نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

دوره پنجم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۴۳ تا ۱۶۰
Vol. 5, No. 1, Spring 2020, pp. 143-160

DOI:10.30479/jmre.2019.10770.1272

# اثر مکانیزم نرم‌کنی کنسانتره آهن معدن گل گهر بر شاخص‌های کیفی گندله خام تولیدی

**کیان معتمدی[۱]، سعید زندوکیلی[۲*]، امیر حاجی زاده عمران[۳]**

۱- کارشناسی ارشد، فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، کرمان
۲- استادیار، فراوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، کرمان
۳- کارشناسی ارشد، فراوری مواد معدنی، مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر سیرجان، کرمان

**(دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۰۳، پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۰۲)**

## چکیده

**در پژوهش حاضر ضمن تشریح مکانیزم‌های نرم‌کنی آسیای گلوله‌ای و آسیای غلتکی فشار بالا (HPGR)، به بررسی پارامترهای فیزیکی متاثر از مکانیزم شکست، مانند اندازه، شکل و سطح مخصوص پرداخته شد. همچنین تاثیر این متغیرها بر شاخص‌های کیفی گندله خام تولیدی بررسی شد. علاوه بر این پس از تولید کنسانتره آهن دردانه‌بندی‌های یکسان از تجهیزات HPGR و آسیای گلوله‌ای، میزان نرمه و شکل سطحی ذرات تولیدی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که سطح مخصوص ذرات محصول HPGR در مقایسه با آسیای گلوله‌ای بیشتر است. این ویژگی در نتیجه افزایش میزان ذرات نرمه در محدوده ۷ تا ۲۵ میکرون، وجود میکرو و ماکروترک‌ها و شکستگی‌های سطحی بیشتر ذرات در محصول HPGR تشخیص داده شد. همچنین ضمن گندله سازی از محصولات آسیای گلوله‌ای و HPGR در $d_{80}$ یکسان (۹۰ و ۴۳ میکرون) مشخص شد که در $d_{80}$=۹۰µm، گندله‌های خام تولیدی از محصول HPGR، مقاومت دراپ و استحکام فشاری بیشتری نسبت به حالت تر وخشک دارند. همچنین گندله‌های خام تولیدی از محصول HPGR درحالت تر و در $d_{80}$=۴۳µm نیز دارای مقاومت دراپ و استحکام فشاری بالاتری در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای بودند. اما استحکام فشاری گندله خام تولید شده در حالت خشک در محصول HPGR، نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای در $d_{80}$=۴۳µm، به میزان ۶۳٫۱۸ درصد کاهش داشت که این میزان کاهش به افزایش بیش از حد سطح مخصوص و جذب بیش از حد آب توسط ذرات نرمه نسبت داده شد.**

## کلمات کلیدی

**آسیای گلوله‌ای، HPGR، سطح مخصوص، شاخص‌های کیفی، گندله خام.**

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات **Email: s.zandvakili@vru.ac.ir**

## ۱- مقدمه

هدف اصلی کارخانه‌های فرآوری سنگ آهن تولید کنسانتره با مشخصات فیزیکی و شیمیایی مناسب برای انجام عملیات گندله‌سازی و دستیابی به گندله با کیفیت مطلوب به منظور استحصال آهن و تولید فولاد است. توزیع دانه‌بندی کنسانتره آهن و سطح مخصوص ذرات آن از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خوراک کارخانه گندله‌سازی به شمار می‌رود. به همین منظور در اغلب موارد، یک مرحله نرم‌کنی کنسانتره پیش از ورود خوراک به کارخانه گندله‌سازی طراحی می‌شود. در کارخانه‌های گندله‌سازی شماره ۱ و ۲ مجتمع معدنی و صنعتی گل‌گهر سیرجان، عملیات نرم‌کنی کنسانتره به ترتیب با استفاده از آسیاهای گلوله‌ای و HPGR[1] انجام می‌گیرد. امروزه استفاده از مدار HPGR با هدف کاهش مصرف انرژی و بهبود خردایش کانه، در صنایع سنگ آهن رو به گسترش است. با توجه به اختلاف مکانیزم خردایش این تجهیزات، تغییرات احتمالی در اندازه، شکل، سطح مخصوص ذرات خرد شده و در نهایت کیفیت گندله تولیدی انتظار می‌رود.

گندله آهن به گلوله‌های تقریبا کروی شکل از کنسانتره آهن که در اثر چرخاندن تشکیل می‌شود و دارای تاثیر مثبت در عملکرد کوره بلند است، اطلاق می‌شود [۱].

برای تولید گندله، کنسانتره آهن با دانه‌بندی صفر تا ۳۰۰ میکرون، پس از اختلاط با آب، آهک و بنتوتیت (به عنوان چسب) به دیسک گندله‌سازی خوراک‌دهی می‌شود [۲]. گندله‌های خام تولیدی در ابعاد ۸ تا ۱۶ میلی‌متر، جداسازی و سپس به کوره حرارتی وارد می‌شوند. کوره حرارتی شامل مراحل خشک‌کنی، پیش گرم‌کنی، پخت، پسا پخت و سردکنی است که گندله خام پس از عبور از این مراحل، پخته و سخت می‌شود [۴،۳]. گندله‌های تولیدی باید دارای خواص کیفی مطلوب برای استفاده در روش‌های احیای مستقیم و یا کوره بلند به منظور تولید آهن و فولاد باشند.

### ۱-۱- شاخص‌های کیفی گندله مطلوب

توزیع مناسب دانه‌بندی در ابعاد ۸ تا ۱۶ میلی‌متر، ۲۵ تا ۳۰ درصد تخلخل [۱]، رطوبت مناسب [۵]، حداقل عدد سقوط (مقاومت دراپ) ۳ تا ۴ برای گندله خام [۱]، مقاومت فشاری ۰٫۵ تا ۲ کیلوگرم بر گندله در حالت تر[2](W.C.S) [۱]، مقاومت فشاری ۵ تا ۱۵ کیلوگرم بر گندله در حالت خشک[3](D.C.S) [۶،۱]، مقاومت فشاری ۲۶۰ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر گندله در حالت پخته[4](C.C.S) [۱]، شاخص سایش (شاخص Tumble) بیش از ۹۴ درصد برای گندله‌های با اندازه بزرگتر از ۶٫۳۵ میلی‌متر و کمتر از ۵ درصد برای گندله‌های با اندازه کوچکتر از ۰٫۵ میلی‌متر [۱] وحداکثر ۰٫۷ درصد FeO در گندله پخته، از مهمترین ویژگی‌های کیفی گندله است.

از مهمترین ویژگی‌های موثر خوراک بر کیفیت گندله تولیدی می‌توان به ماهیت کنسانتره مصرفی، نوع مواد افزودنی، رطوبت کنسانتره، pH آب، ناخالصی‌های سنگ آهن، توزیع دانه‌بندی و سطح مخصوص کنسانتره (عدد بلین بر حسب سانتی‌متر مربع بر گرم یا سانتی‌متر مربع بر سانتی‌متر مکعب) اشاره کرد.

طبق بررسی‌های انجام شده هر چه درصد مواد کوچکتر از ۴۵ میکرون بیشتر باشد، قابلیت گندله‌شوندگی نرمه‌ها افزایش می‌یابد. این واقعیت، مصرف بالای انرژی در آسیاهای گلوله‌ای و کاهش تخلخل گندله‌های اولیه را موجب می‌شود [۷].

همچنین هر چه میزان سطح مخصوص (عدد بلین) بیشتر باشد، سطح فعال برای انجام واکنش‌های شیمیایی افزایش می‌یابد. محدوده بلین مجاز برای کانه‌های مختلف متفاوت است. به طور مثال این مقدار برای کانه هماتیت بین ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و برای کانه منیتیت بین ۱۶۰۰ تا ۲۳۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم است [۱].

از مهمترین پارامترهای موثر بر افزایش سطح مخصوص (بلین) می‌توان به توزیع دانه‌بندی ذرات، شکل سطحی ذرات و میزان نرمه موجود اشاره کرد. به طوری که هرچه توزیع دانه‌بندی ذرات ریزتر باشد، سطح مخصوص افزایش می‌یابد.

همچنین سطوح ناهموار سطح مخصوص بیشتری در مقایسه با سطوح صاف دارند. علاوه بر این هر چه درصد ذرات نرمه در نمونه بیشتر باشد، سطح مخصوص و بلین نمونه بالاتر خواهد بود.

### ۱-۲- انواع تجهیزات خردایش برای تولید خوراک گندله‌سازی

مکانیزم خردایش از مهمترین عوامل موثر در تشکیل نرمه است. در صنایع تولید آهن استفاده از دو تجهیز آسیای غلتکی فشار بالا (HPGR) و آسیای گلوله‌ای قبل از گندله‌سازی بسیار متداول است.

مکانیزم خردایش در HPGR فشار است و این فشار می‌تواند به خردایش درون ذره‌ای[5] یا خردایش تک ذره‌ای[6] منجر شود. در خردایش درون ذره‌ای، ابعاد بزرگترین ذره در

بستر مواد، کوچکتر از فاصله بین دو غلتک و در خردایش تک ذره‌ای ابعاد بزرگترین ذره در بستر مواد، از فاصله بین دو غلتک بزرگتر است[۸].

این در حالی است که مکانیزم غالب در آسیاهای گلوله‌ای به صورت ضربه و سایش است. شکست در نتیجه مکانیزم ضربه به دلیل حرکت آبشاری بزرگ و برخورد گلوله با پاشنه بار به وجود می‌آید. بنابراین به دلیل بالا بودن سرعت بارگذاری در مکانیزم ضربه، ذرات تولید شده دامنه ابعادی وسیعی دارند [۹].

مکانیزم سایش نیز به دلیل سایش ذرات روی یکدیگر و یا سایش ذرات روی گلوله‌ها به وجود می‌آید. به طور کلی این مکانیزم در آسیاهای گلوله‌ای در حرکت آبشاری کوچک اتفاق می‌افتد که موجب تولید ذرات با ابعاد بسیار ریز و همچنین ذرات در اندازه اولیه می‌شود [۱۰].

در حالت کلی مکانیزم سایش و غلتش ذرات روی یکدیگر به تولید ذرات کروی با سطحی صاف منجر می‌شود. در حالی که مکانیزم ضربه و فشار موجب شکستگی ذره و تولید ذراتی با اشکال هندسی نامتقارن با سطحی ناهموار خواهد شد. از این رو انتظار می‌رود، ذرات در محصول HPGR نسبت به ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای سطح مخصوص بالاتری داشته باشند.

### ۱-۳- مروری بر تحقیقات گذشته

محققان افزایش سطح مخصوص محصول تولید شده با تجهیز HPGR در مقایسه با آسیای گلوله‌ای را به فشار استاتیکی ناشی از سطح غلتک‌ها و خود ذرات و در نتیجه تشکیل ریز ترک‌های اولیه در سطح ذرات نسبت داده‌اند [۱۱]. به همین دلیل سطح ذرات در محصول HPGR نسبت به آسیای گلوله‌ای، ناهمواری‌های بیشتری دارد و این می‌تواند افزایش سطح مخصوص محصول خروجی HPGR با ابعاد درشت‌تر، در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای را توجیه کند. همچنین در این تحقیق حداقل بلین مورد نیاز برای تولید گندله از محصول HPGR، ۱۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم و برای آسیای گلوله‌ای ۱۶۵۰ سانتی‌متر مربع بر گرم تعیین شده است. علاوه بر این درصد گندله‌های تولیدی در ابعاد ۸ تا ۱۲٫۵میلی‌متر در محصولات HPGR و آسیای گلوله‌ای به ترتیب ۹۰ و ۵۵ درصد گزارش شده است [۱۱].

مکانیزم خردایش حتی می‌تواند بر میزان FeO موجود در گندله پخته شده نیز تاثیرگذار باشد. از آنجا که درصد FeO در گندله پخته نقش به سزایی بر کیفیت نهایی گندله خواهد گذاشت، بنابراین کاهش مقدار آن برای افزایش استحکام مکانیکی گندله، باید مورد توجه قرار گیرد [۱۲].

در تحقیقی مشابه، تاثیر خردایش کنسانتره آهن با HPGR بررسی و نتایج بهبود فرآیند پخت، افزایش مقاومت فشاری گندله پخته، کاهش زمان همجوشی و همچنین کاهش انرژی فعال‌سازی اکسایش منیتیت به هماتیت در نتیجه افزایش سطح مخصوص کنسانتره را نشان داد [۱۳].

بهره‌گیری از مکانیزم فشار در خردایش با HPGR، موجب ایجاد شکستگی‌ها و ریز ترک‌هایی در سطح ذرات می‌شود که این شکستگی‌ها می‌توانند باعث ایجاد سطوح ناهموار و در نتیجه افزایش سطح مخصوص و در نهایت افزایش چفت‌شدگی ذرات در عملیات گندله‌سازی شوند. همین ناهمواری‌های موجود در سطح ذرات محصول HPGR، بهبود عملیات گندله‌سازی با وجود تشکیل ذرات درشت‌تر را موجب می‌شود [۱۴].

در تحقیق انجام شده در کارخانه گندله‌سازی شماره ۲ مجتمع گل گهر سیرجان مشخص شد که دانه‌بندی ذرات تا ابعاد ۲۵ میکرون در محصول آسیای گلوله‌ای در مقایسه با محصول HPGR کوچکتر است. این در حالی است که مقادیر ذرات نرمه (ذرات کوچکتر از ۲۵ میکرون) در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای تقریبا مشابه بوده است. همچنین دانه‌بندی معادل برای تولید گندله با کیفیت یکسان از محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای به ترتیب ۸۰ درصد کوچکتر از ۵۸ میکرون و ۸۰ درصد کوچکتر از ۴۴ میکرون گزارش شد [۱۵]. نتایج این تحقیق در جدول ۱ ارایه شده است.

در تحقیقی دیگر، کنسانتره آهن با ۵ بلین ۱۸۰۰، ۱۹۰۰، ۲۰۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم، به وسیله آسیای گلوله‌ای و HPGR با هدف بررسی میزان نرمه موجود و شکل سطحی ذرات، آماده‌سازی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطح مخصوص، میزان ذرات نرمه کوچکتر از ۱۰ میکرون، در محصول آسیای گلوله‌ای از ۳۹ به ۴۶ درصد و در محصول HPGR از ۴۱ به ۴۹ درصد افزایش یافته است [۱۶].

همچنین سطح مخصوص اندازه‌گیری شده با روش جذب سطحی (BET)، در تمامی نمونه‌ها از سطح مخصوص اندازه‌گیری شده با روش تراوایی گاز بالاتر بوده است و در بلین‌های یکسان (اندازه‌گیری شده با روش تراوایی گاز)، سطح مخصوص اندازه‌گیری شده با روش BET در محصول HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای اعداد بالاتری را نشان

جدول ۱: توزیع دانه‌بندی ذرات در محصول HPGR و BallMill [۱۵]

| اندازه ذرات میکرومتر (درصد) | HPGR | Ball Mill |
|---|---|---|
| <۳۱۵ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| <۲۰۰ | ۹۹٫۳ | ۱۰۰ |
| <۱۶۰ | ۹۸٫۹ | ۱۰۰ |
| <۱۰۰ | ۹۳٫۹ | ۹۹٫۸ |
| <۶۳ | ۸۲٫۵ | ۹۲٫۳ |
| <۴۰ | ۷۰٫۴ | ۷۷٫۴ |
| <۲۵ | ۵۶٫۵ | ۵۷٫۵ |
| $d_{80}$ (میکرومتر) | ۵۸ | ۴۴ |
| سطح ویژه- Blaine (سانتی‌متر مربع بر گرم) | ۱۸۹۰ | ۱۸۷۵ |

می‌داد. در این پژوهش دلیل بالاتر بودن سطح مخصوص ذرات در محصول HPGR به وجود ماکروترک‌ها و میکروترک‌ها در محصول HPGR نسبت داده شد. همچنین با بررسی شکل سطحی ذرات به وسیله آنالیز SEM مشخص شد که ذرات در محصول HPGR در مقایسه با آسیای گلوله‌ای، زبری سطحی بیشتر و کروی بودن کمتر دارند [۱۶].

در این تحقیق، تاثیر مکانیزم خردایش بر پارامترهای کیفی گندله خام، مانند مقاومت دراپ، مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر و خشک در یک عملیات نیمه صنعتی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. این تحقیقات در پژوهش‌های گذشته کمتر مورد استقبال محققان قرار گرفته است. همچنین در تحقیق‌های گذشته عمدتا از تاثیرات مثبت تجهیز HPGR در عملیات گندله‌سازی یاد شده است، در حالی که در این پژوهش تاثیرات مثبت و منفی خردایش با HPGR در دانه‌بندی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش کار

برای انجام این پژوهش در ابتدا کنسانتره آهن در ۳ دانه‌بندی مختلف به وسیله هر یک از مدارهای HPGR و آسیای گلوله‌ای مستقر در کارخانه نیمه صنعتی فرآوری مواد معدنی مجتمع معدنی و صنعتی گل گهر، آماده‌سازی شد. تهیه دو دانه‌بندی مشابه از محصولات هر یک از این آسیاها با کنترل متغیرهای فیزیکی مانند تنظیم سرعت خوراک‌دهنده، تغییرات زمان ماند ذرات در آسیاها، تغییر دانه‌بندی بار ورودی به HPGR و سایر متغیرهای موثر در مدار نرم‌کنی ذرات مورد توجه قرار گرفت. در ادامه سطح مخصوص ذرات به روش‌های تراوایی گاز و جذب سطحی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

همچنین تاثیر تجهیز HPGR و آسیای گلوله‌ای بر میزان نرمه تولیدی، شکل سطحی و سطح مخصوص ذرات بررسی و شاخص‌های کیفی گندله خام تولیدی از محصول آسیای گلوله‌ای و HPGR در دانه‌بندی یکسان از نظر مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر و خشک و همچنین مقاومت دراپ گندله خام مورد آنالیز قرار گرفت.

### ۲-۱- تهیه نمونه

در این پژوهش از کنسانتره کارخانه تغلیظ، قبل از ورود به مدار آسیای گلوله‌ای کارخانه گندله‌سازی شماره ۱ استفاده شده است. برای این منظور از دستگاه نمونه‌گیر مکانیکی نصب شده بر روی نوار نقاله ورودی به آسیای گلوله‌ای استفاده شد. نمونه‌برداری به فاصله ۱۵ دقیقه یک بار، در یک بازه ۵ ساعته در هر روز و در مدت ۳۰ روز انجام شد.

### ۲-۲- آنالیز ابعادی و آنالیز شیمیایی

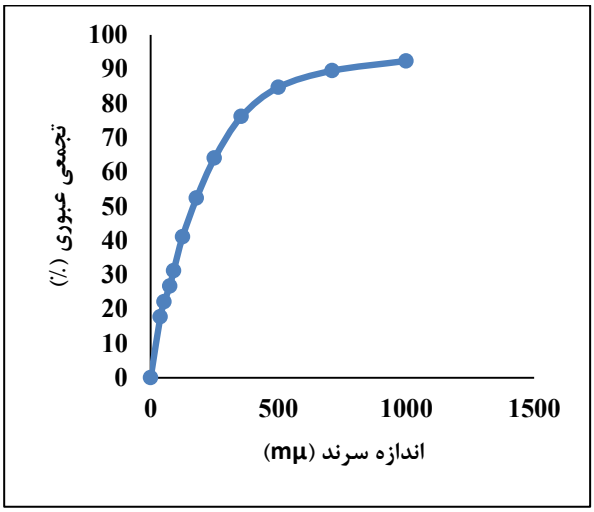
نمونه‌های تهیه شده برای همگن‌سازی به کارخانه نیمه صنعتی فرآوری منتقل شد و نمونه معرف پس از همگن‌سازی برای انجام آزمایش‌های آنالیز سرندی و عیارسنجی، به وسیله تقسیم‌کننده مجرایی جداسازی شد. آنالیز سرندی به روش تر در فرکانس‌های مختلف ۰٫۸ میلی‌متر بر گرم (۵ دقیقه)، ۱٫۶۵ میلی‌متر بر گرم (۵ دقیقه) و ۲٫۵ میلی‌متر بر گرم (۱۵دقیقه) با سری سرندهای ۲۵۰ تا ۳۸ میکرومتر شرکت Retsch آلمان انجام شد. توزیع دانه‌بندی ذرات در ابعاد ۳۸ تا کوچکتر از ۵ میکرومتر به وسیله سیکلوسایزر موجود در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران انجام شد. نتایج آنالیز سرندی و عیارسنجی کنسانتره به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۲ ارایه شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های شیمیایی کنسانتره تولیدی کارخانه تغلیظ مجتمع گل گهر سیرجان

| رطوبت (درصد) | Blaine (سانتی‌متر مکعب بر گرم) | S (درصد) | FeO (درصد) | Fe (درصد) |
|---|---|---|---|---|
| ۵ | ۲۸۸ | ۰/۳۴ | ۲۷/۶۲ | ۶۷/۲۲ |

جدول ۳: ویژگی‌های شیمیایی بنتونیت مصرفی برای گندله‌سازی

| Blaine (سانتی‌متر مربع بر گرم) | $SiO_2$ (درصد) | $Al_2O_3$ (درصد) | جذب آب (درصد) |
|---|---|---|---|
| ۳۰۰۰ تا ۴۵۰۰ | ۵۶ تا ۷۰ | ۱۰ تا ۱۳ | ۵۰۰ تا ۷۰۰ |




شکل ۱: نمودار آنالیز سرندی کنسانتره کارخانه تغلیظ

همچنین بنتونیت مصرفی در انجام آزمایش‌های گندله‌سازی از شرکت گل‌گهر پودر با مشخصات فیزیکی و شیمیایی ارایه شده در جدول ۳ تهیه شده است.

### ۲-۳- اندازه‌گیری سطح مخصوص

در این پژوهش اندازه‌گیری سطح مخصوص ذرات با دو روش شار هوا (تراوایی گاز) و روش BET مورد ارزیابی قرار گرفت. روش شار هوا، بر اساس قابلیت عبور هوا از میان بستری از مواد و طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۱۵۷۵۲ سال ۹۷ انجام گرفت. در این روش زمان لازم برای عبور مقدار معینی هوا از میان ۴/۱۸ گرم ماده (برای کنسانتره آهن) نشان‌دهنده مقدار سطح مخصوص طبق رابطه ۱ است:

$$SSA = K * t^{0.5} * p^{-1} \quad (1)$$

که در آن:

$SSA$ : سطح مخصوص (سانتی‌متر مربع بر گرم)

$t$ : زمان عبور هوا

$\rho$ : دانسیته مواد (گرم بر سانتی‌متر مکعب) است.

مقدار K نیز به عنوان یک مقدار ثابت و با توجه به نوع ماده در نظر گرفته می‌شود.

اما روش BET بر اساس جذب یک لایه کامل از مولکول‌های یک ماده جذب‌شونده مانند نیتروژن روی سطح ذرات، شامل شکستگی‌های سطحی، میکروترک‌ها و ماکرو ترک‌ها است. در این روش با اطلاع از اندازه متوسط یک مولکول می‌توان مساحت سطحی کل نمونه را اندازه‌گیری کرد. این مطالعات با روش BET به وسیله دستگاه BELSORP مدل Mini2 شرکت Nikkiso ژاپن در آزمایشگاه بیم گستر تابان تهران انجام گرفت.

### ۲-۴- مطالعات میکروسکوپی

برای بررسی شکل سطحی ذرات از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مدل LEO1450VP، شرکت Zeiss آلمان، موجود در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران استفاده شد.

### ۲-۵- اندازه‌گیری مقاومت دراپ

برای اندازه‌گیری مقاومت دراپ از میله دراپ شامل میله‌ای به ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر و محفظه استوانه‌ای در بالای آن استفاده شد. در این روش تعداد ۱۰ عدد گندله خام در ابعاد ۸ تا ۱۶ میلی‌متر انتخاب شد و پس از سقوط از ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر (داخل محفظه استوانه‌ای)، میانگین عدد دراپ ۱۰ گندله (میانگین تعداد دفعاتی که ۱۰ گندله پس از سقوط از ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر می‌شکنند) به عنوان عدد دراپ مجموع گندله‌ها است.

### ۲-۶- اندازه گیری مقاومت فشاری گندله خام

مقاومت فشاری گندله خام شامل دو نوع مقاومت فشاری در حالت تر (W.C.S) و خشک (D.C.S) است. برای اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری گندله خام از دستگاه پرس شرکت Santam با حداکثر فشار ۲۵ کیلوگرم بر گندله استفاده شد. برای این منظور تعداد ۱۰ عدد گندله خام تر و ۱۰ عدد گندله خام خشک (خشک شده در دمای ۱۰۹ درجه سانتی‌گراد) به ترتیب برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر و مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک، با میانگین ابعاد بین ۸ تا ۱۶ میلی‌متر تهیه شد. هر یک از گندله‌ها به صورت مجزا زیر دستگاه پرس قرار گرفت و اعمال نیرو تا زمان شکستن گندله خام و کاهش نیرو به میزان ۲۰ درصد نیروی اعمالی ادامه یافت. در نهایت میانگین مقاومت‌های فشاری ۱۰ عدد گندله خام تر و ۱۰ عدد گندله خام خشک، به ترتیب به عنوان مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر و خشک در نظر گرفته شد.

### ۲-۷- آنالیز گندله‌شوندگی

از آنجا که گندله مطلوب از نظر ابعادی بین ۸ تا ۱۶ میلی‌متر است، در این آزمایش درصد گندله‌های خام تولید شده در اندازه ۸ تا ۱۶ میلی‌متر با عبور از سرندهای ۱۶ تا ۶ میلی‌متر تعیین می‌شود. گندله‌های عبوری از سرند ۶ میلی‌متر به عنوان ریز گندله و گندله‌های مانده روی سرند ۱۶ میلی‌متر به عنوان درشت گندله در نظر گرفته می‌شوند. درصد گندله‌های تولیدی در ابعاد ۸ تا ۱۶ میلی‌متر از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\frac{\text{مجموع وزن گندله‌های مانده روی سرندهای 8 تا 16 میلی‌متر}}{\text{وزن کل گندله‌ها}} \quad (۲)$$

### ۲-۸- آزمایش گندله‌سازی

عملیات گندله‌سازی در کارخانه نیمه صنعتی گندله‌سازی شماره ۱ انجام شد. مراحل کار به این صورت بود که در ابتدا مقدار ۱۰۰ کیلوگرم کنسانتره با ۱ درصد وزنی بنتونیت، ۷ درصد وزنی آب و ۰٫۰۵ درصد وزنی سود با سرعت مناسب درون یک همزن تا دستیابی به رطوبت مورد نیاز، مخلوط و مواد خروجی از همزن به سمت دیسک گندله‌سازی هدایت شد. چرخش مواد روی دیسک دوار موجب اتصال ذرات به یکدیگر و تشکیل گندله خام شده است. گندله‌های خام تولید شده به صورت سرریز از دیسک خارج شده و در نهایت پارامترهای کیفی آن‌ها مورد آنالیز قرار گرفت.

مشخصات دیسک گندله‌سازی در جدول ۴ نشان داده شده است.

**جدول ۴: مشخصات دیسک گندله‌سازی**

| | |
|---|---|
| شرکت سازنده | H.Schafer |
| مدل | Pelletizing Disk |
| قطردیسک | ۱۰۰ سانتی‌متر |
| ارتفاع دیسک | ۲۰ سانتی‌متر |
| زاویه دیسک | ۴۶٫۷ ° |
| سرعت دیسک | ۱۹٫۵ rpm |

## ۳- بحث و نتایج

### ۳-۱- نتایج آزمایش آنالیز سرندی و تعیین سطح ویژه نمونه‌های تهیه شده

برای انجام عملیات گندله‌سازی و بررسی مقایسه‌ای مکانیزم‌های خردایش تجهیزات HPGR و آسیای گلوله‌ای، تعداد سه نمونه از هر یک از این تجهیزات در دانه‌بندی‌های مختلف تهیه و برای عملیات گندله‌سازی آماده‌سازی شد. نتایج آنالیز سرندی و اندازه‌گیری سطح مخصوص این نمونه‌ها در جدول ۵ ارایه شده است.

با توجه به اطلاعات جدول ۵ در مورد اندازه‌گیری سطح مخصوص ذرات با روش شار هوا می‌توان دریافت، محصول HPGR در دانه‌بندی یکسان ۴۳ میکرون، نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای در همین دانه‌بندی، سطح ویژه (سطح مخصوص) بیشتری دارد اما در دانه‌بندی ۹۰ میکرون این پدیده مشاهده نمی‌شود. از آنجا که سطح مخصوص اندازه‌گیری شده با روش شار هوا دقت کافی ندارد، اندازه‌گیری سطح ویژه با روش (BET) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری سطح ویژه با روش BET در جدول ۶ نشان داده شده است.

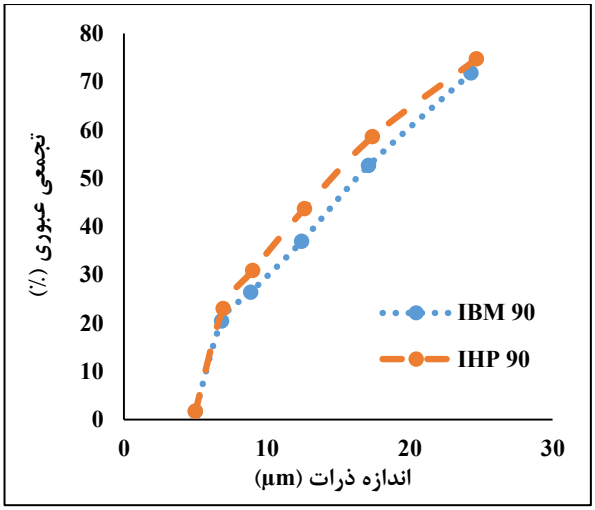
همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، سطح ویژه اندازه‌گیری شده با روش BET در تمام دانه‌بندی‌ها، از سطح ویژه اندازه‌گیری شده با روش شار هوا بالاتر بوده است که این نتیجه می‌تواند از جذب گاز در تمام سطح نمونه اعم از میکروترک‌ها و شکستگی‌ها ناشی شده باشد [۱۶]. همچنین مشخص می‌شود که محصول HPGR در مقایسه با محصول آسیای گلوله‌ای، در دانه‌بندی‌های یکسان، سطح ویژه بالاتری دارد.

جدول ۵: نتایج آنالیز سرندی و سطح ویژه (بلین) نمونه‌های تهیه شده توسط HPGR و آسیای گلوله‌ای با روش شار هوا

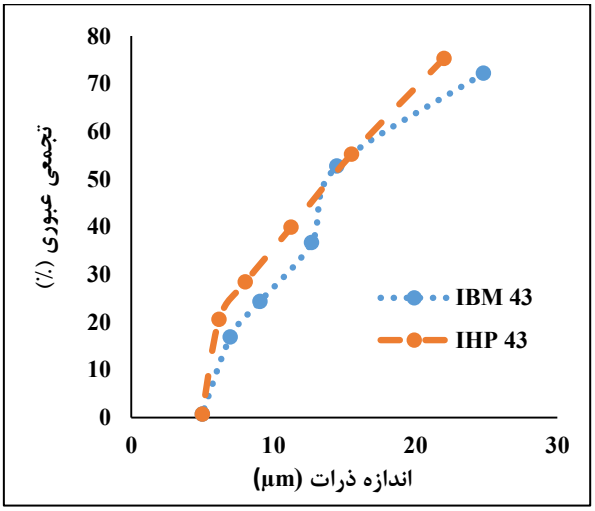
| تجهیز خردایش | کد | $d_{80}$ (میکرومتر) | سطح ویژه (سانتی‌متر مربع بر گرم) |
|---|---|---|---|
| آسیای گلوله‌ای | IBM 90 | ۹۰ | ۱۴۱۱ |
| | IBM 53 | ۵۳ | ۱۶۹۲ |
| | IBM 43 | ۴۳ | ۱۸۷۸ |
| HPGR | IHP 90 | ۹۰ | ۱۴۱۱ |
| | IHP 75 | ۷۵ | ۱۷۰۵ |
| | IHP 43 | ۴۳ | ۲۲۰۱ |

جدول ۶: نتایج آنالیز سرندی و سطح ویژه (بلین) نمونه‌های تهیه شده به وسیله HPGR و آسیای گلوله‌ای با روش BET

| تجهیز خردایش | کد | $d_{80}$ (میکرومتر) | سطح ویژه (سانتی‌متر مربع بر گرم) |
|---|---|---|---|
| آسیای گلوله‌ای | IBM 90 | ۹۰ | ۲۱۰۵۳ |
| | IBM 43 | ۴۳ | ۲۴۳۷۷ |
| HPGR | IHP 90 | ۹۰ | ۲۳۶۹۷ |
| | IHM 43 | ۴۳ | ۲۴۸۵۸ |




شکل ۲: نتایج آزمایش سیکلوسایزر ذرات نرمه موجود در محصول آسیای گلوله‌ای و HPGR دردانه‌بندی ۹۰ میکرون




شکل ۳: نتایج آزمایش سیکلوسایزر ذرات نرمه موجود در محصول آسیای گلوله‌ای و HPGR دردانه‌بندی ۴۳ میکرون

این افزایش سطح مخصوص می‌تواند در نتیجه کاهش توزیع دانه‌بندی، تغییر شکل سطحی ذرات و همچنین افزایش میزان نرمه حاصل شده باشد. از این رو برای بررسی و تحلیل دلایل بالاتر بودن سطح ویژه محصول HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای در دانه‌بندی یکسان، میزان نرمه موجود در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با سیکلو سایزر آنالیز شد. همچنین شکل سطحی ذرات نیز به وسیله میکروسکوپ الکترونی (SEM) بررسی شد.

### ۳-۲- نتایج آزمایش سیکلوسایزر

آزمایش سیکلوسایزر بر روی نمونه‌هایی با $d_{80}$ یکسان و کوچکتر از ۳۸ میکرون در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با ابعاد ۴۳ و ۹۰ میکرون که قبلا به وسیله سرند جداسازی شده‌اند، انجام شد. نتایج این آنالیز در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

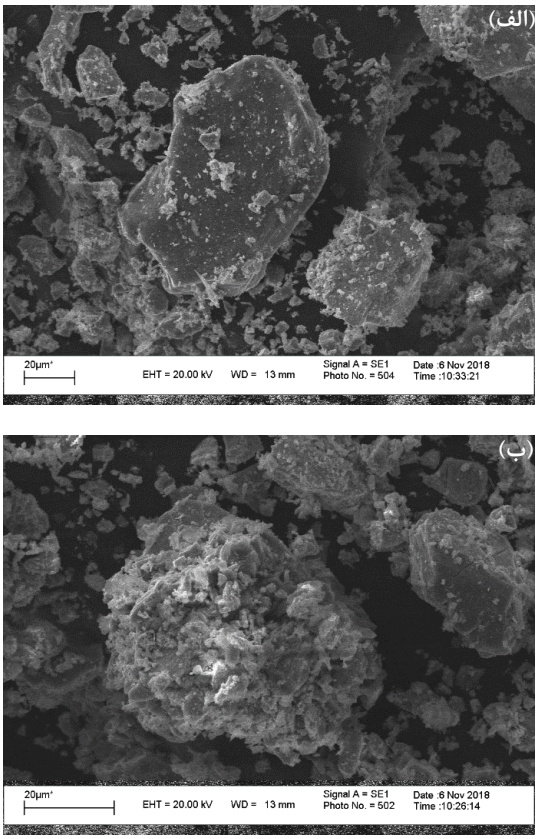
طبق نتایج حاصل، درصد ذرات کوچکتر از ۳۸ میکرون

در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با دانه‌بندی‌های ۴۳ و ۹۰ میکرون تقریبا مشابه است اما دانه‌بندی ذرات کوچکتر از ۳۸ میکرون در محصول HPGR در دانه‌بندی‌های ۴۳ و ۹۰ میکرون، کوچکتر و مقدار ذرات با ابعاد ۷ تا ۲۵ میکرون در محصول HPGR به مراتب بیشتر است.

بنابراین HPGR در تولید ذرات نرمه نقش موثرتری ایفا می‌کند و وجود ذرات ریزتر در محصول HPGR می‌تواند توجیهی برای بالاتر بودن سطح ویژه محصول این تجهیز نسبت به آسیای گلوله‌ای در دانه‌بندی یکسان باشد.

### ۳-۳- نتایج آنالیز SEM

تاثیر HPGR و آسیای گلوله‌ای بر میزان شکستگی‌های سطحی ذرات، طی مطالعات میکروسکوپی بر روی ذرات باقیمانده روی سرند ۹۰ میکرون در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای انجام شد. نتایج این بررسی‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است.



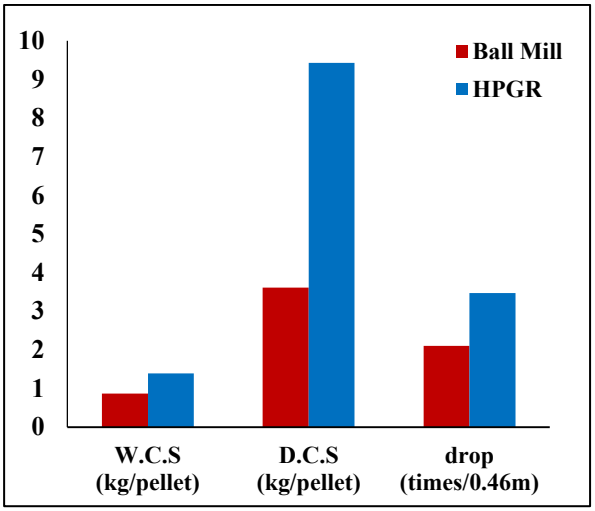

**شکل ۴: الف) شکل سطحی ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای با اندازه تقریبی ۱۰۷ میکرومتر، ب) شکل سطحی ذرات در محصول HPGR با اندازه تقریبی ۱۰۷ میکرومتر**

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، مکانیزم فشار در HPGR موجب ایجاد میکرو و ماکروترک‌هایی در سطح ذرات شده که این ترک‌ها، خود افزایش سطح ویژه ذرات را موجب شده است. علاوه بر این، ذرات در محصول HPGR نسبت به ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای، شکستگی‌های سطحی بیشتری دارد که این عامل نیز می‌تواند سطح ویژه بالاتر در توزیع ابعادی یکسان را توجیه کند.

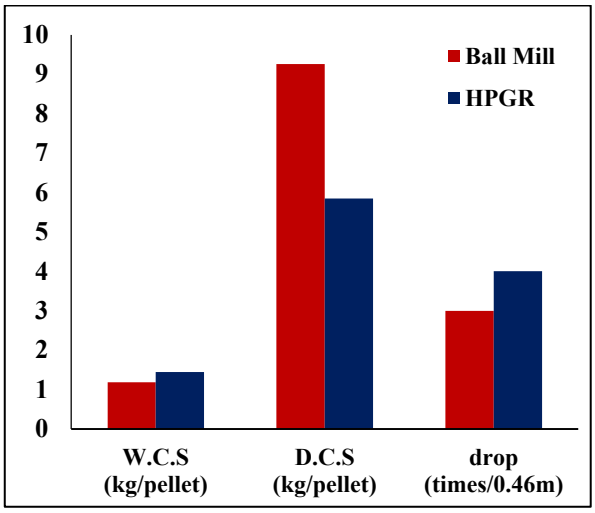
با توجه به نتایج ارایه شده، بالا بودن سطح ویژه ذرات در محصول HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای به بیشتر بودن میزان ذرات ریز با اندازه بین ۷ تا ۲۵ میکرون، وجود میکرو و ماکرو ترک‌ها و شکستگی‌های سطحی بیشتر در محصول HPGR نسبت داده می‌شود.

### ۳-۴- نتایج آزمایش‌های گندله‌سازی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، افزایش سطح مخصوص عامل کلیدی در افزایش مقاومت مکانیکی گندله خام و پخته است. در این تحقیق شاخص‌های کیفی گندله خام، شامل مقاومت دراپ، W.C.S و D.C.S گندله‌های تولید شده از محصولات HPGR و آسیای گلوله‌ای در دانه‌بندی‌های یکسان (۹۰ میکرون و ۴۳ میکرون)، مورد مطالعه واقع شد. نتایج این بررسی‌ها در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.




**شکل ۵: بررسی مقایسه‌ای شاخص‌های کیفی گندله خام تولیدی از محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با $d_{80}$ ۹۰ میکرون**




**شکل ۶: بررسی مقایسه‌ای شاخص‌های کیفی گندله خام تولیدی از محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با $d_{80}$ ۴۳ میکرون**

با توجه به نتایج حاصل از شکل ۵ می‌توان دریافت که انجام گندله‌سازی با محصولات حاصل از تجهیز HPGR و آسیای گلوله‌ای در توزیع دانه‌بندی ۹۰ میکرون، به افزایش مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر در محصول HPGR (۱٫۳۸۷ کیلوگرم بر گندله) در مقایسه با مقاومت فشاری گندله خام در محصول آسیای گلوله‌ای (۰٫۸۷۲ کیلوگرم بر گندله) منجر شده است. همچنین میزان مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک و مقاومت دراپ گندله خام نیز در محصول HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای بالاتر تشخیص داده شد. بنابراین HPGR در بهبود شاخص‌های کیفی گندله خام نسبت به آسیای گلوله‌ای، در توزیع دانه‌بندی ۸۰ درصد عبوری از ۹۰ میکرون عملکرد بهتری داشته است. این عملکرد می‌تواند به افزایش میزان نرمه ۷ تا ۲۵ میکرون در محصول HPGR نسبت داده شود. در این حالت افزایش ذرات ریز موجب افزایش سطح مخصوص و افزایش نیروهای مویینه پس از افزودن آب می‌شود که خود موجب اتصال قوی‌تر ذرات و تراکم بیشتر گندله خام و در نهایت بهبود مقاومت مکانیکی گندله خام می‌شود. همچنین افزایش شکستگی‌ها در سطح ذرات حاصل از HPGR، باعث افزایش انرژی سطحی ذرات و در نتیجه افزایش تمایل ذرات به اتصال به یکدیگر و در نهایت ایجاد تعادل می‌شود. همین اتصال ذرات به یکدیگر موجب افزایش مقاومت مکانیکی گندله خام و جلوگیری از فروپاشی گندله می‌شود.

نتایج حاصل از گندله‌سازی از کنسانتره تولیدی با تجهیز HPGR و آسیای گلوله‌ای با توزیع دانه‌بندی ۸۰ درصد عبوری از ۴۳ میکرون در شکل ۶ ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شاخص مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر و همچنین مقاومت دراپ محصول حاصل از HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای به مراتب بیشتر است اما این مساله در مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک حاصل نشده و آسیای گلوله‌ای در این زمینه عملکرد بهتری نشان داده است.

افزایش بیش از حد سطح مخصوص تا حدود ۲۵۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم در نتیجه افزایش میزان نرمه، به افزایش میزان جذب آب به وسیله کنسانتره ریز دانه حین عملیات گندله‌سازی و عدم جذب آب به وسیله ذرات درشت‌تر مربوط می‌شود. در این حالت ذرات درشت‌تر به دلیل عدم تشکیل فیلم آب در سطح و عدم ایجاد نیروهای مویینه، گندله‌شوندگی کمتری خواهند داشت و این عامل می‌تواند موجب کاهش تناژ تولید شود. این در حالی است که ذرات ریزتر با سطح مخصوص بیشتر گندله‌شوندگی بهتری دارند. در این حالت گندله‌های تشکیل شده از ذرات ریزتر به دلیل جذب اکثریت آب موجود در کنسانتره (بیشتر از ۷ درصد)، در ابتدا دارای فشردگی بیشتر و مقاومت فشاری و مقاومت دراپ بالاتر بوده ولی به محض خشک شدن، آب موجود در گندله خام، تبدیل به تخلخل زیاد شده و موجب کاهش مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک می‌شود. نتایج این پژوهش در جدول ۷ ارایه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، درصد گندله‌های تشکیل شده در اندازه بین ۸ تا ۱۶ میلی‌متر در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با $d_{80}$ ۴۳ میکرون به ترتیب ۵۵ و ۹۰ درصد گزارش شده است.

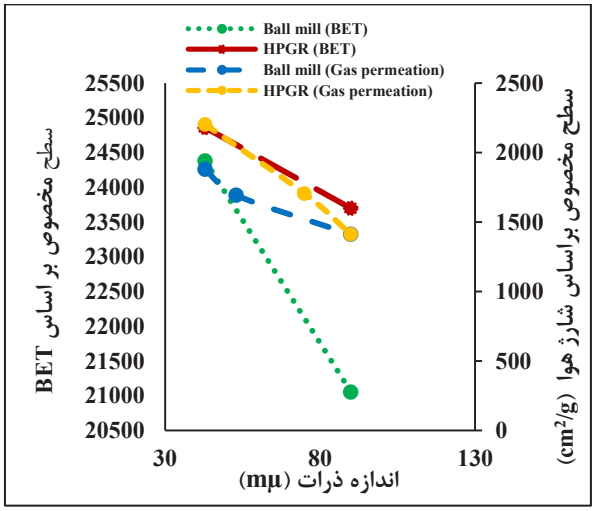
**جدول ۷: درصد گندله‌های تشکیل شده در اندازه بین ۸ تا ۱۶ میلی‌متر از محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای**

| $d_{80}$ (میکرومتر) | BallMill (درصد) | HPGR (درصد) |
|---|---|---|
| ۴۳ | ۹۰ | ۵۵ |
| ۹۰ | ۵۰ | ۹۶ |

این در حالی است که درصد گندله‌های تشکیل شده در اندازه بین ۸ تا ۱۶ میلی‌متر در محصول HPGR و آسیای گلوله‌ای با توزیع دانه‌بندی ۹۰ میکرون به ترتیب ۹۶ و ۵۰ درصد تعیین شده است. بنابراین در کنسانتره با توزیع دانه‌بندی ۹۰ میکرون، مشکل وجود بیش از حد نرمه و سطح

مخصوص بسیار بالا وجود ندارد و کاهش درصد تولید گندله در اندازه بین ۸ تا ۱۶ میلی‌متر در محصول آسیای گلوله‌ای به درشتی ذرات و سطح مخصوص پایین نسبت داده می‌شود.

همچنین تغییرات سطح مخصوص ذرات با تغییرات توزیع دانه‌بندی در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سطح مخصوص ذرات در توزیع دانه‌بندی یکسان در محصول HPGR، همواره بیشتر از سطح مخصوص ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای است. در هر دو روش استفاده شده برای اندازه‌گیری سطح مخصوص، با افزایش اندازه ذرات، سطح مخصوص کاهش می‌یابد. همچنین نتایج عدم دقت کافی روش شار هوا در اندازه‌گیری سطح مخصوص ذرات در دانه‌بندی‌های درشت‌تر از ۸۰ میکرون را نشان می‌دهد.



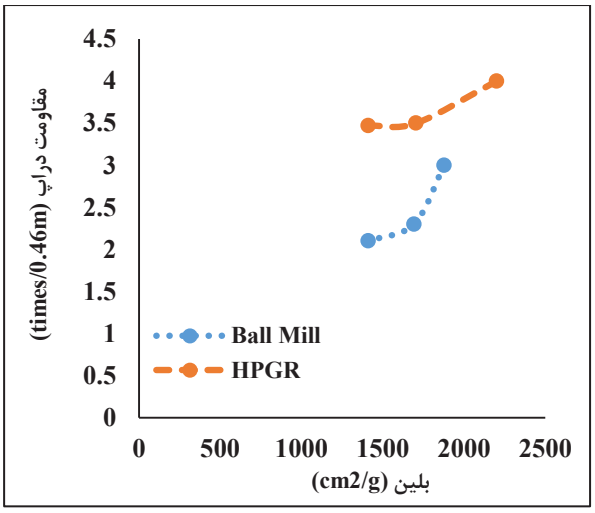

شکل ۷: تغییرات سطح مخصوص با تغییرات اندازه ذرات

### ۳-۵- بررسی تغییرات شاخص‌های کیفی گندله خام در حالت خشک و تر با افزایش سطح مخصوص ذرات

ارتباط میان سطح مخصوص و مقاومت دراپ گندله خام در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج به دست آمده با افزایش سطح مخصوص، مقاومت دراپ گندله خام حاصل از محصولات HPGR و آسیای گلوله‌ای افزایش می‌یابد. همچنین گندله‌های خام تولیدی از محصول HPGR، نسبت به گندله‌های خام حاصل از محصول آسیای گلوله‌ای در توزیع دانه‌بندی یکسان مقاومت دراپ بالاتری دارند.

این اختلاف می‌تواند به اختلاف در میزان سطح مخصوص و در نتیجه اختلاف در میزان ذرات با اندازه بین ۷ تا ۲۵ میکرون که افزایش جذب آب به وسیله ذرات ریز و افزایش نیروهای مویینه را موجب شده، نسبت داده شود. در چنین شرایطی افزایش تراکم گندله و در نتیجه افزایش مقاومت دراپ آن انتظار می‌رود.

افزایش سطح مخصوص ناشی از وجود ذرات نرمه تا محدوده ۲۵۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم (اندازه‌گیری شده با روش BET)، در ابتدا تاثیر منفی در مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک و همچنین مشکل در واکنش اکسایش منیتیت به هماتیت در کوره گندله‌سازی به دلیل کاهش تخلخل را موجب شده اما با ادامه این روند و افزایش سطح مخصوص به بیش از ۲۵۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم (اندازه‌گیری شده با روش BET) این تاثیر منفی در مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر نیز مشاهده می‌شود.

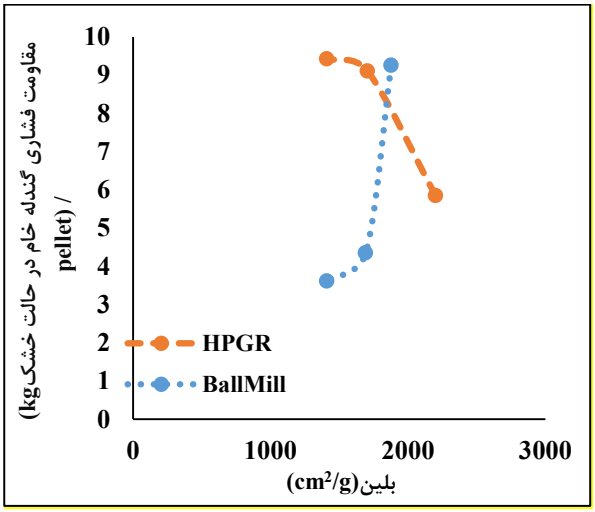



شکل ۸: رابطه میان بلین و مقاومت دراپ گندله خام

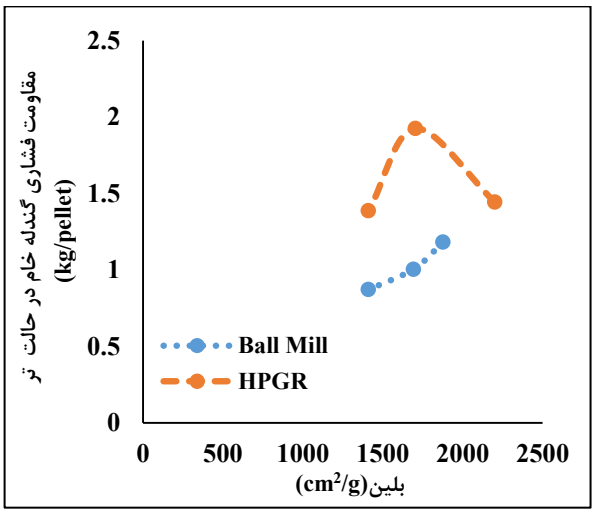
شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش سطح مخصوص، مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر افزایش می‌یابد و محصول HPGR نسبت به آسیای گلوله‌ای، مقاومت فشاری بالاتری در دانه‌بندی یکسان دارد اما نکته قابل توجه کاهش مقاومت فشاری گندله خام در محصول HPGR با افزایش سطح مخصوص به ۲۲۰۱ سانتی‌متر مربع بر گرم (اندازه‌گیری شده با روش تراوایی گاز) است. ادامه روند افزایش سطح مخصوص موجب ایجاد تاثیر منفی در مقاومت فشاری گندله خام در حالت تر می‌شود. این تاثیر منفی می‌تواند در اثر جذب

بیش از حد آب به وسیله ذرات ریز و دارای سطح مخصوص بالا و ایجاد حالت شناوری ذرات و یا در اصطلاح گل‌شدگی گندله باشد. همچنین این تاثیر منفی می‌تواند در اثر تشکیل گندله هسته‌دار نیز حاصل شود. فرآیند پیوند و گرد شدن[۷] گندله خام طی دو مرحله اتفاق می‌افتد، مرحله اول هسته‌زایی[۸] گندله را تشکیل می‌دهد. در این مرحله ذرات ریزتر به واسطه ایجاد سطح مخصوص بالاتر، جذب بیشتر آب را موجب می‌شوند، سپس این ذرات به واسطه نیروی مویینه در کنار هم تجمع پیدا کرده و تشکیل پیوند می‌دهند. این پیوند در اصطلاح هسته گندله نامیده می‌شود. مرحله بعد شامل برفکی شدن[۹] است که در این مرحله سایر ذرات که از نظر ابعادی تا حدودی درشت‌ترند، اطراف هسته تجمع پیدا می‌کنند و گندله خام را تشکیل می‌دهند [۱۷]. حال اگر میزان ذرات ریز و دارای سطح مخصوص بالا در خوراک دیسک گندله‌سازی بیش از حد زیاد باشد، این امر در ابتدا موجب افزایش تولید هسته و جذب اکثریت آب موجود در کنسانتره به وسیله هسته‌هایی تشکیل شده می‌شود. سایر ذرات که در مرحله برفکی شدن اطراف هسته را پوشش می‌دهند، رطوبت کافی ندارند و پیوند ضعیفی را تشکیل می‌دهند. بدیهی است که در این حالت گندله خام مقاومت فشاری کمی دارد.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری گندله خام تولید شده از محصول آسیای گلوله‌ای در حالت خشک، با افزایش سطح مخصوص از ۱۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم تا ۱۹۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم، روند افزایشی داشته است اما در محصول HPGR با افزایش سطح مخصوص از ۱۴۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم تا ۲۲۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم، مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک روند کاهشی و در سطح مخصوص‌های کمتر از ۱۸۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم، دارای مقادیری بیشتر از آسیای گلوله‌ای است. این روند کاهشی می‌تواند به واسطه تولید ذرات نرمه با HPGR و افزایش تخلخل گندله خام در نتیجه جذب آب همانطور که پیشتر اشاره شد، ایجاد شود.




**شکل ۱۰: تغییرات مقاومت فشاری گندله خام در حالت خشک با تغییرات سطح مخصوص ذرات**




**شکل ۹: ارتباط بین سطح مخصوص و مقاومت فشاری گندله خام درحالت تر**

## ۴- نتیجه‌گیری

طی تحقیقات به عمل آمده مشخص شد که در یک دانه‌بندی یکسان، ذرات در محصول HPGR نسبت به ذرات در محصول آسیای گلوله‌ای، سطح مخصوص بیشتری دارند. این افزایش سطح مخصوص ذرات در محصول HPGR، به وجود مقادیر بیشتر ذرات نرمه در اندازه ۷ تا ۲۵ میکرون، وجود شکستگی و میکروترک‌های بیشتر و شکل سطحی ذرات در محصول HPGR نسبت داده شد. همچنین گندله‌های خام تولیدی از محصول HPGR نسبت به گندله‌های تولید شده از محصول آسیای گلوله‌ای در توزیع دانه‌بندی یکسان و $d_{80}$ حدود ۹۰ میکرون، از مقاومت دراپ و مقاومت فشاری بیشتری در حالت تر و خشک برخوردارند. این افزایش با وجود مقادیر بیشتر ذرات نرمه در ابعاد بین ۷ تا ۲۵ میکرون و وجود

شکستگی‌های سطحی بیشتر در محصول HPGR توجیه شد. افزایش مقاومت دراپ و مقاومت فشاری گندله‌های خام تولیدی در حالت تر از محصول HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای در توزیع دانه‌بندی یکسان و $d_{80}$ ۴۳ میکرون نیز با همان دلایل اشاره شده قابل توجیه است. اما کاهش مقاومت فشاری گندله‌های خام تولیدی در حالت خشک در محصول HPGR نسبت به محصول آسیای گلوله‌ای درهمین دانه‌بندی به افزایش تخلخل گندله خام ضمن عملیات خشک‌کنی به واسطه وجود بیشتر ذرات نرمه و در نتیجه جذب بیش از حد آب (بیش از ۷ درصد) نسبت داده شد. در واقع می‌توان گفت همین افزایش ذرات نرمه در ابعاد بین ۷ تا ۲۵ میکرون ضمن افزایش سطح مخصوص، افزایش جذب آب به وسیله ذرات ریزتر و همچنین افزایش نیروهای مویینه را موجب شده است.

کاهش درصد گندله‌های تشکیل شده در اندازه ۸ تا ۱۶ میلی‌متر در محصول HPGR نسبت به آسیای گلوله‌ای در دانه‌بندی ۸۰ درصد عبوری از ۴۳ میکرون نیز به افزایش بیش از حد ذرات نرمه در محصول HPGR، جذب اکثریت مقدار آب موجود در محیط به وسیله ذرات ریز و در نتیجه عدم تشکیل فیلم آب در سطح ذرات درشت‌تر و عدم گندله‌شوندگی ذرات درشت نسبت داده شد.

## ۵- مراجع

[۱] منصوری علی‌آبادی، الف.؛ ۱۳۹۰؛ **"گندله‌سازی سنگ آهن"**. مولف کرت میر، مشهد، انتشارات شاملو، ۱۰۷ صفحه.

[2] Abazarpoor, B. A., Hejazi, R., Saghaeian, M., and Sheikhzadeh, V. (2018). *"Effect of iron ore particle size and shape on green pellet quality"*. International Mineral Processing Congress, Moscow, 1-2.

[3] Sirvikaya, O., and Arol, I. (2010). *"Use of boron compounds as binders in iron ore pelletization"*. The Open Mineral Processing Journal, 3: 25-35.

[4] Dwarapudi, S., Devi, T. U., Mohan Rao, S., and Ranjan, M. (2008). *"Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets"*. The Iron and Steel Institute of Japan International, 48: 768-776.

[5] Forsmo, S. P. E., Samskog, P. O., and Björkman, B. M. T. (2008). *"A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness"*. Powder Technology, 181(3): 321-330.

[6] Pal, J., Ghoari, S., Ammasi, A., Hota, S., Karrane, V. M., and Venugoplan, T. (2004). *"Improving reducibility of iron ore pellets by optimization of physical parameters"*. Journal of Mining and Metallurgy, Section B, 1-3.

[۷] معتمدی، ک.؛ زندوکیلی، س.، حاجی زاده، الف.؛ ۱۳۹۶؛ **"مروری بر تاثیر خصوصیات کنسانتره و نحوه خردایش موثر در کیفیت گندله"**. کنفرانس ملی مهندسی مواد، متالورژی و معدن ایران، اهواز، دانشگاه شهید چمران - سازمان صنعت، معدن و تجارت خوزستان، ۳ صفحه.

[۸] سام، ع.، خوشدست، ح.، مهرانی، ال‌ف.؛ ۱۳۸۹؛ **"فناوری آسیاهای غلتکی فشار بالا"**. تهران، انتشارات دانشگاه هرمزگان، ص ۵۲-۳۵.

[۹] بنیسی، ص.؛ ۱۳۹۵؛ **"مدلسازی و کنترل سیستم‌های فرآوری مواد معدنی"**. وب‌سایت www.kmpc.ir، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[10] Lucy, L., and Jenny, G. (2016). *"Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture"*. Powder Technology, 301: 794-804.

[11] Van der Meer, F. P. (2015). *"Pellet feed grinding by HPGR"*. Minerals Engineering, 73: 21-30.

[۱۲] پناهی، الف.؛ ۱۳۸۹؛ **"امکان‌سنجی تولید کنسانتره سنگ آهن از باطله‌های جدید کارخانه فرآوری مجتمع سنگ آهن گل گهر سیرجان"**. پایان‌نامه کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه کاشان، ۱۹ صفحه.

[۱۳] ملایجردی، ع.، انصاری، و.؛ ۱۳۸۸؛ **"بهبود سینتیک اکسیداسیون کنسانتره چادرملو در فرآیند گندله‌سازی توسط سنگ‌شکن غلطکی فشار بالا"**. سومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۷-۹ بهمن، یزد، ص ۲۱۴۵-۲۱۳۷.

[14] Pourghahramani, P. (2008). *"Mechanical activation of hematite using different grinding methods with special focus on structure changes and reactivity"*. Doctoral Dissertation, Lulea University of Technology Press, Sweden, 29-53.

[۱۵] شرکت مهندسی فکور صنعت تهران؛ ۲۰۰۸؛ **"خلاصه آزمایشات طراحی خط دوم گندله‌سازی گل‌گهر"**. انجام شده توسط شرکت outotec و موسسه SGA آلمان، ۴ صفحه.

[16] Abazarpoor, A. A., Hejazi, R., Saghaeian, M., and Sheikhzadeh, V. (2018). *"Ball mill and HPGR effect on the particle size, shape and specific surface area of pellet feed"*. International Mineral Processing Congress, Moscow, pp. 3.

[17] Lúcia de Moraes, S., Baptista de Lima, J. R., and Ramos Ribeiro, T. (2018). *"Iron Ore Pelletizing Process: An Overview"*. Dimensions, 46-50.

[1] High Pressure Grinding Roll
[2] Wet Compressive Strength
[3] Dry Compressive Strength
[4] Cold Crushing Strength
[5] Inter particle (IP)
[6] Single particle (SP)
[7] Bonding and Balling
[8] Nucleation
[9] Snowballing

Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 1, Spring 2020, pp. 31-35

نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering (JMRE)

DOI:10.30479/jmre.2019.10770.1272

# Investigation the Effect of Grinding Mechanism of Concentrated Fe in Gol-E-Gohar Mine on Quality Indices of Green Pellet

**Motamedi K.[1], Zandvakili S.[2*], Hajizadeh A.[3]**

1- M.Sc Student, Mineral Processing, Dept. of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Kerman, Iran
motamedikian@yahoo.com

2- Assistant Professor, Mineral Processing, Dept. of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Kerman, Iran
s.zandvakili@vru.ac.ir

3- M.Sc, Mineral Processing, Gol-E-Gohar Sirjan Mining and Industrial Complex, Kerman, Iran
hajizade313@yahoo.com

***(Received: 24 May 2019, Accepted: 24 Aug. 2019)***

***Abstract:*** The present study aims to evaluate the effects of fracture mechanism on physical parameters such as size, shape, and specific surface area and to provide a description on how the grinding mechanisms of ball mill and High-Pressure Grinding Roll (HPRG) work. Moreover, the effects of these parameters on qualitative indicators of green pellets were also investigated. Furthermore, the amount of fine particle and surface shape of the obtained particles were compared. Results showed that the specific surface area of particles produced through HPGR is more than Ball Mill. This feature was recognized as the result of the increasing fine particles in the range of 7-25 µm and the presence of micro and macro cracks and fractures on the surface of the most particles manufactured by HPGR. In addition, pelletizing processes of HPGR and ball mill products at the same particle size distribution of 80% less than 43 and 90 µm showed that green pellets produced with HPGR product in d80=90 µm have more drop number and compressive strength in both dry (D.C.S) and wet (W.C.S) modes compared to ball mill. Also, the green pellets produced from HPGR product at d80=43 µm had higher drop number and W.C.S than ball mill product. But, compressive strength of green pellets in HPGR product showed 63.18% lower values of D.C.S than pellets produced by ball mill product at d80=43 µm. The reason for the lower D.C.S of the HPGR product is the increase of fine particles and specific surface area that consequently led to high water absorption by the fine particles.

***Keywords:*** Ball Mill, HPGR, Specific surface area, Qualitative indicators, Green pellet.

## INTRODUCTION

The main object of iron ore processing plants is to produce a concentrate with specific chemical and physical characteristics required for pelletizing processes and attain high-quality pellet for the extraction of iron and steel production. Iron concentrate size distribution and the specific surface area of its particles are the most important physical characteristics of the feed required for pelletizing processes. Therefore, in most cases,

one stage is designed for concentrate grinding before entering to the pelletizing plant. In the pelletizing plants (No. 1 and 2) of the Gol-E-Gohar Mining and Industrial Complex, three grinding processes performes using, respectively, ball mills and HPGR. Iron pellets are spherical balls made of iron concentrate, which are formed through rotating and have a positive effect on the performance of blast furnace [1].

To produce pellet, iron concentrate with 0 to 300 μm particle size is fed to the pelletizing disk after being combined with water, lime, and bentonite (as an adhesive) [2]. The pellets with 8-16 mm size are then separated and put into the heat furnace. Heat furnace includes drying, preheating, firing, after-firing and cooling. Pellets undergo heat treatment and become hard after going through these stages [3,4]. The most important qualitative characteristics of fired pellets include appropriate grading of 8-16 mm, 25-30% porosity [1], suitable moisture [5], minimum drop number of 3 to 4 for green pellet [1], pressure resistance of 0.5-2 kg for wet compressive strength of pellets (W.C.S) [1], pressure resistance of 5-15 kg for dry compressive strength of pellets (D.C.S) [1,6], pressure resistance of 260-350 kg for cold crushing strength of pellets (C.C.S) [1], Abrasion Index (Tumble index) of more than 94% for pellets bigger than 6.35mm and less than 5% for pellets smaller than 0.5mm [1], and maximum FeO content of 0.7% in the fired pellets.

The essence of concentrate, type of additives, concentrate moisture, water pH, iron ore impurities, grading, and the specific surface area of concentrate (Blain number based on $cm^2/g$, $cm^2/cm^3$) are the most important factors affecting the quality of manufactured pellets [7]. Moreover, parameters influencing the specific surface (Blain) are the distribution of particle grading, the shape of surface particles, and the amount of fines aggregates. In other words, a decrease in size distribution and an increase in surface cracks, and also, an increase in the fine particle production, which improves the specific surface area.

The most common crushing machines used for the feed pelletizing are ball mill and HPGR. The crushing mechanism of ball mills involves impact and abrasion, while HPGR uses pressure as the crushing mechanism [8]. In general, abrasion and rolling of particles result in spherical shapes with a smooth surface. However, impact and pressure mechanisms lead to cracks and uneven surfaces. Therefore, it is expected for HPGR products to have a higher specific surface area than the ball mill manufactured pellets.

## MATERIAL AND METHODS

The first step of this study was the preparation of iron concentrate from Gol-E-Gohar complex with 3 different gradings obtained through HPGR and Ball Mill circuits of mineral processing in the semi-industrial plant of Gol-E-Gohar complex. We specifically focused on gathering two similar gradings from each machine while considering physical variables such as the feeder speed, changes in the retention time in mills, changes in the grading of HPGR feed, and other factors influencing the particles grinding circuit. Subsequently, the specific surface area of particles was analyzed using gas permeability and surface adsorption methods. In addition, the effects of HPGR and ball mill on the fine particle production and surface shape of particles were investigated using cyclosizer and SEM images. Finally, after the pelletizing processes using similarly graded concentrates from ball mill and HPGR, qualitative indicators of the green pellet were analyzed in terms of their wet and dry compressive strength and, also, their drop number.

## RESULTS AND DISCUSSION

From each equipment with different gradings, three samples were prepared for pelletizing and assessing the crushing mechanisms of HPGR and ball mill. Results of sieve analysis and specific surface area measurements revealed that the specific surface area of HPGR product in the size range of 43-90 μm was more than ball mill particles in the same size distribution. However, gas permeability is not an accurate method in measuring the specific surface of large particles.

In addition, investigation of the fine particle produced by HPGR and ball mill showed that fine aggregates between 7-25 μm are considerably more in HPGR than in ball mill.

Moreover, the results show that the surface shape of HPGR products have more fractures and, also, more micro and macro cracks than the specific shape of particles produced from Ball Mill.

Based on the results of this study, high specific surface area of particles from HPGR is directly related to the higher fine particle production with 7-25 μm size and also presence of more micro and macro cracks and surface fractures in the products of this equipment.

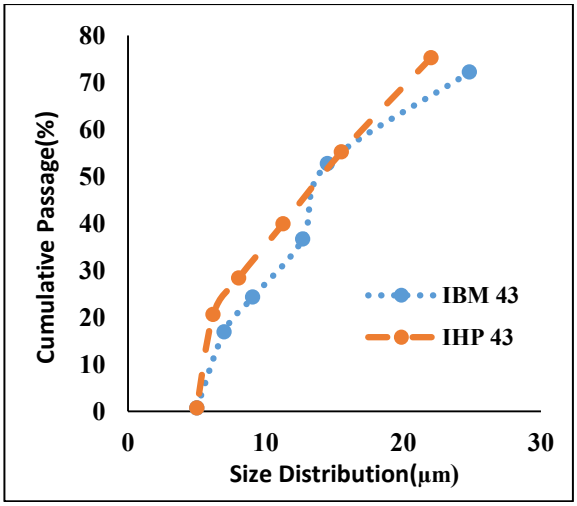



**Figure 1.** Results of Cyclosizer test on fine particle of Ball Mill and HPGR products in 43 $\mu m$

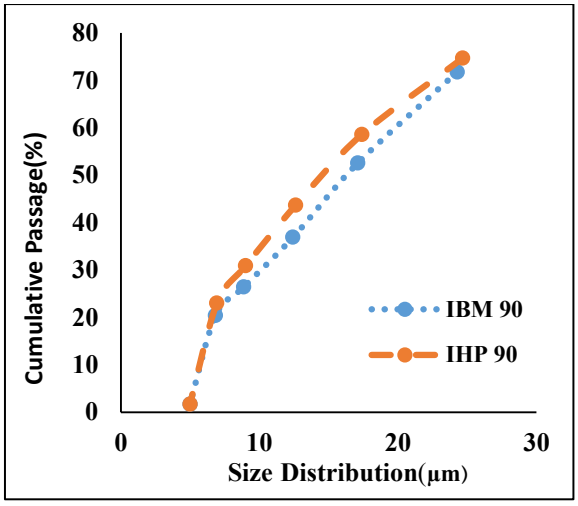



**Figure 2.** Results of Cyclosizer test on fine particle of Ball Mill and HPGR products in 90 $\mu m$

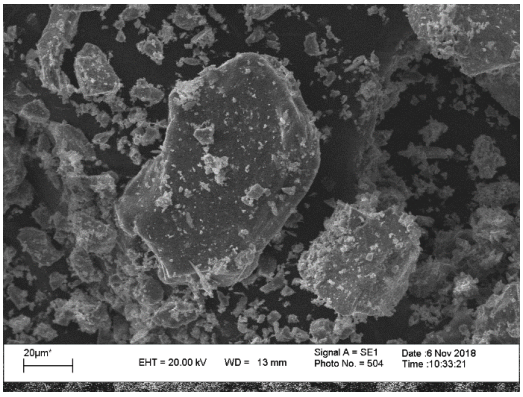



**Figure 3.** Surface shape of particles from Ball Mill with an approximate size of 107 $\mu m$

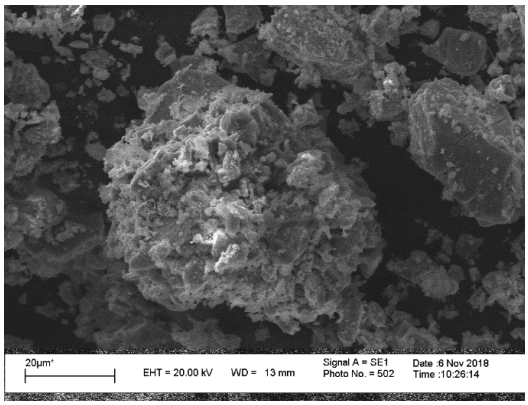



**Figure 4.** Surface shape of particles from HPGR with an approximate size of 107 $\mu m$

In this study, qualitative indicators of green pellets such as drop number, W.C.S and D.C.S obtained from HPGR and Ball Mill with similar grading (90 µm and 43 µm) were investigated. The results are shown in Figures 5 and 6.

As seen in Figure 5, produced pellets from HPGR production in d80 = 90 µm were more resistant to pressure in wet and dry conditions and, also, had a higher drop number compared to the product of Ball Mill. This performance may be the result of increased amounts of fine particles between 7-25 µm in HPGR process. in this condition, an increase in fine production results in increased specific surface area and rising the levels of capillary forces after adding water that cause forming a stronger connection between particles, higher density of green pellet and, finally, improving the mechanical resistance of manufactured pellets. In addition, the increased number of fractures on the surface of particles produced by HPGR results in increasing the surface energy of particles and, thus, increasing the tendency of particles to form connections which results in a balance between them. This connection between particles causes stronger mechanical resistance in green pellets and prevents pellet breakup.

According to Figure 6, the green pellets obtained from HPGR with d80 = 43µm were more resistant to pressure in wet condition and had a higher drop number compared to the green pellet produced by Ball Mill. However, the pressure resistance of dry green pellets produced by HPGR was 63.18% less than the pressure resistance of Ball Mill product. This may be due to a significant increase in the amount of fine aggregates with 7-25 µm size, which results in the increased specific surface of the product. In this case,

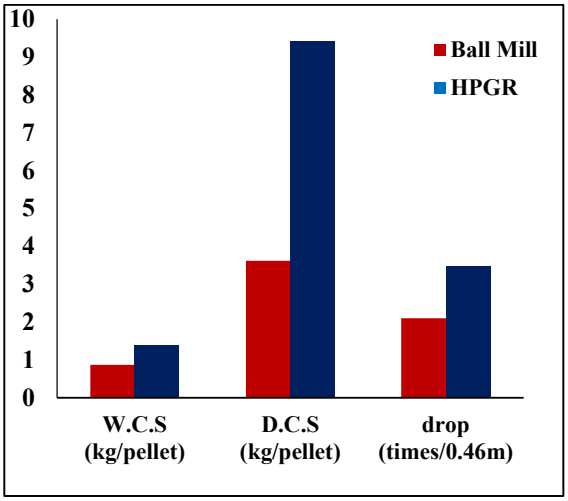



**Figure 5.** Comparative study of qualitative indicators for green pellet produced from HPGR and Ball Mill with d80:90 $\mu m$

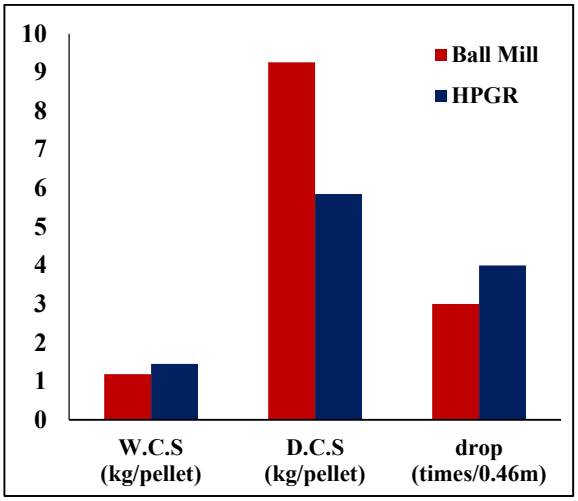



**Figure 6.** Comparative study of qualitative indicators for green pellet produced from HPGR and Ball Mill with d80:43 $\mu m$

manufactured pellets made of smaller particles are more resistant to pressure and drop in wet condition due to the presence of large quantities of absorbed water in the concentrate (more than 7%); however, in dry condition, the water in green pellets turns into high porosity and causes a decrease in the dry compressive strength of pellets.

## CONCLUSION

Based on the results of this study, the specific surface area of the particles produced from HPGR product is more than Ball Mill particles in similar grading. This increase in the specific surface area of particles from HPGR product is due to higher quantities of the fine particle with 7-25 µm size, as well as more fractures and micro-cracks and the surface area of HPGR product. In addition, green pellets produced from HPGR products have higher drop and pressure resistance in wet and dry conditions compared to Ball Mill products with similar grading (d80 = 90µm). Larger quantities of the fine particle with 7-25 µm size and presence of more surface fractures in HPGR product were considered as the main reason for these results. The same explanation can also be presented about the higher drop and pressure resistance of HPGR manufactured green pellets in wet conditions compared to the product of Ball Mill with the same grading and d80 = 43µm. However, based on our observation, low-pressure resistance of HPGR manufactured green pellets in dry condition was due to an increase in levels of pellet porosity during the drying process which, in turn, was the result of larger amounts of fine particle and, thus, high water absorption (more than 7%). In other words, it could be stated that this increase in fine particles with 7-25 µm size causes an increase in the specific surface, higher water absorption by finer particles and increased levels of capillary forces.

## REFERENCES

[1] Ali Abadi, M. (2011). *"Iron ore pellets"*. Author of Kurt Mir, Mashhad, Shamloo Publications.

[2] Abazarpoor, B. A., Hejazi, R., Saghaeian, M., and Sheikhzadeh, V. (2018). *"Effect of iron ore particle size and shape on green pellet quality"*. International Mineral Processing Congress, Moscow.

[3] Sirvikaya, O., and Arol, I. (2010). *"Use of boron compounds as binders in iron ore pelletization"*. The Open Mineral Processing Journal, 3: 25-35.

[4] Dwarapudi, S., Devi, T. U., Mohan Rao, S., and Ranjan, M. (2008). *"Influence of pellet size on quality and microstructure of iron ore pellets"*. The Iron and Steel Institute of Japan International, 48: 768-776.

[5] Forsmo, S. P. E., Samskog, P. O., and Björkman, B. M. T. (2008). *"A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness"*. Powder Technology, 181(3): 321-330.

[6] Pal, J., Ghoari, S., Ammasi, A., Hota, S., Karrane, V. M., and Venugoplan, T. (2004). *"Improving reducibility of iron ore pellets by optimization of physical parameters"*. Journal of Mining and Metallurgy, Section B.

[7] Motamedi, K., Zandukili, S., and Hajizadeh, A. (2017). *"A Review of the Impact of Concentrate Characteristics and How to Effective Crushing in Pellet Quality"*. National Conference on Materials Engineering, Metallurgy and Mining of Iran, Ahvaz, Shahid Chamran University - Khuzestan Industry, Mining and Trade Organization.

[8] Sam, A. Khoshdast, H., and Mehrani, A. F. (2010). *"Technology of high pressure roller Asia"*. Tehran, Hormozgan University Press.