

بررسی تاثیر مکانیزم خردایش و ترکیب کنسانتره گل گهر روی ریزساختار و خواص مکانیکی گندله

ابوذر اسکندی نسب^۱، کاظم طهماسبی^{۲*}، غلامحسین اکبری^۳

۱- کارشناس ارشد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- نویسنده مسئول، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران tahmasebi@uk.ac.ir

Orcid number: 0000-0001-6612-6798

۳- استاد، بخش مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده:

در این تحقیق تاثیر ترکیب مواد اولیه و فرایند خردایش در مجتمع گل گهر روی خواص گندله نهایی بررسی شده است. آنالیز ترکیب مواد اولیه، دانه بندی، میزان رطوبت و اندازه گیری سطح ویژه به دو روش بلین و BET انجام شد. همچنین اندازه گیری استحکام و آنالیز های ریزساختاری به کمک SEM از گندله های خام و پخته شده انجام شد و مقاومت سایشی و میزان کرویت گندله ها بررسی گردید. نتایج آزمایشات نشان داد که دانه بندی ذرات تولید شده توسط آسیای گلوله ای ریزتر بوده و سطح ویژه بلین بالاتر ($1988 \text{ cm}^2/\text{g}$) دارند، اما بر اساس آزمون BET سطح ویژه ذرات تولید شده با هر دو روش خردایش به هم نزدیک است. مورفولوژی ذرات تولید شده توسط دو روش آسیاکاری به شکل نامنظم و غیر کروی بوده است. خوراک ورودی کارخانه گندله سازی شماره یک، دارای درصد بالاتری از FeO، گوگرد و اکسید منیزیم است. همچنین بررسی های ریزساختاری گندله نشان از توزیع بهتری از ذرات ریزدانه و فازهای غیر مگنتیتی در گندله های تولید شده در کارخانه شماره یک دارد. گندله تولید شده در کارخانه شماره ۱ استحکام بالاتر در حالت گندله مرطوب (WCS) دارد، در حالی که استحکام خشک (DCS) و استحکام پخت (CCS) گندله در کارخانه شماره ۲ بالاتر است. علاوه بر این ۹۶/۳ درصد گندله های کارخانه شماره یک تست سایش دامپلر را بدون خرد شدن گذرانده اند و میزان کرویت آنها ۰/۸۲۴ بوده که نسبت به گندله های تولید شده به روش سایش HPGR بالاتر است.

واژگان کلیدی: گندله، احیای آهن، HPGR، مگنتیت، دانه بندی

Studying the Effect of Grinding Mechanism and Composition of Golgohar Concentrate on the Microstructure and Mechanical Properties of Pellets

Abstract

The effect of raw material composition and grinding process by ball mill and HPGR in Golgohar Complex on the properties of the final pellet was investigated. Tests were performed on the mixer input feed in the form of raw material composition analysis, granulation, moisture content and specific surface area measurement using two methods, Blaine and BET. Also, strength

measurement and microstructural analysis were performed using SEM on raw and cooked pellets. In addition, the abrasion resistance and sphericity of the pellets were investigated. The results of the tests showed that the particle size produced by the ball mill was finer and had a higher specific surface area ($1988 \text{ cm}^2/\text{g}$). The morphology of the particles produced by the two milling methods was irregular and non-spherical and did not differ significantly from each other. The input feed of the pelletizing plant number one had a higher percentage of FeO, sulfur, and magnesium oxide. Also, microstructural studies of the pellets indicate a better distribution of fine particles and non-magnetic phases in the pellets produced in Plant No. 1. The pellets produced in Plant No. 1 have higher wet strength (WCS), while the dry strength (DCS) and fired strength (CCS) of the pellets produced in Plant No. 2 are higher. In addition, 96.3% of the pellets from the plant number one passed the dumper abrasion test without crushing, and their sphericity was 0.824, which was higher than that of the pellets produced by the HPGR method.

Keywords: Pellets, Iron recovery, HPGR, Magnetite, Granulation

۱- مقدمه

گندله سازی فرآیندی واسطه جهت تولید مواد اولیه احیاء مستقیم یا کوره بلند در چرخه تولید فولاد است. نرمة های سنگ آهن به همراه چسب و آب در اثر غلتاندن، به آگلومره هایی با اندازه مشخص تبدیل می شوند که گندله نام دارد. خاصیت اصلی و لازم ذرات مواد برای گندله سازی، قابلیت آن ها برای تولید گندله هایی با استحکام فشاری مناسب است که از تمایل آن ها به کروی شدن ناشی می شود. قابلیت کروی شدن ذرات هم نتیجه خواصی چون کاهش انرژی سطحی ذرات در اثر تمایل به کاهش انرژی است [۱]. برای تولید گندله خام، نرمة سنگ آهن شامل مواد افزودنی که اندازه درصد بالایی از آن کوچکتر از ۴۴ میکرومتر است با محلول های ترکننده، مانند آب جهت دستیابی به شکل کروی در دستگاه های گندله ساز به چرخش درآورده می شود تا گندله خام تولید گردد [۲]. در حین تولید گندله خام، ممکن است مواد افزودنی و چسبیده برای بهبود کیفیت و خواص متالورژیکی-مکانیکی گندله به آن اضافه شود. در مرحله بعد گندله خام تحت حرارت قرار گرفته تا ابتدا خشک و سپس پخته شده به طوری که بدون کاهش میزان تخلخل آن و برقراری پیوند بین ذرات سنگ آهن و مواد سرباره ساز، استحکامش افزایش یابد. با سرد شدن گندله، به طوری که در آن ترک ایجاد نشود، گندله آماده احیاء است [۳].

طی فرایند تولید گندله های سنگ آهن اکسیداسیون مگنتیت بین ذرات کنسانتره، پیوندی قوی ایجاد می کند و موجب استحکام گندله می شود که در نتیجه تولید غبار کم تر در کوره احیاء مستقیم را به همراه دارد [۴]. همچنین، فرایند گندله سازی منجر به ایجاد سطح متخلخل درون گندله ها جهت نفوذ گازهای اکسیدی در کوره گندله سازی و گازهای احیایی در کوره احیاء مستقیم می شود. تهیه خوراک مناسب برای کوره های احیاء با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی یکسان، کاهش سرباره سازی و بالابردن راندمان تولید در فرایند فولادسازی با حذف عناصر مذاب در طی گندله سازی و حمل و نقل و جابه جایی راحت تر گندله در مخازن و کوره احیاء مستقیم از دیگر مزایای گندله سازی است [۵].

از عوامل تأثیرگذار بر گندله شونگی می توان به توزیع دانه بندی ذرات، سطح ویژه، شکل ذرات، قابلیت ترشدن ذرات، میزان چسب و درصد رطوبت خمیر اشاره کرد. ترکیب بلوری ذرات نیز اگر شامل اجزای رسی مواد چسبیده باشد، در تولید گندله مؤثر است [۶]. خواص شیمیایی خوراک ورودی، شامل ترکیب عیار آهن به همراه ناخالصی ها است که نمی توانند از حد معینی بیش تر یا کم تر شوند، مثلاً گوگرد باید کم تر از 0.3% باشد تا کیفیت گندله تولیدی بالا رود. همچنین میزان عیار آهن در خوراک ورودی اگر خیلی زیاد و مواد سرباره ساز بسیار کم باشند، تشکیل سرباره و یا برقراری پیوند بین اجزای مواد اولیه برای ایجاد استحکام گندله پخته و استحکام حین احیاء گندله برقرار نمی شود و در این صورت باید از چسب زیاد استفاده کرد [۱ و ۳]. هر چه سطح ویژه پودر

بیشتر شود، سطح تر شونده ذرات بیشتر می شود. اگر گندله خام استحکام کافی را نداشته باشد یا رطوبت زیادی داشته باشد، در حین نقل و انتقال ترک و شکافهایی بر روی آن به وجود خواهد آمد و ترک در گندله خام باعث کاهش استحکام گندله پخته می شود [۷].

در کوره گندله سازی، سرعت نفوذ هوای داغ و اکسایش، به غلظت اکسیژن در گاز خشک کننده بستگی دارد. هرچه محیط اکسیدی تر باشد، مگنتیت باقی مانده کم تر خواهد بود. افزایش دمای گاز خشک کننده نیز با افزایش سرعت عبور گاز از حفره ها، اکسایش را بهبود می دهد. زمان نیز در نفوذ اکسیژن و اکسایش مگنتیت عامل مهمی است؛ با طولانی تر شدن زمان پخت، نفوذ اکسیژن عمیق تر و اکسایش مگنتیت کامل تر خواهد شد. در نهایت سرعت اکسیداسیون به سطح ویژه ذرات گندله نیز بستگی دارد. هرچه ابعاد دانه های مگنتیتی ریز تر باشد، به علت داشتن سطح واکنش بیشتر، سرعت اکسایش بیشتر خواهد بود؛ بنابراین معمولاً برای تولید گندله از کانه مگنتیتی، مواد اولیه تحت خردایش بیشتری قرار می گیرند [۳].

در مجتمع گل گهر خردایش خوراک ورودی به کارخانه گندله سازی شماره ۱ با آسیای گلوله ای و خردایش خوراک ورودی به کارخانه گندله سازی شماره ۲ به وسیله آسیای غلتکی فشار بالا صورت می گیرد. مکانیزم کاهش اندازه ذرات در آسیای گلوله ای، ساییش است که در اثر ساییش ذرات روی یکدیگر و یا ساییش ذرات روی گلوله ها به وجود می آید. به طور کلی این مکانیزم در آسیاهای گلوله ای در حرکت آبخاری اتفاق می افتد که موجب تولید ذرات با ابعاد بسیار ریز می گردد [۸]. مناسب ترین اندازه ذرات برای ساخت گندله ناشی از خردایش توسط آسیای گلوله ای، برابر با ۸۰٪ کوچک تر از ۴۵ میکرون ($K80=45\mu m$) با سطح ویژه ذرات برابر با $\frac{cm^2}{g}$ ۱۸۰۰ است [۶]. شکل ذرات در محصول آسیای گلوله ای نزدیک به دایره و با برجستگی های کم روی ذرات در بلین های بالا است؛ زیرا در آسیای گلوله ای در اثر تماس ذرات با یکدیگر یا در اثر ضربه گلوله ها، گوشه های تیز ذرات از بین می رود و برجستگی های آنها کم می شود. افزایش سطح ویژه پودر در آسیای گلوله ای فقط منوط به کاهش اندازه ذرات در اثر ضربه گلوله ها و ساییش است. سطح ویژه پودر را با دو روش شار هوایی یا تراوایی گاز (بلین) یا روش نفوذ گاز خنثی بر روی سطوح، BET، مشخص می نمایند. این دو روش اندازه گیری اعداد متفاوتی را از سطح ویژه ارائه می دهند، بطور مثال در بررسی صورت گرفته در خط ۵ مجتمع گل گهر که بلین آسیای گلوله ای $\frac{cm^2}{g}$ ۱۸۰۰ می باشد، سطح ویژه اندازه گیری شده با روش BET برابر با $\frac{cm^2}{g}$ ۸۵۰۰ می باشد [۹].

تغییر ترکیب شیمیایی خوراک ورودی مجتمع های فراوری سنگ آهن کار بسیار دشوار و پرهزینه ای هست چرا که تولید آهن در مقیاس بسیار وسیع صورت می گیرد و آهن جزو فلزات نادر با ارزش افزوده بالا نیست و ارزش افزوده فولاد عمدتاً ناشی از تولید انبوه آن است. به همین واسطه بسیاری از محققان در تلاش برای بهبود کیفیت گندله و نرخ احیاءپذیری آن از طریق تغییر پارامترهای فیزیکی هستند. به طور مثال پال و همکارانش [۱۰]، بدون تغییر ترکیب شیمیایی و صرفاً با تغییر اندازه ذرات افزودنی هایی مثل آهک و ذغال سنگ آنتراسیتی و حفظ دمای پخت در محدوده $1250^{\circ}C$ تا $1275^{\circ}C$ موفق به افزایش ۷ درصدی نرخ احیاء گندله ها شدند. ایلجانا و همکارانش [۱۱]، تاثیر اندازه گندله ها روی خواص متالورژیکی آن را بررسی کرده اند، نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزایش اندازه ذرات گندله منجر به کاهش احیاءپذیری و افزایش میزان استحکام فشاری سرد گندله ها شده است. ابادرپور و همکارانش [۱۲]، اثر اندازه ذرات مواد اولیه و روش آسیاکاری را بررسی کرده اند و بر اساس یافته های آنها اندازه ذرات کوچکتر با سطح ویژه بالا منجر به استحکام فشاری خام بالاتر و عدد افتادن بزرگ تری شده است.

سختی و آسیا پذیری اصلی ترین عوامل تعیین کننده در خردایش کانی های آهن ذکر شده اند، که بطور عمده توسط اندیس کار بوند (BWI) تعیین می شوند [۱۳]. تحقیقات زیادی روی شرایط بهینه آسیاهای گلوله ای برای رسیدن به توزیع اندازه دانه مناسب در کمترین زمان و صرف کمترین انرژی آسیا کاری برای رهاسازی بیشینه هماتیت صورت گرفته است و عوامل متعددی همچون نسبت گلوله به کنستانتره، میزان شارژ، سرعت گردش آسیا و میزان رطوبت در تحقیقات مختلف برای ترکیب کانی های متعدد بررسی و بهینه شده اند [۱۴]. مک ناب و همکارانش آنالیزی اقتصادی از روش های مختلف خردایش کانی های مگنتیتی ارائه کرده اند که با توجه به کاهش حجم معادن هماتیتی در آینده اهمیت بالایی خواهد داشت. بر اساس ارزیابی های آنها، با در نظر

گرفتن افزایش قیمت های انرژی و همچنین اعمال مالیات بر کربن بیشتر در آینده، ترکیب کار آسیای HPGR و سایشی که در فشار محیط کار می کنند همراه با جداسازی ناخالصی ها در چند مرحله می تواند هزینه ها را تا ۲۵٪ نسبت به روش خردایش با آسیاهای گلوله ای تر کاهش دهند [۱۵]. همچنین متیس و همکارانش آسیای غلتکی عمودی (VRM) را بعنوان یک روش پیشنهادی جهت کاهش میزان مصرف انرژی و بهره وری بالاتر در خردایش کانیهای مگنتیتی ارائه کرده اند [۱۶]. اباذریپور و همکارانش نیز روش خردایش بال میل را با روش خردایش HPGR در فرایند تولید گندله مقایسه کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که کیفیت گندله با افزایش سطح ویژه بهبود می یابد. در تحقیق صورت گرفته توسط این گروه محققان فرایند خردایش توسط آسیای غلتکی منجر به سطح ویژه بالاتر و متعاقب آن استحکام خام بالاتر شده است. همچنین شکل غیر کرووی ذرات تولید شده در آسیای غلتکی منجر به فشردگی بالاتر گندله ها شده است [۱۲].

با توجه به مطالب ارائه شده روش خردایش تاثیر قابل ملاحظه ای روی شکل، توزیع اندازه ذرات و هزینه های تولید دارد و در کنار ترکیب کنستانتتره جزو عوامل تعیین کننده و مهم در کیفیت گندله نهایی است. از این رو هدف مد نظر در این پژوهش، مقایسه مکانیزم خردایش خوراک ورودی و تأثیر آن بر استحکام گندله ی محصول است. با بررسی کیفیت گندله خام تولید شده در دو روش خردایش بال میل و HPGR و بررسی تغییرات ریزساختاری ناشی از این دو نوع خردایش بر گندله پخت شده، تاثیر هر یک از این عوامل روی استحکام نهایی و خواص گندله پخت شده ارزیابی شده است.

۲- مواد و روش ها

شرکت معدنی صنعتی گل گهر سیرجان دارای شش آنومالی (رگه معدنی) با درصد گانگ های متفاوت است، خوراک ورودی به کارخانه شماره ۱ از آنومالی شماره ۱ و خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲ از آنومالی شماره ۳ تأمین می شود. برای بررسی تاثیر فرایند نوع خردایش روی خواص گندله های تولید شده در دو کارخانه شماره ۱ و ۲ که به ترتیب از سیستم خردایش آسیای گلوله ای و آسیای غلتکی فشار بالا استفاده می کنند، در مقاطع مختلف خط تولید آزمون های اندازه گیری خواص فیزیکی، شیمیایی، جذب سطحی و ریزساختاری مواد صورت گرفت. در ابتدا آنالیز شیمیایی، اندازه گیری سطح ویژه و درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون روی خوراک ورودی کارخانه های شماره ۱ و ۲ کارخانه های گندله سازی مجتمع معدنی گل گهر انجام شد، که خلاصه نتایج آن بر اساس نتایج سه ماه اردیبهشت، خرداد و تیرماه در سال ۱۳۹۸ در جداول ۱ و ۲ آورده شده است. در این جدول آنالیز میزان آهن و FeO با روش شیمی تر (تیتراسیون) انجام شده، آنالیز گوگرد با دستگاه Leco CS744 و سطح ویژه به روش بلین و درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون به کمک غربال تر انجام گرفته است.

جدول ۱: آنالیز خوراک ورودی به کارخانه شماره ۱

آنالیز فیزیکی گندله ۱		آنالیز شیمیایی گندله ۱				
درصد ذرات کم تر از ۴۵ میکرون	سطح ویژه $\frac{cm^2}{g}$	درصد MgO	درصد S	درصد FeO	درصد Fe کل	تاریخ
۸۴/۵	۲۲۱۷	۲/۳	۱/۰۲	۲۵/۵	۶۶/۶	۹۸/۰۲
۸۴	۲۱۶۹	۲/۳	۱/۰۲	۲۵/۵	۶۶/۶	۹۸/۰۳
۸۲/۱	۲۱۵۰	۲/۱	۰/۹۷	۲۵/۹	۶۶/۷	۹۸/۰۴
۸۳/۵	۲۱۷۹	۲/۲	۱/۰۰	۲۵/۶	۶۶/۶	میانگین

جدول ۲: آنالیز خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲

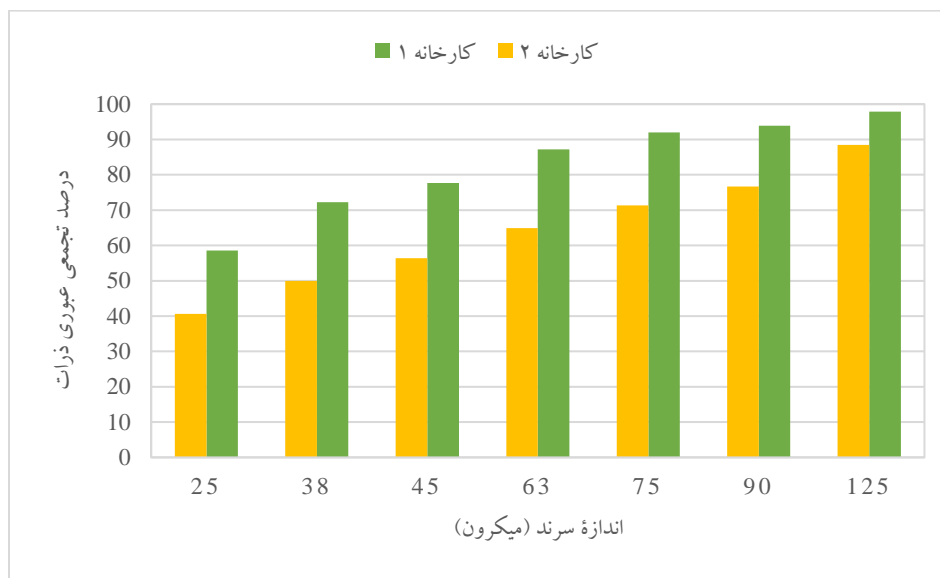
آنالیز فیزیکی گندله ۲		آنالیز شیمیایی گندله ۲				
درصد ذرات کمتر از ۴۵ میکرون	سطح ویژه آسیای فشار قوی $(\frac{cm^2}{g})$	درصد MgO	درصد S	درصد FeO	درصد Fe کل	تاریخ
۴۶/۷	۱۳۷۰	۱/۷۰	۰/۲۹	۲۲/۷	۶۷/۷	۹۸/۰۲
۴۶/۹	۱۳۶۲	۱/۷۶	۰/۳۰	۲۲/۶	۶۷/۷	۹۸/۰۳
۴۷/۱	۱۳۳۶	۱/۵۷	۰/۲۸	۲۲/۳	۶۷/۵	۹۸/۰۴
۴۶/۹	۱۳۳۵	۱/۶۸	۰/۲۹	۲۲/۵	۶۷/۷	میانگین

بررسی های ریزساختاری و مورفولوژیکی از ذرات مواد اولیه و ساختار گندله های تولید شده توسط میکروسکوب الکترونی روبشی Tescan Vega TS5130 انجام شد و از نرم افزار پردازش تصویر MIP برای آنالیز گندله ها بهره گرفته شد. سطح ویژه خوراک ورودی به میکسر ها به دو روش بلین و BET انجام شد. همچنین میزان رطوبت به کمک رطوبت سنج لیزری اندازه گیری شد، در این روش میزان کاهش وزن نمونه در اثر تابش پرتو لیزر ثبت می شود و به کمک آن درصد رطوبت نمونه سنجیده می شود. به منظور بررسی مقاومت به ضربه گندله تر، آزمون عدد افتادن گندله تر انجام گرفت. در این آزمون تعداد دفعاتی که گندله در حالت مرطوب بدون شکستن از ارتفاع معینی رها می شود محاسبه می شود. روی گندله های پخته شده تست اندازه گیری میزان کرویت و تست سایش به کمک دستگاه تامبلر نیز صورت گرفت. علاوه بر این تست اندازه گیری استحکام فشاری در سه حالت گندله مرطوب (WCS)، خشک شده (DCS) و پخت شده (CCS) انجام شد. آنالیز استحکام فشاری توسط دستگاه های اتوماتیکا (برزیلی) و دستگاه سنتام (ساخت داخل) انجام شده است. آنالیز استحکام فشاری گندله پخت شده در سه مرحله صورت گرفت، در مرحله اول با انتخاب ۳۰ عدد گندله با بهترین اشکال از نظر کروی بودن و بدون ترک و شکستگی، به عنوان نمونه انتخابی انجام شد. در دو مرحله دیگر، آزمون با انتخاب نمونه بصورت اتفاقی، یعنی بدون جداکردن گندله های شکسته و غیرکروی صورت گرفت.

۳- نتایج و بحث

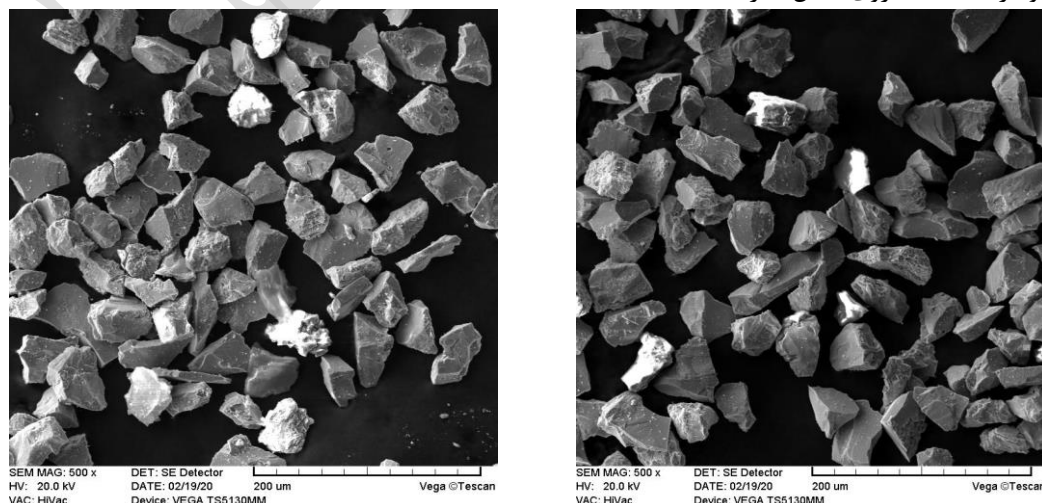
نتایج آنالیز شیمیایی خوراک ورودی به کارخانه های شماره ۱ و ۲ که به ترتیب در جداول شماره ۱ و ۲ آمده است، نشان گر وجود درصد بالاتر از FeO، گوگرد و اکسید منیزیم در خوراک ورودی کارخانه گندله سازی شماره یک است. مقدار بالاتر اکسید آهن به شکل ووستیت (FeO) می تواند به معنی سخت تر احیا شدن گندله باشد، چون آهن دو ظرفیتی از پایداری بالاتری نسبت به مگنتیت و هماتیت برخوردار است [۱۷]. از طرفی بالاتر بودن میزان گوگرد اگرچه به معنی ناخالصی بیشتر در مواد اولیه است اما حین خروج از ساختار منجر به ایجاد حفرات بیشتر در گندله شده و به فرایند احیا کمک می کند، علاوه بر این میزان اختلاف در میزان گوگرد در این مورد بسیار کم و در حد ۰/۷ درصد است. در رابطه با اکسید منیزیم نیز میزان اختلاف دو ترکیب دو کارخانه ناچیز و در حد ۰/۵ درصد است و اکسید منیزیم اگرچه بعنوان یک ناخالصی دیده می شود اما در مقادیر کم می تواند علاوه بر بالا بردن بازسیسته به بهبود احیاءپذیری گندله کمک کند و به مقدار قابل ملاحظه از تمایل به دفرمه شدن گندله ها حین فرایند بکاهد [۱۸]. بر خلاف موارد ذکر شده در تحقیق آبادرپور و همکارانش [۱۲]، بر اساس آنالیز جدول های ۱ و ۲ در شرکت گل گهر، آسیای

بال میل در مقایسه با آسیای غلتکی فشار بالا منجر به اندازه دانه ریزتر و متعاقب آن درصد اندازه دانه کمتر از ۴۵ میکرون بسیار بالاتری شده است، که می تواند به افزایش قابلیت جذب آب و نرخ احیاءپذیری بالاتر گندله منجر شود. این موارد را می توان به شکل توزیع بالاتری از ذرات با دانه های ریز در خوراک ورودی کارخانه شماره که در شکل ۱ آمده است نیز دید.



شکل ۱: توزیع اندازه ذرات خوراک ورودی به میکسر بر اساس تجمعی عبوری ذرات

آنالیز SEM ذرات تولید شده با دو آسیای بال میل و غلتکی در شکل ۲ نمایش داده شده است. سایز ذرات در بازه ۲۵ تا ۳۸ میکرون (روی الک ۲۵ میکرون و زیر الک ۳۸ میکرون) انتخاب شدند. بدلیل استفاده از چسب برای نگهداری ذرات روی سطح نگهدارنده نمونه در میکروسکوپ SEM، استفاده از ذرات کوچک تر منجر به آگلومراسیون و عدم امکان تصویر برداری دقیق می شد. لذا این بازه از ذرات انتخاب شدند تا هم از آگلومراسیون آنها جلوگیری شود و هم امکان مقایسه مورفولوژی در دو کارخانه فراهم شود. از لحاظ مورفولوژی ذرات حاصل از دو فرایند آسیا کاری تفاوت فاحشی ندارند. همچنین مورفولوژی ذرات به شکل شکسته و با لبه های تیز می باشد و ذرات حالت کروی شکل ندارند.



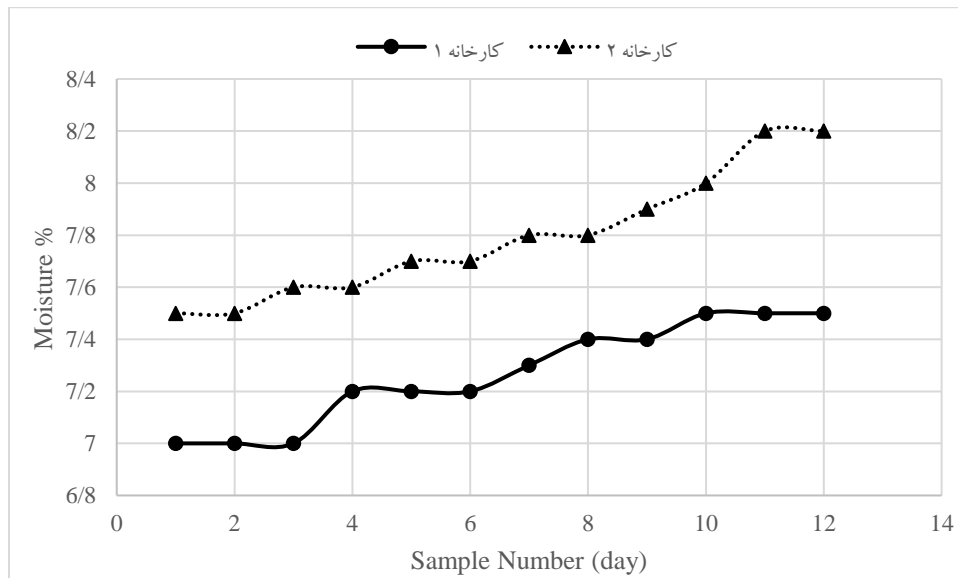
شکل ۲: تصویر SEM ذرات با اندازه بین ۲۵-۳۸ میکرومتر، راست) آسیای فشار بالا، چپ) آسیای گلوله‌ای

جدول ۳ نتایج آنالیز سطح ویژه ذرات به دو روش بلین و BET از خوراک دو کارخانه را خلاصه کرده است. بر اساس آنالیز بلین ذرات تولید شده در کارخانه شماره ۱ به کمک آسیای گلوله ای دارای سطح ویژه بسیار بالاتری هستند و طبق آنالیز BET نیز ذرات تولید شده در آسیای گلوله ای دارای سطح ویژه بالاتری هستند، هر چند که در مورد آنالیز BET میزان اختلاف سطح ویژه به میزان جزئی ۳٪ است، اما اگر نتایج را با آنالیز توزیع اندازه ذرات در شکل ۱ مقایسه کنیم، مشاهده می شود که توزیع اندازه ذرات در روش خردایش آسیای گلوله ای به طور قابل ملاحظه ای به شکل گیری ذرات ریزتر منجر شده است، که بیشتر در تطابق با روش آنالیز بلین است. میزان اختلاف سطح ویژه اندازه گیری شده در روش بلین بسیار بالاتر است که این اختلاف در اندازه سطح ویژه اندازه گیری شده را می توان به ماهیت روش های اندازه گیری نسبت داد. روش بلین سطح ویژه را بر اساس مقاوت ذرات در برابر عبور هوا اندازه گیری می کند و عملاً در این روش سطح ویژه اندازه گیری شده وابسته به سایز ذرات است، در حالی که روش BET بر مبنای میزان جذب و واجذب گازی خنثی مانند نیتروژن است و علاوه بر سایز ذرات در این روش نقش میکرو ترک ها و حفره ها نیز در اندازه گیری سطح ویژه دیده می شود. بنابراین جای تعجبی ندارد که سطح ویژه اندازه گیری شده توسط روش BET برای هر دو نمونه در مقایسه با روش بلین بسیار بزرگ تر است. همچنین سطح ویژه بلین بالاتر در کارخانه شماره ۱ در تطابق با نتایج توزیع اندازه ذرات در شکل ۱ است، که ذرات تولید شده به روش آسیای گلوله ای در کارخانه شماره ۱ را ریزتر نشان می دهد. در روش آسیای غلتکی به دلیل ماهیت روش خردایش بر اساس فشار غلتک ها احتمال بروز میکروتوک ها بیشتر است و سهم میکرو ترک ها در افزایش سطح ویژه بالاتر است که در تطابق با نتایج آورده شده در جدول ۳ است. با اینکه بر اساس شکل ۱ ذرات تولید شده در کارخانه ۱ ریزتر هستند، اما از لحاظ سطح ویژه BET (جدول ۳) اختلاف چندانی ندارند.

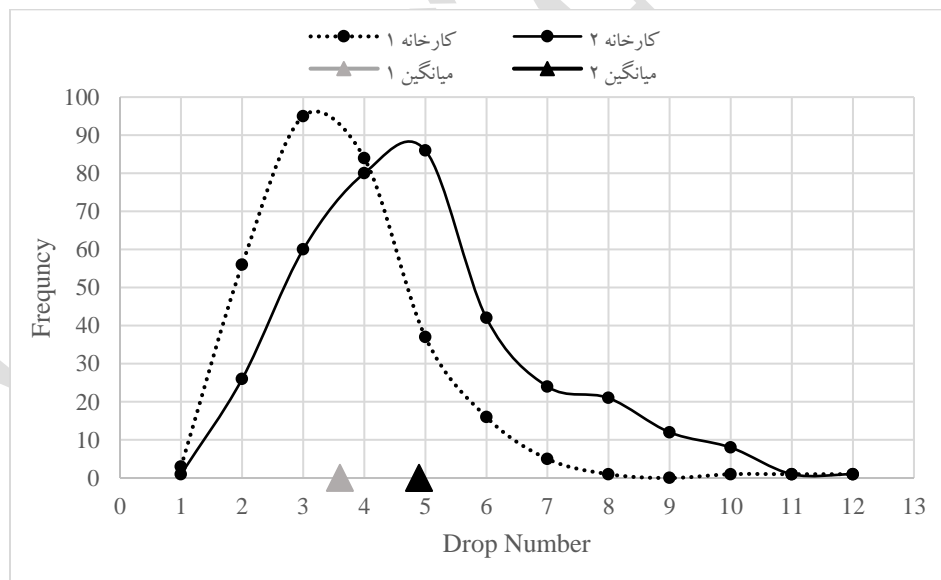
جدول ۳: نتایج آنالیز بلین (میانگین شش روزه) و آنالیز BET از خوراک ورودی به دو کارخانه

آزمون سطح ویژه	واحد	کارخانه شماره ۱ (آسیای گلوله ای)	کارخانه شماره ۲ (آسیای فشار بالا)	درصد اختلاف
Blaine	$\frac{cm^2}{g}$	۱۹۸۸	۱۳۵۵	۳۱
BET	$\frac{cm^2}{g}$	۲۰۲۶۴	۱۹۷۳۳	۳

آنالیز درصد رطوبت از گندله خام در دو کارخانه در شکل ۳ آورده شده است نمونه برداری به شکل تصادفی طی ۱۲ روز انجام شده است و بصورت اتفاقی روندی افزایشی ناچیزی در مقادیر رطوبت ثبت شده دیده می شود. میانگین رطوبت در کارخانه شماره ۱ برابر با ۷/۳ درصد و در کارخانه شماره ۲ برابر با ۷/۸ درصد نشان داده می شود. همچنین نتایج تست عدد افتادن روی گندله ها در شکل ۴ مشاهده می شود. عدد افتادن گندله خام در گندله سازی شماره ۱ برابر با $1,4 \pm 3/7$ و در گندله سازی شماره ۲، عدد افتادن بالاتر و به میزان $1,9 \pm 5$ است. عدد افتادن بالاتر به معنی تعداد دفعاتی است که گندله خام از ارتفاع معینی رها می شود بدون آنکه دچار شکست شود و بالاتر بودن آن در کارخانه ۲ را می توان به میزان بالاتر رطوبت و متعاقب آن خاصیت پلاستیسیته بهتر در گندله کارخانه ۲ نسبت داد. رطوبت بالاتر در کارخانه ۲ به معنی حذف آب بیشتر حین خشک شدن و کسر حفرات بیشتر و چگالی کمتر پس از خشک شدن است که این می تواند منجر به افت استحکام خام می شود. افزودن رطوبت به منظور حفظ پلاستیسیته و فرم پذیری کافی صورت می گیرد اما رطوبت زیاد همزمان می تواند منجر به کاهش استحکام خام نیز شود. در این تحقیق اختلاف میزان رطوبت در دو کارخانه مقدار ناچیز ۰/۵ درصد است که تاثیر قابل توجهی را روی استحکام نخواهد داشت.



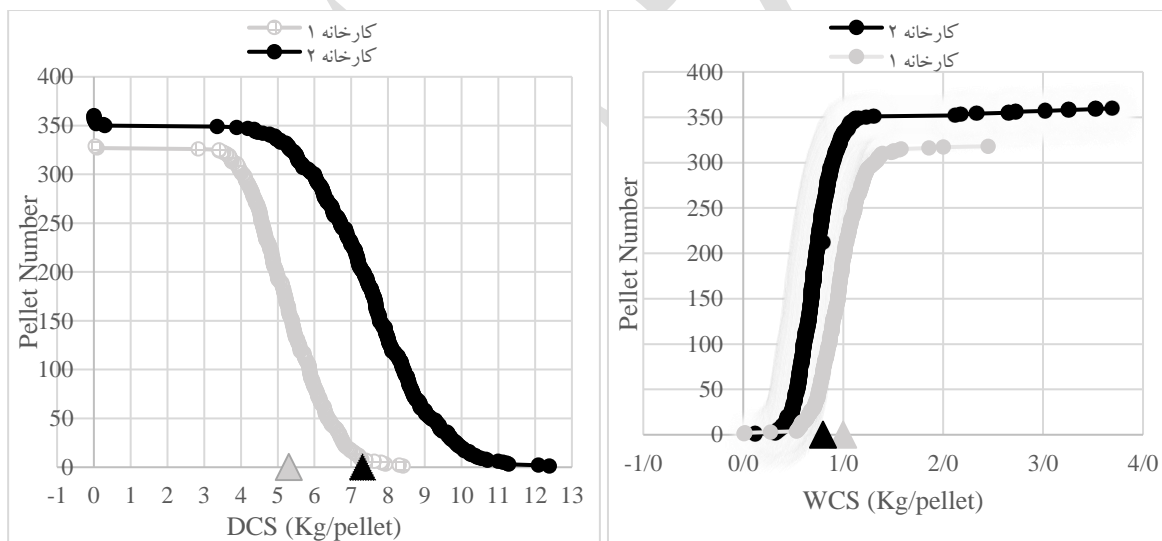
شکل ۳: نمودار رطوبت گندله خام به صورت مقایسه‌ای در دو کارخانه



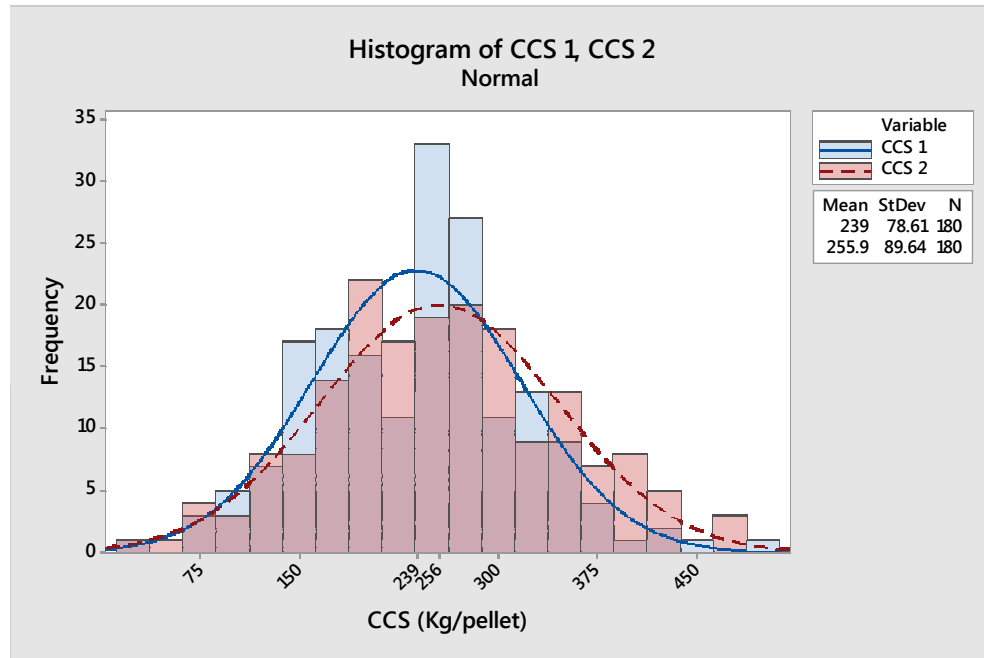
شکل ۴: نمودار مقایسه‌ای عدد افتادن در دو کارخانه

شکل ۵ نتایج آزمون استحکام گندله تر (WSC) و خشک (DSC) را روی نمونه های گندله نشان می دهد. میانگین استحکام فشاری گندله خام در حالت تر در کارخانه گندله سازی شماره ۱ برابر با 0.41 ± 0.98 کیلوگرم بر گندله و در کارخانه گندله سازی شماره ۲ به مقدار 0.38 ± 0.76 کیلوگرم بر گندله می باشد و استحکام گندله خام در حالت خشک در کارخانه شماره ۱ برابر با 0.9 ± 0.53 کیلوگرم بر گندله و در کارخانه شماره ۲ برابر با 1.96 ± 0.73 کیلوگرم بر گندله می باشد. همچنین نتایج استحکام پخت (CCS) نمونه ها که روی تعداد ۳۰ عدد گندله پخته در هر روز با اندازه ۱۰ تا ۱۲ میلی متر طی شش روز نمونه برداری انجام شده

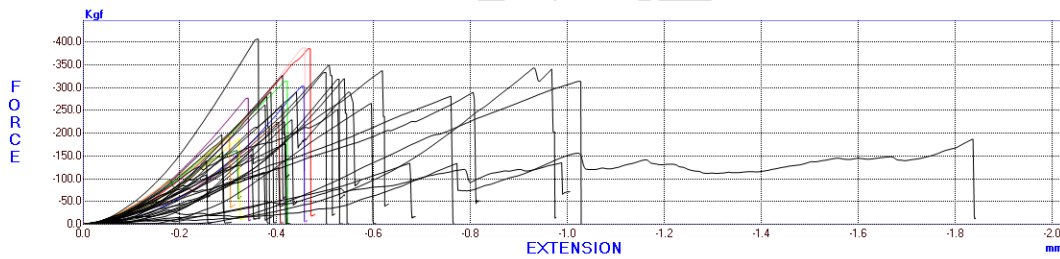
است، در شکل ۶ با نمودار مقایسه‌ای و توزیع نرمال بر روی تعداد ۱۸۰ عدد گندله پخته از هر کارخانه آورده شده است. علاوه بر این منحنی نیرو-جاب‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۴۸ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۱ و منحنی نیرو-جاب‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۵۹ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۲ را به ترتیب در شکل های شماره ۷ و ۸ مشاهده می کنید. آزمون های آورده شده در شکل ۷ و ۸ بصورت نمونه آورده شده اند و معیاری از میانگین استحکام در نمونه های تولید شده در کارخانه ۱ و ۲ نیستند. بر اساس نتایج اندازه گیری استحکام، گندله تولید شده در کارخانه شماره ۱ استحکام بالاتر در حالت گندله مرطوب (WCS) دارند، در حالی که استحکام خشک (DCS) و استحکام پخت (CCS) گندله در کارخانه شماره ۲ بالاتر است. بالاتر بودن استحکام تر را می توان به ریزدانه تر بودن و سطح ویژه بالاتر ذرات خوراک ورودی کارخانه ۱ نسبت داد، چون بر اساس آنالیز SEM ذرات مورفولوژی مشابهی دارند و شکل ذرات تاثیر زیادی روی استحکام یا تراکم پذیری آنها نداشته است. بالاتر بودن استحکام خشک در کارخانه ۲ را هم می توان به توزیع بهتر موارد رسی چسبیده با رطوبت بالاتر نسبت داد. همچنین بالاتر بودن میانگین استحکام پخت نمونه های تولید شده در کارخانه ۲ را می توان به کسر کمتر گوگرد در ترکیب شیمیایی خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲ نسبت داد. کسر کمتر گوگرد به معنی خروج کمتر گازهای فرار سولفیدی و میکروترک های کمتر در گندله نهایی است که منجر به استحکام بالاتر می شود. به دلیل پایین تر بودن سطح ویژه مواد تولید شده توسط آسیای غلتکی در این کارخانه، بر خلاف تحقیق صورت گرفته توسط ابادریور و همکارانش، نمی توان بالا بودن استحکام در روش خردایش HPGR را به سطح ویژه بالاتر ذرات نسبت داد. در فرایند پخت مرحله ای بحرانی وجود دارد که در دماهای بالاتر از 300°C درجه تا شروع زینترینگ در حدود 900°C رخ می دهد، در این محدود دمایی ذرات استحکام اولیه ناشی از خاصیت پلاستیک رس ها را از دست داده اند و هنوز به نقطه ای نرسیده اند که ذوب مواد فلاکس منجر به بهم پیوستن ذرات و بدست آمدن استحکام پخت شود [۱۹]. علاوه بر این در این محدوده دمایی خروج گازهای فرار عمدتا سولفیدی منجر به ایجاد حفرات و تغییرات ترکیب اکسید آهن از هماتیت به مگنتیت نیز منجر به تغییرات ابعادی و احیانا ایجاد ترک های ریز در گندله می شود.



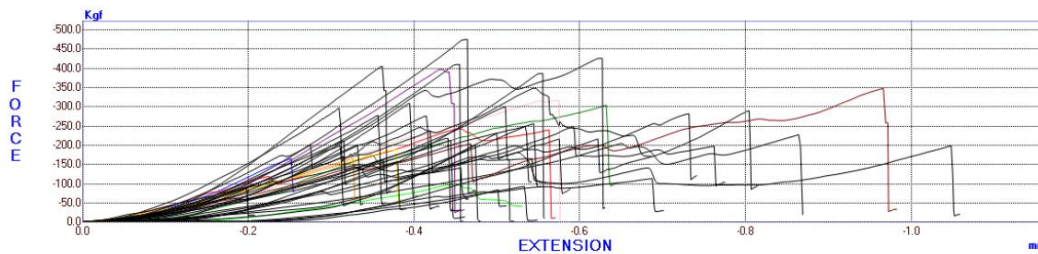
شکل ۵: نتایج آزمون استحکام تر (WCS) و خشک (DSC) روی نمونه های گندله.



شکل ۶: نمودار مقایسه‌ای نتایج تست CCS، خط آبی کارخانه شماره ۱ و قرمز کارخانه شماره ۲

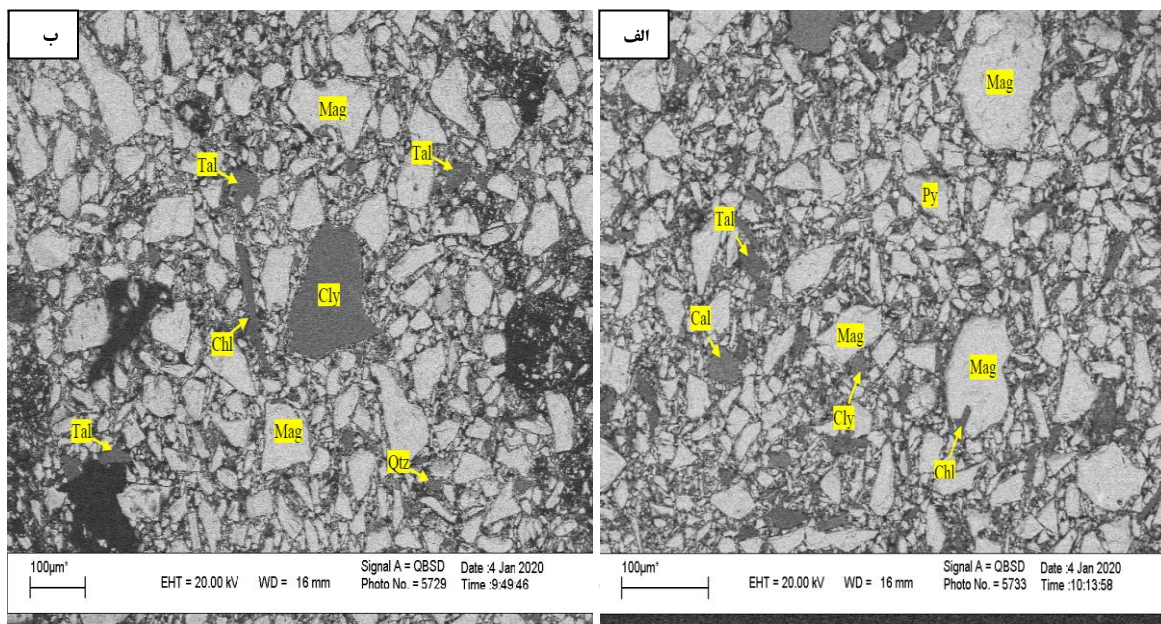


شکل ۷: منحنی نیرو-جاب‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۴۸ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۱



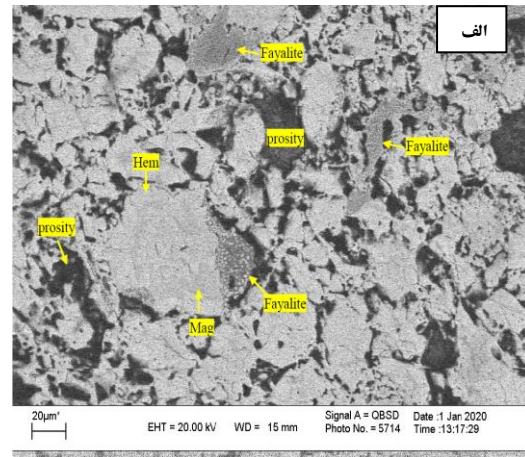
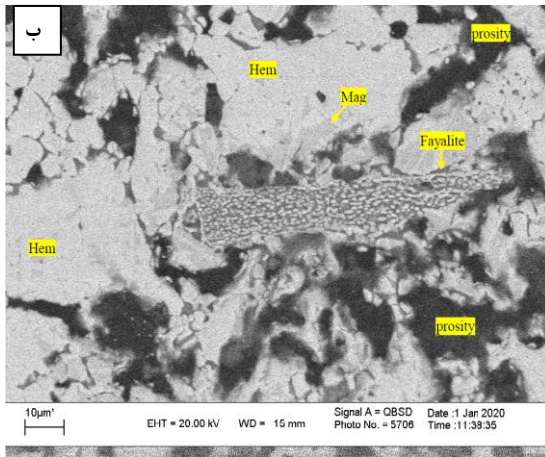
شکل ۸: منحنی نیرو-جاب‌جایی و نقطه شکست گندله با میانگین استحکام ۲۵۹ کیلوگرم بر گندله در کارخانه شماره ۲

شکل شماره ۹ (الف و ب) نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی SEM از نمونه های گندله خام را نشان می دهد. و توزیع فازهای مختلف مگنتیت (Mag)، اکسید کلسیم (Cal) و رس بنتونیت (Cly)، پیریت (Py) و کوارتز (Qtz) در آن دیده می شود. بر اساس این تصاویر توزیع ذرات کوچکتر مگنتیت در کارخانه شماره ۱ (شکل ۹ الف) که خردایش به روش آسیای گلوله ای بوده مشهود است، که در تطابق با نتایج آماری غربال ذرات در شکل ۱ است.

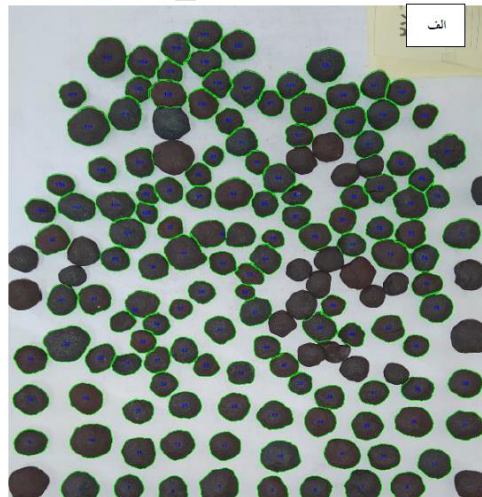
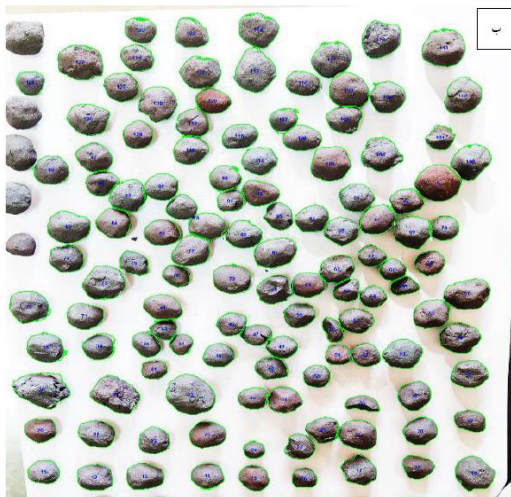


شکل ۹: تصویر SEM از سطح مقطع گندله خام الف) کارخانه شماره ۱ و ب) کارخانه شماره ۲

در شکل ۱۰ توزیع فازهای مختلف به کمک میکروسکوپ الکترونی عبوری در کارخانه شماره ۱ و ۲ آورده شده است. بر اساس این تصاویر ریز ساختار نهایی گندله های پس از پخت دارای مقادیری فایالیت، هماتیت (Hem)، نخلل و مگنتیت (Mag) است. فایالیت تشکیل شده ناشی از حل شدن مقادیر از اکسید آهن در سیلیس موجود بوده و هماتیت تشکیل شده عمدتاً در اثر احیای ناقص مگنتیت ایجاد شده است. در حالت کلی ریزساختار گندله کارخانه شماره ۲ حاوی ذرات و تخلخل های بزرگتری است، که پایین تر بودن مقاومت به سایش (جدول ۴) نمونه های تولید شده در کارخانه شماره ۲ را توجیه می کند.



شکل ۱۰: تصویر SEM از سطح مقطع گندله پخته شده، الف) کارخانه شماره ۱ و ب) کارخانه شماره ۲



شکل ۱۱: تصاویر مربوط به بررسی درصد کرویت گندله های کارخانه شماره ۱ (الف) و کارخانه شماره ۲ (ب).

میزان سایش گندله‌ها در اثر چرخش دستگاه تامبلر در جدول ۴ آورده شده است. AI شاخص سایش یا استحکام سایش گندله پخته و TI درصد گندله‌هایی که در اثر چرخش دستگاه تامبلر سالم مانده‌اند را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۴ بررسی درصد کرویت گندله پخته با پردازش تصویر توسط نرم افزار MIP بر روی ۱۳۰ عدد گندله پخته از محصول هر کارخانه و از تمامی اندازه‌ها آورده شده است، که این نتایج بر اساس تحلیل فرم گندله های آورده شده در شکل ۱۱ انجام شده است. عدد ۱ بیانگر کرویت کامل می‌باشد و هر چه میانگین کرویت گندله‌ها به عدد ۱ نزدیک‌تر شود، از کرویت بالاتری برخوردار است. بر اساس نتایج تست سایش و کرویت که در جدول ۴ دیده می‌شود، گندله های تولید شده در کارخانه شماره ۱ دارای مقاومت به سایش بالاتر بوده و درصد گندله های سالم مانده پس از سایش در این کارخانه بالاتر است که این نتایج در تطابق با مشاهدات میکروسکوپی مینی بر ذرات ریزتر و توزیع تخلخل یکنواخت تر در گندله های کارخانه شماره ۱ می‌باشد. علاوه بر این، محصولات کارخانه شماره ۱ کرویت بهتری نیز دارند که نشان دهنده کمتر دفرمه شدن گندله ها در اثر توزیع یکنواخت تر فازهای مذاب شیشه ای تشکیل شده می‌باشد. مقاومت

به سایش بالاتر گندله ها علاوه بر تاثیر مثبت بر بهبود کیفیت آهن اسفنجی نهایی تولید شده، منجر به کاهش حجم غبار تولید شده حین فرایند و کاهش آلودگی های ناشی از غبار می شود [۲۰ و ۲۱].

جدول ۴: میزان سایش گندله ها در اثر چرخش دستگاه تاملر و درصد کرویت آنها

نوع تست	کارخانه شماره ۱	کارخانه شماره ۲
AI	۲/۹	۳/۹
TI	۹۶/۳	۹۵/۴
درصد کرویت	۰/۸۲۴	۰/۷۵۸

۴- نتیجه گیری

در بخش های مختلف کارخانه های گندله سازی شماره ۱ و ۲ مجتمع گل گهر، آنالیز های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی و بررسی ریزساختاری روی محصولات انجام شد. بر اساس آنالیزهای انجام شده تفاوت ترکیب شیمیایی مواد اولیه ورودی و مورفولوژی ذرات حاصل از خردایش در دو کارخانه فاحش نیست و ذرات مورفولوژی غیرکروی با اشکال نامنظم دارند. ذرات تولید شده به روش آسیای گلوله ای ریزتر بوده و دارای سطح ویژه بلین بالاتری (1988 g/cm^3) هستند، اندازه گیری سطح ویژه به روش BET نشان داد ذرات تولید شده با هر دو روش خردایش بال میل و آسیای غلتکی مقادیری نزدیک به هم دارند. نزدیک بودن سطح ویژه BET ذرات تولید شده در دو کارخانه علی رغم ریزتر بودن ذرات تولید شده با آسیای غلتکی را می توان به وجود میکرو ترکها و حفره های بیشتر در ذرات تولید شده به روش آسیای غلتکی نسبت داد. علاوه بر این توزیع یکنواخت تری نیز از ذرات ریزدانه در محصولات این نوع خردایش دیده می شود، که در نتایج آنالیز میکروسکوپ الکترونی در گندله ها قبل از فرایند پخت نیز مشهود است. می توان استدلال کرد که این توزیع بهتر منجر به توزیع بهتر فازهای مذاب در فرایند پخت شده و در نتیجه فاز مذاب شیشه ای تشکیل شده یکنواخت بوده و میزان دفرمه شدن ذرات کاهش پیدا کرده است به گونه ای که مقاومت به سایش و میزان کرویت گندله های تولید شده با روش آسیای گلوله ای بالاتر و به میزان میانگین ۰/۸۲۴ است. همچنین بالاتر بودن میانگین استحکام پخت نمونه های تولید شده در کارخانه ۲ را می توان به کسر کمتر گوگرد در ترکیب شیمیایی خوراک ورودی به کارخانه شماره ۲ نسبت داد. کسر کمتر گوگرد به معنی خروج کمتر گازهای فرار سولفیدی و میکروتوک های کمتر در گندله نهایی است که منجر به استحکام بالاتر می شود.

مراجع

[1] N. Tohidi, and R. Vaghar, Load of iron and steel production furnaces. Tehran University Publication, 2021 (In Persian).

[2] K. Motamedi, S. Zandvakili, A. Hajizadeh, "A review on the effect of concentrate characteristics and the effective crushing method on pellet quality", Iran National Conference on Materials Engineering, Metallurgy and Mining, pp. 1-17, February 25, (2018) (In Persian).

- [3] K. Meyer, *Pelletizing of Iron Ores*. Germany, Springer-Verlag, 1980.
- [4] F. Przemysław, J. Mróz, “Ability for self-pelletization of iron ores and magnetite concentrates”, *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 18, no. 6, pp. 1-7, 2011.
- [5] P. Karimi, A. Noori Kuhbanani, S. M. Mousavi, “Investigating the effectiveness of HPGR and pelletizer combined circuits in the preparation of iron pellet factory feed, case study: factories of line 4 and lines 5, 6 and 7 of iron concentrate production of Gol Gohar Mining and Industrial Company”, *First international conference on materials engineering, metallurgy and mining*, pp. 1-11, February 20, (2021) (In Persian).
- [6] S. Niksirat, M. H. Shahid Kalombari, M. R. Abutalebi, M. Adeli, “Investigation of the properties of raw pellets produced from iron ore concentrate of Chagharat mine by disk pelletizing method”, *Seventh joint conference of Iran Metallurgical Engineering Association and Scientific Association Casting Iran*, pp. 1-5, October 30-31, (2013) (In Persian).
- [7] S.K. Kawatra, V. Claremboux, “Iron ore pelletization: Part II. Inorganic binders”, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 43, no. 7, pp. 813-832, 2022.
- [8] K. Motamedi, S. Zandvakili, A. Hajizadeh, “The effect of softening mechanism of iron concentrate of Gol Gohar mine on quality indicators of raw pellets produced”, *Journal of Mineral Resources Engineering*, vol. 1, no. 5, pp. 143-160, 2020 (In Persian).
- [9] A. Abazarpoor, M. Halali, “Investigation on the particle size and shape of iron ore pellet feed using ball mill and HPGR grinding methods”, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53, no. 2, pp. 908-919, 2017.
- [10] J.A. Pal, S. Ghouri, A. Ammasi, S.K. Hota, V.M. Koranne, T. Venugopalan, “Improving reducibility of iron ore pellets by optimization of physical parameters”, *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, vol. 53, no. 1, pp. 37-46, 2017.
- [11] M. Iljana, T. Paananen, O. Mattila, M. Kondrakov, T. Fabritius, “Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties”, *Metals*, vol. 12, no. 2, pp. 302, 2022.
- [12] A. Abazarpoor, M. Halali, R. Hejazi, M. Saghaeian, V.S. Zadeh, “Investigation of iron ore particle size and shape on green pellet quality”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2020;59(2):242-50.
- [13] H. Hanumanthappa, H. Vardhan, G.R. Mandela, M. Kaza, R. Sah, B.K. Shanmugam, S. Pandiri, “Investigation on iron ore grinding based on particle size distribution and liberation”, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, pp. 1853-1866, 2020.
- [14] W. Guo, Y. Han, Y. Li, Z. Tang, “Impact of ball filling rate and stirrer tip speed on milling iron ore by wet stirred mill: Analysis and prediction of the particle size distribution”, *Powder Technology*, Vol. 22, no. 378, pp. 12-18, 2021.
- [15] B. McNab, A. Jankovic, D. David, P. Payne, “Processing of Magnetite Iron Ores – Comparing Grinding Options”, *Iron Ore Conference Perth, WA*, pp. 1-12, 27 - 29 July (2009).
- [16] M. Reichert, C. Gerold, A. Fredriksson, G. Adolfsson, H. Lieberwirth, “Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill”, *Minerals Engineering*, vol. 15, no. 73, pp. 109-15, 2015.

[17] Z. Zhang, B. Kumar, Iron Ores and Iron Oxides - New Perspectives, chapter 4, IntechOpen publication, 2023, doi: 10.5772/intechopen.1001051.

[18] S. Dwarapudi, T. K. Ghosh, A. Shankar, V. Tathavadkar, D. Bhattacharjee, R. Venugopal, "Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets", International Journal of Mineral Processing, vol. 99, no. 1-4, pp. 43-53, 2011.

[19] C. Scharm, F. Küster, M. Laabs, et. al, "Direct reduction of iron ore pellets by H₂ and CO: In-situ investigation of the structural transformation and reduction progression caused by atmosphere and temperature", Minerals Engineering, vol. 180, pp. 107459, 2022.

[20] A.H.M. Najafabadi, A. Masoumi, S.M.V. Allaei, "Analysis of abrasive damage of iron ore pellets", Powder technology, vol. 331, pp. 20-27, 2018.

[21] J.A. Halt, M.C. Nitz, S.K. Kawatra, M. Dubé, "Iron ore pellet dustiness part I: factors affecting dust generation", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, vol. 36, no. 4, pp. 258-266, 2015.

واژه نامه:

Wet crushing strength (WCS)	استحکام فشاری نمونه مرطوب
Dried crushing strength (DCS)	استحکام فشاری نمونه خشک
Cold crushing strength (CCS)	استحکام فشاری نمونه پخت شده
Vertical roll mill (VRM)	آسیای غلتکی عمودی
High pressure grinding rolls (HPGR)	آسیای غلتکی فشار بالا
Ball mill	آسیای گلوله ای
Anomaly	آنومالی (رگه معدنی)
Bond work index (BWI)	اندیس کار بوند
Blaine	بلین
Dompler	دامپلر
Concentrate	کنسنتانتره
Gangue	گانگ (ناخالصی های سنگ معدن)
Pellet	گندله
Magnetite	مگنتیت
Scanning electron microscope (SEM)	میکروسکوپ الکترونی روبشی
Hematite	هماتیت