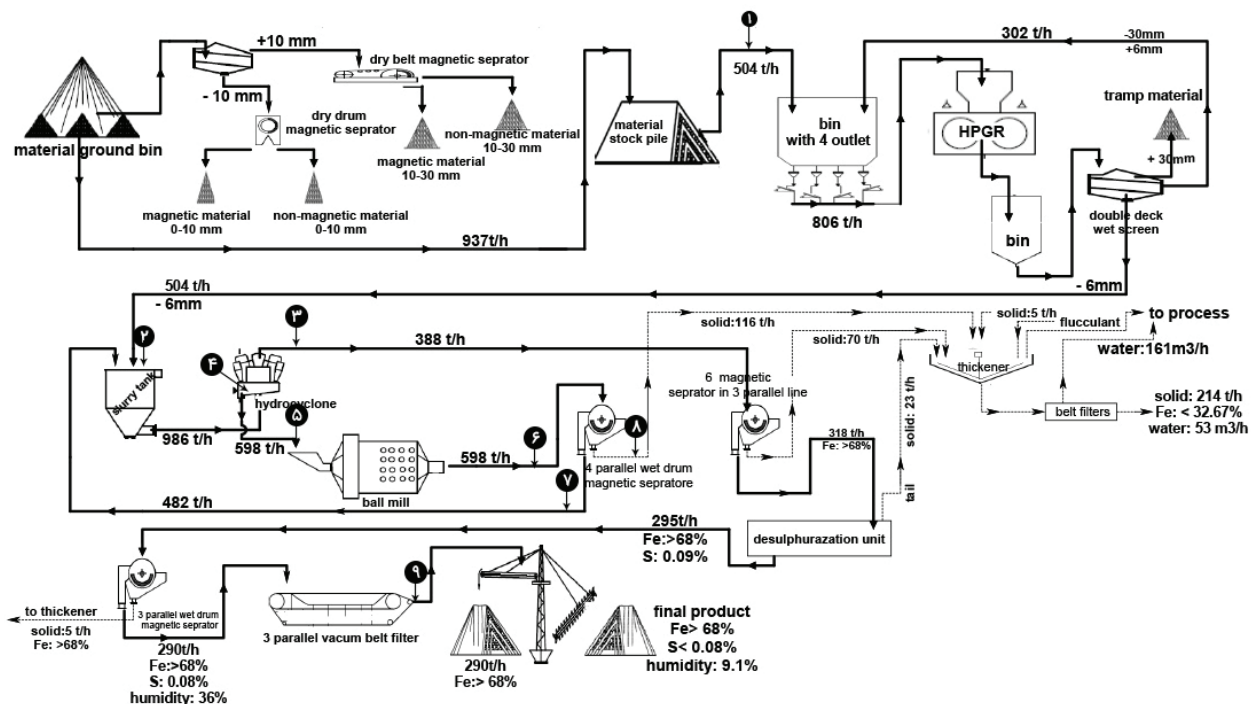
آسیای گلوله‌ای، K_{80} ، دانه‌بندی، HPGR، عیار.

۱- مقدمه

بهینه‌سازی یکی از این دو تجهیز راندمان خردایش می‌تواند افزایش یابد. در این راستا فرآیند بهینه‌سازی روی این دو بخش یا یکی از آن‌ها به طور جداگانه ممکن است انجام شود. تاکنون افراد زیادی عملکرد HPGR به ویژه وضعیت ریزترک‌ها در محصول آن را بررسی کرده‌اند [۲]، اما بهبود کارایی آسیای گلوله‌ای در این مدار کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با بهینه‌سازی آسیای گلوله‌ای نه تنها بازدهی مکانیکی آن قابل افزایش است بلکه محصول مطلوب‌تری برای مراحل پایین دست از جمله پرعیارسازی و گندله‌سازی فراهم می‌شود [۳]. همچنین نشان داده شد که به کارگیری HPGR موجب افزایش ظرفیت [۴] و مصرف انرژی می‌شود [۵]. بارانی و بلوچی [۶] کارایی HPGR و سنگ‌شکن معمولی را در پیش خردایش آسیای گلوله‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که پیش خردایش خوراک آسیای گلوله‌ای با HPGR در مقایسه با سنگ‌شکن معمولی منجر به محصول ریزتر در خروجی آسیا می‌شود [۶].

در مدارهای HPGR و آسیای گلوله‌ای کارایی آسیاکنی ممکن است تا ۲۰ درصد افزایش یابد [۷]. کارایی مدار آسیاکنی به عواملی زیادی از جمله تناژ و

در سال‌های اخیر کاربرد مدارهای خردایش شامل HPGR و آسیای گلوله‌ای در مدارهای فرآوری مواد مختلف رو به افزایش بوده است. دلیل این مساله هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی کمتر همراه با کارایی انرژی بالاتر در این مدارها نسبت به مدار آسیای نیمه‌خودشکن- گلوله‌ای است [۱]. در این چیدمان، مدارهای بسته HPGR و آسیای گلوله‌ای به طور جداگانه و به صورت سری قرار گرفته‌اند. محصول مدار HPGR وارد هیدروسیکلون شده و ته‌ریز آن به آسیای گلوله‌ای منتقل می‌شود. پس از آسیا ذرات کم ارزش باطله با یک جداکننده مغناطیسی شدت متوسط از مدار حذف می‌شوند و مابقی مواد (کنسانتره جداکننده مغناطیسی) به خوراک هیدروسیکلون بازگردانده می‌شوند (شکل ۱). این مدار به طور گسترده در فرآوری سنگ آهن به ویژه در کارخانه‌های فرآوری منطقه گل‌گهر (از جمله کارخانه ۲ فولاد سیرجان ایرانیان) استفاده شده است. در فرآوری سنگ آهن، علاوه بر عیار کنسانتره، دانه‌بندی آن نیز به دلیل الزامات فرآیند پایین‌دست (گندله‌سازی) اهمیت بسیار زیادی دارد. در مدارهای خردایش HPGR و آسیای گلوله‌ای، با



شکل ۱: نقاط نمونه‌برداری از کارخانه فولاد سیرجان ایرانیان

باید بازیابی جداکننده مغناطیسی محاسبه و در محاسبات منظور شود که ابتدا باید روش محاسباتی دبی مواد ورودی به آسیا مشخص شود (روابط ۱ و ۲)

$$CYF=U+V \quad (1)$$

$$CYF=F+U \times R \quad (2)$$

که در آن:

CYF: تناژ خوراک سیکلون

U: تناژ ته‌ریز

V: تناژ سرریز

F: تناژ خوراک کارخانه

R: بازیابی وزنی جداکننده مغناطیسی

با تقسیم طرفین رابطه ۲ بر CYF رابطه ۳ به دست می‌آید.

$$\frac{F}{CYF} + \frac{U}{CYF} \times R = 1 \quad (3)$$

از سوی دیگر با توجه به رقت جریان‌های سه‌گانه هیدروسیکلون از رابطه ۴ استفاده می‌شود.

$$U = CYF \frac{f' - v'}{u' - v'} \quad (4)$$

که در آن:

f': نسبت رقت خوراک

v': رقت سرریز

u': نسبت رقت ته‌ریز هیدروسیکلون

از آنجا که تناژ خوراک کارخانه (F) مشخص است، با جایگذاری رابطه ۴ در رابطه ۵ و با مشخص بودن مقدار بازیابی جداکننده R می‌توان تناژ ورودی به هیدروسیکلون را محاسبه کرد (رابطه ۵).

$$CYF = \frac{F}{1 - R \times \frac{f' - v'}{u' - v'}} \quad (5)$$

به کمک روابط ۴ و ۵ تناژ جامد ورودی به آسیا به دست می‌آید. روابط ۱ تا ۵ بر مبنای موازنه جرم مدار به دست آمده است.

در حین فرآیندهای نمونه‌برداری، غلظت جامد نمونه‌ها

درصد جامد ورودی به آسیا، میزان بار در گردش، ژئومتری هیدروسیکلون، توان‌کشی آسیا و قطر گلوله‌ها وابسته است [۳]. شی و ناپیرمون [۸] اظهار کردند که با افزایش تناژ خوراک آسیا شاخص کارایی خریدایش کاهش می‌یابد زیرا با افزایش تناژ، زمان ماند مواد در آسیا کاهش یافته و بدین ترتیب خریدایش کمتری انجام می‌گیرد. ارغوانی و همکاران [۹] بیان کردند که با تغییر غلظت جامد وزنی و پرشدگی آسیا، شرایط آسیاکنی بهبود می‌یابد بطوریکه در فرآیند جداایش مقدار گوگرد موجود در کنسانتره به ۰٫۰۸ درصد کاهش یافت. بدین ترتیب می‌توان گفت بهینه‌سازی عملیات خریدایش در آسیاهای گلوله‌ای یک راه حل عملی برای بهبود خریدایش در مدارهایی که از HPGR و آسیای گلوله‌ای استفاده می‌کنند، است.

در فرآوری سنگ‌آهن نه تنها عیار محصول بلکه دانه‌بندی آن نیز بسیار مهم است زیرا فرآیند گندله‌سازی (فرآیند پایین دست پرعیارکنی) حساسیت قابل توجهی به ابعاد ذرات ورودی دارد به طوریکه با کاهش ابعاد ذرات کنسانتره آهن، کیفیت گندله بهبود می‌یابد [۱۰]. در این شرایط برای توصیف ابعاد ذرات علاوه بر K_{80} از عدد بلین نیز استفاده می‌شود. عدد بلین نشان‌دهنده مساحت سطح خارجی واحد جرم ذرات است [۱۱] و با کاهش ابعاد ذرات عدد بلین افزایش می‌یابد.

در این پژوهش امکان افزایش کارایی مدار آسیاکنی کارخانه ۲ فولاد سیرجان ایرانیان و تاثیر آن بر کیفیت محصول کارخانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این کارخانه از یک آسیای گلوله‌ای با قطر ۵٫۵ و طول ۱۰٫۵ متر استفاده می‌شود و با توجه به دشواری تخمین تناژ ورودی به آسیا، از یک روش جدید و نوآورانه بر مبنای موازنه جرم برای تخمین تناژ ورودی به آسیا در این گونه مدارها استفاده شد.

۲- مواد و روش کار

نمونه‌برداری از مدار فرآوری کارخانه ۲ شرکت فولاد سیرجان ایرانیان انجام شد. نقاط نمونه‌برداری مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌برداری به مدت ۲ ساعت و در شرایط پایداری کامل مدار انجام شد.

در مدار آسیاکنی این کارخانه، تناژ ورودی به مدار آسیاکنی (خروجی مدار HPGR) مشخص است اما دبی مواد ورودی به آسیا مشخص نیست. دلیل این مساله به حضور جداکننده مغناطیسی در جریان خروجی آسیا و دفع بخشی از مواد به وسیله این جداکننده به جریان باطله مربوط می‌شود، بنابراین

شکل ۲ نشان می‌دهد که با کاهش ابعاد ذرات سرریز هیدروسیکلون عیار محصول نهایی افزایش یافت. چنین رابطه‌ای بین ابعاد ذرات کنسانتره و عیار کنسانتره نیز با همبستگی بیشتر مشاهده شد. دلیل همبستگی بیشتر در شکل ۲-ب به این مساله مربوط می‌شود که بخشی از ذرات موجود در سرریز هیدروسیکلون به جریان باطله راه می‌یابند در نتیجه برخی از ذرات از سیستم حذف می‌شوند و نقشی در عیار کنسانتره نخواهند داشت. علاوه بر آن پژوهش در مقیاس صنعتی انجام شده است و با توجه به تعدد عوامل غیر قابل کنترل نسبت به مقیاس آزمایشگاهی، کاهش مقدار R^2 انتظار می‌رود.

علاوه بر آن بر مبنای شکل ۲ می‌توان گفت دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون بر درجه آزادی موثر است و در نتیجه نقش قابل توجهی در عیار محصول نهایی دارد، بنابراین کاهش دانه‌بندی سرریز هیدروسیکلون یک راه حل عملی برای بهبود راندمان تولید است که راه‌های دستیابی به آن باید بیشتر بررسی شود.

۳-۲- تاثیر دبی دوغاب ورودی به آسیا

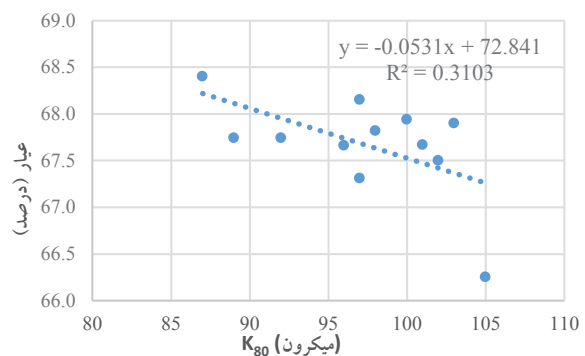
در این بخش تاثیر دبی دوغاب ورودی به آسیا بر K_{80} و بلین خصوصیات محصول کارخانه بررسی شده است (شکل ۳). با افزایش دبی دوغاب ورودی به آسیا در اثر افزایش تناژ، K_{80} کنسانتره کاهش و عدد بلین افزایش یافته است، بنابراین با افزایش دبی ورودی به آسیا کیفیت محصول کارخانه بهبود یافته است. در نگاه اول این یافته بر خلاف تئوری به نظر می‌رسد. بر مبنای تئوری با افزایش دبی ورودی به آسیا و کاهش زمان ماند دانه‌بندی خروجی آسیا افزایش می‌یابد که نتیجه مطلوبی نیست. دلیل این تناقض ظاهری این است که در کارخانه فرآوری شرکت فولاد سیرجان ایرانیان، موقعیت آسیا منحصر به فرد است. با افزایش دبی ورودی به آسیا، تناژ موادی که تحت آسیاکنی قرار گرفته‌اند و مجدد به مدار بازگردانده می‌شوند، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سهم مواد آسیا شده در خوراک هیدروسیکلون افزایش می‌یابد و خوراک هیدروسیکلون نسبتاً ریزتر می‌شود. این مساله در سایر کارخانه‌هایی که مدار مشابه دارند نیز صادق است، بنابراین با افزایش تناژ ورودی به آسیا (با تغییر ابعاد اجزای هیدروسیکلون) یک راه حل عملی برای افزایش راندمان مدار خردایش در کارخانه فولاد سیرجان ایرانیان و سایر موارد مشابه است. برای دستیابی به

به روش خشک کردن در آزمایشگاه انجام شد. علاوه بر آن K_{80} و بلین سرریز هیدروسیکلون (محصول مدار آسیاکنی) و کنسانتره نهایی به عنوان پاسخ آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. دانه‌بندی نمونه‌ها به روش سرندکنی در آزمایشگاه به دست آمد و عدد بلین نمونه‌ها به روش استاندارد تعیین شد [۱۲]. در این روش فشار مورد نیاز برای عبور هوا از مقدار مشخصی ماده معدنی برای ارزیابی ابعاد ذرات در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر نفوذپذیری نمونه برای ارزیابی میزان ریز بودن ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

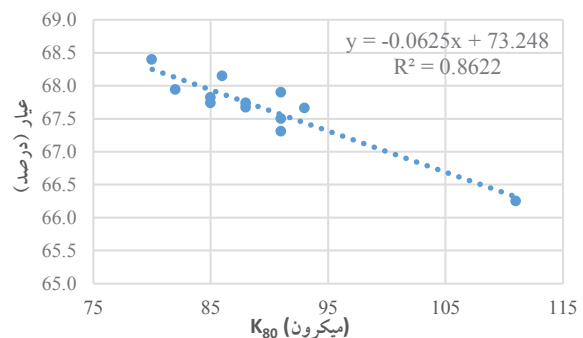
۳- یافته‌ها و تحلیل نتایج

۳-۱- رابطه دانه‌بندی و عیار کنسانتره

ابتدا تاثیر K_{80} سرریز هیدروسیکلون و کنسانتره نهایی به عنوان دو شاخص اصلی ارزیابی عملکرد آسیاکنی در نظر گرفته شده در این پژوهش بر عیار آهن کنسانتره نهایی بررسی شد (شکل ۲).

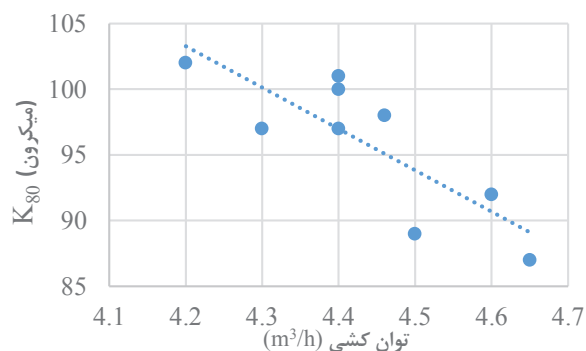


(الف)

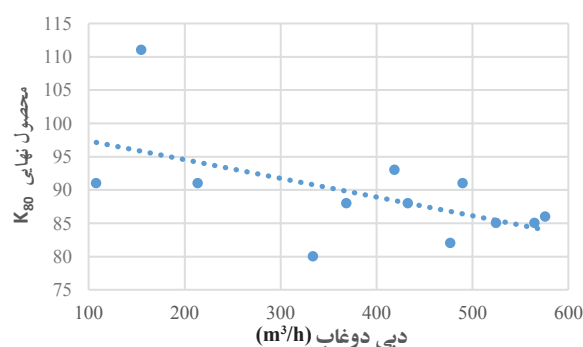


(ب)

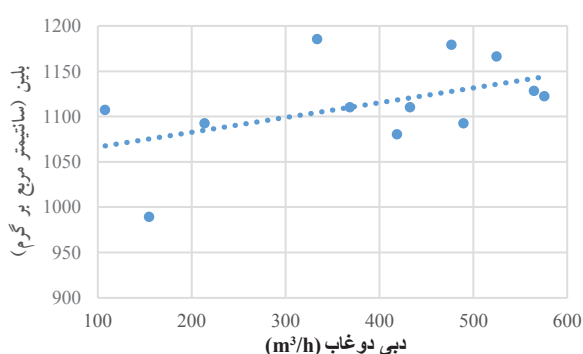
شکل ۲: تاثیر K_{80} سرریز هیدروسیکلون (الف) و کنسانتره نهایی (ب) بر عیار کنسانتره



شکل ۴: تاثیر توان کشی آسیا بر K_{80} محصول نهایی



(الف)



(ب)

شکل ۳: تاثیر دبی ورودی به آسیا بر K_{80} (الف) و بلین (ب) کنسانتره نهایی

ذرات کنسانتره و افزایش کیفیت آن خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

امروزه مدار HPGR و آسیای گلوله‌ای کاربرد قابل توجهی در فرآوری مواد، به ویژه فرآوری سنگ آهن دارد. در این پژوهش امکان افزایش راندمان مدار خردایش کارخانه ۲ فولاد سیرجان ایرانیان با اصلاح شرایط عملیاتی آسیای گلوله‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که عیار کنسانتره نهایی به ابعاد ذرات سرریز هیدروسیکلون و کنسانتره وابسته است. علاوه بر آن نشان داده شد که افزایش تناژ مواد ورودی به آسیا منجر به کاهش ابعاد ذرات کنسانتره نهایی و افزایش عدد بلین خواهد شد. همچنین مشخص شد که به کمک این روش راندمان کارخانه قابل افزایش است، بنابراین افزایش تناژ ورودی به آسیا یک راه حل عملی برای افزایش راندمان مدارهای HPGR و آسیای گلوله‌ای است.

بررسی سایر پارامترهای عملیاتی آسیای گلوله‌ای با هدف بهبود بیشتر در راندمان کارخانه در حال انجام است.

این هدف بهترین روش اصلاح ابعاد اجزای هیدروسیکلون است تا بدین ترتیب تناژ ورودی به آسیا افزایش یافته و راندمان مدار آسیاکنی افزایش یابد. علاوه بر آن با توجه به رابطه معکوس عیار و بازیابی می‌توان گفت افزایش تناژ ورودی به آسیا می‌تواند موجب افزایش بازیابی کارخانه نیز شود.

۳-۳- تاثیر توان کشی آسیا

برای اطمینان از تاثیر افزایش دبی ورودی به آسیا در اثر افزایش تناژ، تاثیر توان کشی آسیا بر ابعاد ذرات کنسانتره مورد ارزیابی قرار گرفت (شکل ۴).

با افزایش توان کشی آسیا (انرژی مصرفی) در اثر افزایش تناژ ورودی، دانه‌بندی محصول نهایی کاهش یافته است که به دلیل افزایش نقش آسیاکنی با افزایش تناژ ورودی به آن و تغییر شکل بار و برهمکنش گلوله و ذرات درون آسیا است. از این رو می‌توان گفت در این نوع مدار افزایش تناژ ورودی به آسیا یک راه حل عملیاتی موثر است که موجب کاهش ابعاد

۵- مراجع

- [1] Bearman, R. (2006). "High-Pressure Grinding Rolls Characterising and Defining Process". In: *Advances in Comminution*, K.S. Kawatra (Ed.), SME, 15-39.
- [2] Tavares, L. M. (2005). "Particle weakening in high-pressure roll grinding". *Minerals Engineering*, 18(7): 651-657.
- [3] Wills, B. A., and Finch, J. A. (2016). "Mineral processing technology". Butterworth-Heinemann, 123-146.
- [4] Yaghoobi, M., and Rahmani, F. (2016). "Comprehensive

125-140.

[۹] ارغوانی، ا.؛ حجتی، ا.؛ بنیسی، ا.؛ ۱۳۹۴؛ "کاهش میزان گوگرد کنسانتره با بهبود کارایی مدار آسیا تر کارخانه فرآوری مجتمع سنگ آهن گل گهر". نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره بیست و هفتم، شماره ۱۰، ص ۶۷-۶۱.

[10] Harun, N. Y., and Afzal, M. T. (2016). "Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends". *Procedia Engineering*, 148: 93-99.

[11] Pal, J., Ghorai, S., Agarwal, S., Nandi, B., Chakraborty, T., Das, G., and Prakash, S. (2015). "Effect of Blaine Fineness on the Quality of Hematite Iron Ore Pellets for Blast Furnace". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(2): 83-91.

[12] ASTM, (2007). "Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus". *Book of Standards Volume: 04.01*.

application of roller presses in worldwide mineral industries". Second International Conference on Science and Engineering, Istanbul-Turkey, 1-14.

[۵] آزماینده، م.؛ ریاحی مدوار، ع.؛ ۱۳۹۴؛ "مروری بر آسیای غلتکی فشار بالا و تاثیر آن در فرآوری مواد معدنی". کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی، دبی، امارات متحده عربی، ص ۲۰-۱۲.

[۶] بارانی، ک.؛ بلوچی، ح.؛ ۱۳۹۳؛ "مقایسه استفاده از سنگ شکن غلطکی فشار بالا و روش های معمول سنگ شکنی بر روی سینتیک خردایش آسیای گلوله ای سنگ آهن". پنجمین کنفرانس مهندسی معدن، تهران، ایران، ص ۹-۱.

[7] Ballantyne, G. R., Hilden, M., and van der Meer, F. P. (2018). "Improved characterisation of ball milling energy requirements for HPGR products". *Minerals Engineering*, 116: 72-81.

[8] Shi, F. N., and Napier-Munn, T. J. (2002). "Effects of slurry rheology on industrial grinding performance". *International Journal of Mineral Processing*, 65(3):