METALLURGICAL ENGINEERING
The Journal of Iranian Metallurgical and Materials Engineering Society

Autumn 2018, Volume 21, number 3

Research Paper

Determining of optimum conditions for producing a suitable iron ore green pellet from a concentrate with the low amount of specific surface area via adding organic and inorganic binder

***Mehdi Alizadeh[1], Mohsen Alizadeh[2], Ali Jilan[3]**

1- Associate Professor, Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran,
2- PhD student, Deparment of Materials Engineering, Malek-ashtar University of Technology, Isfahan, Iran,
3- Process Engineer, Pelletizing plant of Mobarakeh Steel Co., Isfahan, Iran,

Citation: Alizadeh M, Alizadeh M, Jilan A. Determining of optimum conditions for producing a suitable iron ore green pellet from a concentrate with the low amount of specific surface area via adding organic and inorganic binder. Metallurgical Engineering 2018: 21(3): 216-224 http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.84327.1184

doi : http://dx.doi.org/10.22076/me.2018.84327.1184

ABSTRACT

Basically, the limitation on the grinding capacity of iron ore mines is one of the challenges of increasing the capacity of pelletizing units along with the program of increasing steel production in our country. Therefore, the purpose of this research is to investigate the operational solution for obtaining appropriate quality of green pellets of fine concentrate with low specific surface area (less than 1500 cm2/g). Pilot pelletizing process was carried out by mixing fine concentrates of Chadermallo and Bafgh mine with specific surface area number from 1220 to 1392 cm2/g and various additives such as bentonite, sodium carboxymethylcellulose (CMC), sodium hydroxide and sodium carbonate. Wettability of iron ore particles was evaluated with distilled water, process water, CMC solution and sodium hydroxide. The particle size analyzer and specific surface area analyzer were used for determination of particle size distribution and specific surface area of concentrate powder, respectively. The drop number, wet strengthanddry strength were measured for evaluation of the quality of green pellets produced. High wettability was measured when Carboxymethyl cellulose organic binder solution was used.To maintain the qualitative properties of green pellet, proportional to reduction of specific surface number of concentrate powder from 1396 to 1220 cm2/g and as well as avoid the increasing bentonite consumption, the CMC organic viscose solution has been added to the mixture of 0.01 to 0.03 %wt. the dry strength of the pellets to 5.5 kg/pellet was increased,by addition of sodium carbonatewithout of NaOH.

Keywords: Iron ore concentrate, Special surface area, Sodium carboxymethylcellulose, Sodium carbonate, Bentonit.

* ***Corresponding Author*:**
Mahdi Alizadeh, PhD
Address: Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
Tel: +98 (31) 33915765
E-mail: alizadeh@cc.iut.ac.ir

ایجاد شرایط بهینه جهت تولید گندله خام مناسب از کنسانتره‌های سنگ آهن با سطح ویژه پایین توسط افزودنی‌های آلی و معدنی

*مهدی علی‌زاده[۱]، محسن علی‌زاده[۲]، علی جیلان[۳]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان، اصفهان، ایران.
۳- کارشناس فرایند، واحد گندله‌سازی شرکت فولاد مبارکه اصفهان، اصفهان، ایران.

چکیده

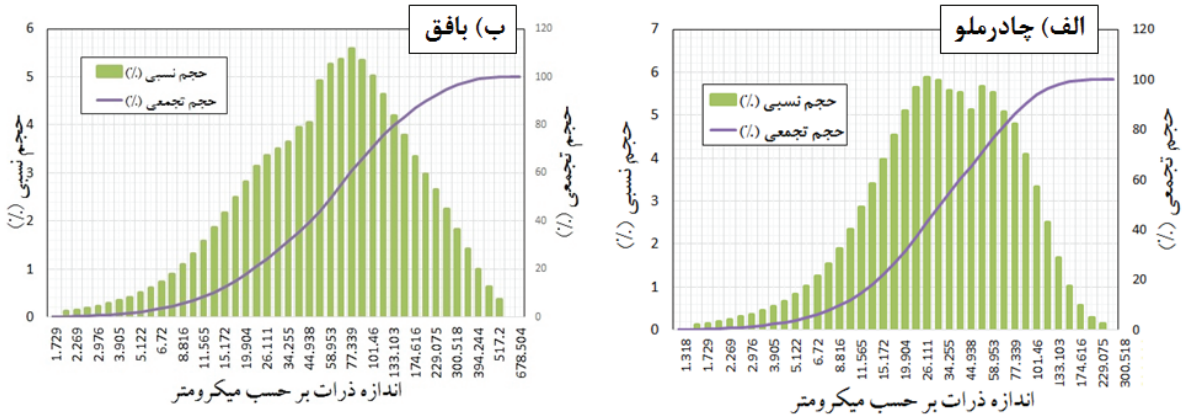
اساساً یکی از چالش‌های افزایش ظرفیت واحدهای گندله‌سازی در راستای برنامه افزایش تولید فولاد کشور،محدودیت در ظرفیت خردایش آسیاهای معادن سنگ آهن است. در سال‌های اخیر دستیابی به اهداف تعیین‌شده منجر به کاهش سطح ویژه ذرات در طی فرآیند خردایش شده است. از این رو، هدف از این تحقیق ارائه راه‌کارهای اجرایی جهت دستیابی به تولید گندله خام مناسب از کنسانتره‌های سنگ آهن با سطح ویژه پایین (کم‌تر از ۱۵۰۰ cm^2/g) است. به این منظور، فرایند گندله‌سازی توسط مخلوطی از کنسانتره‌های ریزدانه معادن چادرملو و بافق با دامنه تغییرات سطح ویژه از ۱۲۲۰ تا ۱۳۹۶ cm^2/g در پایلوت انجام شد.از مواد مختلف افزودنی نظیر بنتونیت، سدیم کربوکسی‌متیل سلولز (CMC)، سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات استفاده شد. زاویه تماس سیال‌های آب مقطر، آب فرایند، سدیم هیدروکسید و محلول CMC روی سنگ آهن اندازه‌گیری شد. جهت تعیین توزیع اندازه و سطح ویژه ذرات کنسانتره، به‌ترتیب از روش اندازه‌گیری لیزری و فیشر استفاده شد. به‌منظور بررسی خواص گندله خام، آزمون‌های عدد افتادن، استحکام‌تر و استحکام خشک صورت گرفت. نتایج نشان داد که زاویه ترشوندگی چسب آلی CMC نزدیک به آب مقطر و حدود ۲۰ درجه است. متناسب با کاهش سطح ویژه پودر کنسانتره از ۱۳۹۶ به ۱۲۲۰ cm^2/g، محلول ویسکوز آلی CMC به مخلوط مواد از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ درصد وزنی اضافه شده است. افزودن سدیم کربنات بجای سدیم هیدروکسید در مخلوط مواد باعث افزایش استحکام خشک گندله تا ۵/۵ kg/pellet شده است.

واژه‌های کلیدی: کنسانتره سنگ آهن، سطح ویژه، سدیم کربوکسی‌متیل سلولز، سدیم کربنات، بنتونیت.

۱. مقدمه

اساساً گندله‌سازی به منظور استفاده آسان از نرمه‌های کنسانتره سنگ آهن با اندازه ذرات عمدتاً کم‌تر از ۴۵ میکرون، برای تولید فولاد در دهه ۱۹۵۰ میلادی شروع شد(۱). در این فرایند مواد مختلف شامل پودر سنگ آهن، رطوبت (لجن) و چسب (معمولاً بنتونیت) پس از مخلوط‌شدن در مخلوط‌کننده‌ها، توسط دیسک شیب‌دار (یا درام) تبدیل به گلوله‌های کوچک (گندله خام) با اندازه حدود ۹ الی ۱۶ میلی‌متر می‌شوند(۲, ۳). در سال‌های اخیر، به‌دلیل احداث کارخانه‌های مختلف گندله‌سازی در کشور و افزایش چشم‌گیر تقاضا برای خرید کنسانتره، ظرفیت استخراج معادن نیز افزایش داده شده است. این افزایش استخراج در مواردی سبب ایجاد محدودیت‌های کیفی به لحاظ کاهش سطح ویژه پودر کنسانتره و افزایش متوسط اندازه ذرات شده است. کاهش سطح ویژه نرمه و فاصله گرفتن آن از حد متعارف (بین ۱۶۰۰ cm^2/g تا ۲۰۰۰) موجب کاهش نیروی موئینگی در بین ذرات تشکیل‌دهنده گندله شده و خواص کیفی آن را با مشکل مواجه ساخته است(۴). برای حل این مشکل می‌توان به کمک افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات و سیال (افزایش نیروهای ویسکوز) این نقیصه را تا حدی جبران نمود که این امر توسط افزایش مصرف چسب به مخلوط مواد تا حدودی مرتفع می‌شود. با توجه به اینکه در اغلب موارد در صنعت گندله‌سازی از چسب معدنی بنتونیت به میزان حدود ۰/۵ الی ۰/۷ درصد وزنی استفاده می‌شود؛ لذا افزودن بیش از حد بنتونیت منجر به کاهش عیار کنسانتره، کاهش درجه فلزی و افزایش حجم سرباره خواهد شد(۵). بنابراین سعی می‌شود مصرف بنتونیت در حداقل مقدار ممکن (کم‌تر از ۰/۷ درصد وزنی) به مخلوط مواد افزوده شود(۶). در سال‌های اخیر، محققین برای کاهش انرژی و افزایش کیفیت گندله

* نویسنده مسئول:
دکتر مهدی علی‌زاده
نشانی: اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مواد.
تلفن: ۳۳۹۱۵۷۶۵ (۳۱) ۹۸+
پست الکترونیکی: alizadeh@cc.iut.ac.ir



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه نرمه سنگ آهن الف) چادملو و ب) بافق.

تولیدی، بجای بنتونیت، استفاده از چسب‌های پلیمری حلال در آب را پیشنهاد داده‌اند. در سال ۲۰۰۳ کیو و همکارانش راهکارهای عملی در خصوص جایگزین‌کردن چسب‌های پلیمری (S-1 و Funa) بجای بنتونیت ارائه دادند(۷). نتایج نشان داد که با افزودن چسب آلی به نرمه مگنتیتی با سطح ویژه ۱۲۸۰ cm^2/g، استحکام گندله تر و خشک بالاتری نسبت به استفاده تنها از بنتونیت ایجاد شده است.یکی از معایب جایگزین‌نمودن چسب آلی بجای بنتونیت، کاهش استحکام گندله پخته و حتی فروپاشی آن در مرحله پیش‌پخت است. به‌عبارت دیگر، در این شرایط در قسمت پیش‌پخت که دمای فرایند حدود۹۰۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است، سازوکار استحکام‌دهی ناشی از تشکیل باندهای سرباره‌ای در اثر کاهش بنتونیت در گندله ایجاد نمی‌شود. این پدیده به این دلیل است که اکثر چسب‌های آلی در دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً تجزیه می‌شوند و منجر به فروپاشی گندله می‌شود (۴, ۶, ۸). بنابراین، در بسیاری از تحقیقات نتیجه گرفته شده که در کنار چسب آلی،از ترکیبات بوردار مانند کولومینایت یا بنتونیت در حداقل مقدار ممکن (۰/۷ درصد وزنی) مصرف شود (۹, ۱۰). علاوه بر این، یکی از مزایای استفاده از بنتونیت نسبت به مواد آلی در مخلوط مواد گندله‌سازی، کنترل رطوبت است. به‌طور کلی، مقدار بهینه رطوبت لازم در بین ذرات سنگ معدنی وابسته به اندازه و توزیع ذرات پودر کنسانتره، میزان تخلخل، مقدار مصرف بنتونیت، زبری سطح ذرات و میزان قابلیت خیس‌شوندگی ذرات جامد است(۱۱). رطوبت لازم برای تشکیل گندله خام سنگ آهن با ۰/۵ درصد وزنی بنتونیت بین ۷/۳ الی ۹/۴ درصد وزنی است(۱۱). این مقدار رطوبت لازم با آب مورد استفاده در واحد گندله‌سازی تأمین می‌شود. آب مصرفی در واحد گندله‌سازی به‌دلیل اینکه حاوی املاح زیادی است بر کیفیت گندله شوندگی اثرگذار است و بهتر است مقدار املاح مصرفی در آب پایین باشد. به‌معنای دیگر، ساختار لایه‌ای بنتونیت قابلیت جذب آب را فراهم می‌کند و عملکرد چسب بنتونیت، تحت تأثیر خواص شیمیایی آب است(۱۲). بین صفحات بنتویت معمولاً توسط یون سدیم یا کلسیم پیوند ایجاد می‌شود که اثر هریک بر عملکرد بنتونیت متفاوت است. حضور یون کلسیم در بنتونیت موجب کاهش میزان تورم و باعث کم‌شدن عملکرد بنتونیت در گندله می‌شود. در مقاله مروری که در سال ۲۰۱۳ میلادی توسط کاواترا منتشر شد، نشان داده شده است که افزایش یون کلسیم از صفرتا ppm ۲۰۸ حتی در کنار چسب آلی منجر به کاهش عدد افتادن از ۵/۶ به۵/۰، کاهش استحکام تر از kg/pellet ۱/۶ به ۱/۴ و استحکام خشک از kg/pellet ۲/۵ به ۱/۷شده است(۸). یکی از روش‌های کاهش یون کلسیم در مخلوط مواد گندله، نرم‌نمودن آب توسط سدیم کربنات است.

در این پژوهش سعی شده است با ثابت نگه‌داشتن و یا حتی کاهش مقدار مصرف بنتونیت و حذف سدیم هیدروکسید از مخلوط مواد با سطح ویژه پایین توسط افزودن چسب‌های آلی و معدنی، ویسکوزیته سیال در بین ذرات گندله افزایش داده شود و نیروی چسبندگی مطلوبی در بین ذرات سنگ آهن با اندازه بزرگ در گندله خام ایجاد شود. همچنین اثر مثبت افزودن سدیم کربنات در مقایسه با سدیم هیدروکسید بر خواص کیفی گندله خام نیز بررسی شده است.

۲. مواد و روش تحقیق

جهت انجام آزمون‌های پایلوت گندله‌سازی از نرمه سنگ آهن چادرملو و بافق استفاده شد. متوسط اندازه ذرات پودر کنسانتره توسط دستگاه اندازه‌گیری ذرات لیزری (PSA)[1] مدل LA930 شرکت هوریبا[2] ژاپن با استفاده از روش پراکندگی استاتیک نور لیزر (SLS)[3] مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۱ نشان داده شده است. سطح ویژه نرمه با استفاده از دستگاه fisher scientific sub sieve sizer model 95 بر اساس استاندارد

1. particle size analyzer
2. Horiba
3. static light scattering

جدول ۱. توزیع اندازه ذرات و سطح ویژه نرمه چادرملو و بافق

نوع	میانگین (μm)	میانه (μm)	مُد (μm)	D_{10}(μm)	D_{50}(μm)	D_{90}(μm)	واریانس (μm^2)	انحراف استاندارد (μm)	سطح ویژه (cm^2/g)
چادرملو	۴۰/۹۷	۳۰/۵۷	۲۴/۴۴	۸/۸۱	۲۹/۹۰	۸۸/۵۸	۱۱۱۳/۲۰	۳۳/۳۶	۱۳۹۶
بافق	۸۶/۳۵	۵۹/۵۱	۷۲/۲۴	۱۳/۲۴	۵۸/۹۵	۲۰۰/۰۰	۷۰۸۷/۷۰	۸۴/۱۸	۱۰۴۵

جدول ۲. مشخصات آب مصرفی در واحد گندله‌سازی و پایلوت شرکت فولاد مبارکه

نوع آب	TDS ppm	Ec μs / cm	pH
آب فرایند در واحد گندله‌سازی	۱۸۹۲	۲۱۴۳	۷/۳۹
آب شهری در پایلوت	۷۴۷	۱۱۶۷	۷/۲۷

ASTM B330 اندازه‌گیری شد. نتایج هر دو آزمون در جدول ۱ مشخص شده است. جهت اندازه‌گیری شاخص ترشوندگی سنگ آهن با مایع آب مقطر، آب فرایند مصرفی در واحد گندله‌سازی (آب پروسس)، محلول ۵۰ درصد وزنی سدیم هیدروکسیدو محلول چسب آلی کربوکسیل‌متیل سلولز از روش اندازه‌گیری زاویه تماس[۴] توسط دوربین رنگی بر اساس روش LB-ADSA استفاده شد.

فرایند آزمایشی گندله‌سازی در این تحقیق در واحد پایلوت آزمایشگاه ناحیه آهن‌سازی شرکت فولاد مبارکه صورت گرفت. مواد اولیه شامل کنسانتره‌های معادن چادرملو و بافق، چسب بنتونیت، چسب آلی[۵]CMC، آب و سدیم هیدروکسید (یا سدیم کربنات) در مخلوط‌کن مدل R08M ساخت شرکت وسترن[۶] آلمان با حداکثر ظرفیت ۷۵ لیتر (یا ۱۲۰ کیلوگرم) مخلوط شدند. سپس مواد توسط فیدر به دیسک با قطر ۸۰ سانتی‌متر و زاویه دیسک ۴۵ درجه با افق اضافه شد. بنتونیت مورد استفاده در آزمون‌های پایلوت از نوع سدیمی و دارای مقدار جذب آب حدود ۶۰۰ درصد است. جهت تهیه محلول چسب آلی، پودر سفیدرنگ CMC به تدریج به داخل آب مقطر در حال گردش در دمای محیط اضافه شد. چسب آلی در آزمون‌ها به دو صورت افزودن مستقیم به داخل مخلوط‌کن یا پاشش بر سطح گندله در حال رشد اضافه شد. جهت تأمین رطوبت لازم از آب فرایند واحد گندله‌سازی شرکت فولاد مبارکه استفاده شد. برای بررسی اثر سدیم کربنات آزمون‌هایی تحت عنوان با آب فرایند (PW)[۷] و آب فرایند نرم‌شده (PSW)[۸] انجام شد. در آزمون PSW جهت نرم‌نمودن آب فرایند، محلول ۰/۰۵ درصد وزنی سدیم کربنات با غلظت ۴۰ گرم بر لیتر به مخلوط‌کن افزوده شد. برای مقایسه بهتر، فرایند دیگری تحت عنوان آزمون با آب شهری (آب موجود در پایلوت) و سدیم هیدروکسید (CW+S)[۹] صورت گرفت. مشخصات آب فرایند مورد استفاده در واحد گندله‌سازی و آب موجود در پایلوت در جدول ۲ مشخص شده است.

به‌منظور تعیین عددافتادن، تعداد ۱۰ عدد گندله تر با اندازه بین ۱۰ الی ۱۲/۵ میلی‌متر توسط الک جدا شد. گندله‌ها از ارتفاع ۴۶ سانتی‌متری روی صفحه فولادی رها شدند و این کار تا مشاهده‌شدن ترک روی گندله به دفعات تکرار و شمارش انجام شد. جهت اندازه‌گیری استحکام تر و خشک از دستگاه اندازه‌گیری استحکام‌سنج گندله، ساخت شرکت پاسکو[۱۰] استفاده شد. تعداد ۱۰ عدد گندله خام در دستگاه مورد نظر با سرعت اعمال فشار ۴۰ میلی‌متر بر دقیقه برای اندازه‌گیری استحکام تر قرار داده و پس از اتمام آزمون، میانگین استحکام به‌دست آورده شد. برای اندازه‌گیری استحکام خشک، گندله‌ها در آون به‌مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری و سپس میانگین استحکام خشک برای ۱۰ عدد گندله اندازه‌گیری شد.

۳. نتایج و بحث

در جدول ۳ نتایج بررسی خواص گندله تر و خشک تهیه‌شده از کنسانتره سنگ آهن چادرملو نشان داده شده است. اولین آزمون مربوط به گندله تهیه‌شده در شرایط مطلوب (Id)[۱۱] با سطح ویژه مناسب (۱۷۵۰ cm^2/g) است. همان‌طور که مشخص است عدد افتادن و استحکام تر در آزمون A در مقایسه با آزمون مطلوب (Id) کاهش محسوسی نشان داده است. دلیل اصلی اُفت عدد افتادن و استحکام تر در آزمون A ناشی از سطح ویژه پایین پودر کنسانتره است. براساس اطلاعات جدول ۱ حدود ۹۰ درصد اندازه ذرات کنسانتره

4. contact angle measurement
5. carboxymethyl cellulose
6. Western
7. Process water/PW
8. process softened water/PSW
9. -city water and soda/CW+S
10. -Pasco
11. - Ideal

جدول ۳. مقدار و نوع مواد اولیه استفاده‌شده در پایلوت گندله‌سازی و نتایج گندله خام تولیدشده با سنگ آهن چادرملو

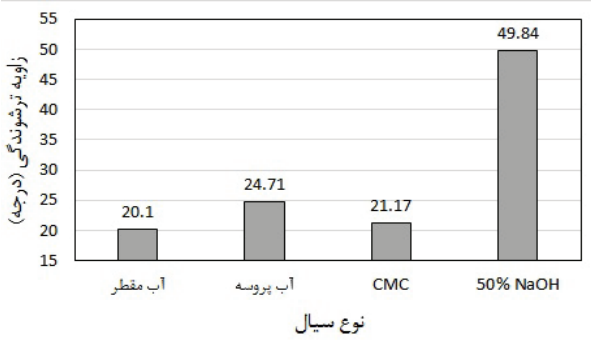
کد آزمون	درصد بنتونیت	درصد سدیم هیدروکسید	درصد CMC	غلظت CMC(g/lit)	محل افزودن چسب CMC	درصد Na_2CO_3	غلظت Na_2CO_3 (g/lit)	عدد افتادن	استحکام تر (kg/pellet)	استحکام خشک (kg/pellet)	درصد رطوبت گندله
Id	۰/۷	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۵	۱/۳	۳/۵	۸/۰
A	۰/۷	۰/۰۳	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۴	۱/۰	۳/۳	۸/۰
B	۰/۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۱۰	مخلوط‌کن	۰	۰	۲/۴	۱/۰	۴/۱	۸/۳
C	۰/۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۱۰	دیسک	۰	۰	۴/۴	۱/۷	۴/۸	۸/۰
D	۰/۳۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۱۰	دیسک	۰	۰	۲/۰	۱/۱	۳/۰	۷/۴
E	۰/۷	۰	۰/۰۱	۱۰	دیسک	۰/۰۵	۴۰	۳/۳	۱/۱	۵/۲	۸/۳

چادرملو (با سطح ویژه ۱۳۹۶ cm^2/g) زیر ۸۸ میکرون است که از حالت مطلوب (۸۰ درصد ذرات زیر ۴۵ میکرون) فاصله گرفته است. این افزایش در اندازه ذرات پودر باعث می‌شود شعاع منفاذ لوله‌های موئین افزایش یابد و بر اساس رابطه (۱) فشار ناشی از دیواره لوله موئین کاسته شود(۱۱). در این رابطه، ΔP_{cap} فشار موئینگی، کشش سطحی یا انرژی سطحی مایع، زاویه تماس و شعاع مؤثر متوسط منفاذ است. بنابراین، جهت بهبود گندله‌شوندگی در این شرایط بایستی سازوکار چسبندگی بین ذرات (نیروی ویسکوز) را تقویت بخشید. یکی از راه‌های افزایش نیروی ویسکوزیته سیال بین ذرات گندله، افزایش مقدار بنتونیت است که به‌دلیل آلوده‌شدن محصول، این روش توصیه نمی‌شود. بنابراین استفاده از چسب آلی با ویسکوزیته بالا پیشنهاد شده است. انتخاب چسب آلی مناسب باید به نحوی صورت گیرد، که علاوه بر داشتن نیروی ویسکوزیته بالا، با توجه به رابطه (۱) دارای کشش سطحی بالا و زاویه ترشوندگی کوچکی باشد تا کاهش نیروی موئین را جبران نماید. به عبارت دیگر، به‌منظور جبران کاهش نیروی موئینگی ناشی از زیادشدن شعاع متوسط منافذ در اثر کاهش سطح ویژه ذرات، می‌توان با کاهش زاویه تماس بین سیال و ذرات سنگ آهن نیروی موئینگی را افزایش داد (۱۳, ۱۴). محلول آلی CMC یک محلول پلیمری است که به‌علت داشتن ویسکوزیته بسیار بالا (با غلظت ۲ درصد در دمای محیط حدود ۶۰۰ cP)، در صنایع سرامیک‌سازی به‌عنوان چسب استفاده می‌شود. در شکل ۲ زاویه ترشوندگی آب فرایند، آب مقطر، محلول چسب آلی CMC و محلول ۵۰ درصد وزنی سدیم هیدروکسید برای سنگ معدن چادرملو نشان داده شده است. مشخص است که محلول چسب آلی CMC بهترین نتیجه را ایجاد نموده که نزدیک به آب مقطر است. گروه‌های آب‌دوست در ساختار شیمیایی چسب آلی CMC موجب افزایش خاصیت ترشوندگی می‌شود (۷). این در حالی است که محلول چسب آلی دارای خاصیت چسبندگی قوی‌تری (نیروی ویسکوز بیش‌تر) در مقایسه با آب مقطر دارد. علاوه بر این، مشخص است که محلول سدیم هیدروکسید در مخلوط مواد گندله‌سازی موجب کاهش ترشوندگی سیال می‌شود که وجود آن می‌تواند اثر نیروی موئینگی سیال را کاهش دهد.

معادله ۱.

$$\Delta P_{cap} = \frac{2\gamma_{lv}\cos\theta}{r_{eff}}$$

در آزمون B با افزودن ۰/۰۱ درصد وزنی چسب CMC به مخلوط مواد در مخلوط‌کن،کیفیت گندله نسبت به آزمون A بهبود یافته، اما نسبت به آزمون Id کاهش یافته است. علاوه بر این، در طول فرایند گندله‌شوندگی مشاهده شد که تعداد میکروپلت‌ها (جوانه‌ها) با افزودن چسب آلی CMC به داخل مخلوط‌کن بیشتر شده است. همان‌طور که در رابطه (۲) مشخص است با افزایش میکروپلت‌ها رشد گندله کاهش می‌یابد(۱۵, ۱۶). در رابطه (۲)، پارامتر گندله‌شوندگی، Q ثابت، W کل حجم رطوبت، ω حجم آب از حرکت افتاده



شکل ۲. تغییرات زاویه ترشوندگی با نوع سیال روی سنگ آهن چادرملو.

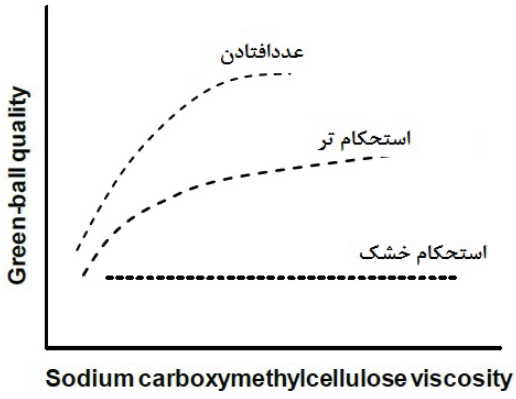
توسط یک گرم چسب و B میزان چسب است.

معادله ۲.

$$\beta = Q(W - \omega B)$$

در آزمون C جهت جلوگیری از افزایش میکروپلت در مخلوط‌کن محلول چسب آلی روی سطح گندله در حال تشکیل در دیسک پاشش شد. ملاحظه شد که با افزودن ۰/۰۱ درصد وزنی چسب آلی CMC و پاشش آن به سطح گندله در حال تشکیل در دیسک، عدد افتادن، استحکام تر و خشک افزایش یافته است. افزایش عدد افتادن و استحکام تر ناشی از افزایش ویسکوزیته و کشش سطحی سیال در بین ذرات است. البته مقدار افزایش عددافتادن نسبت به استحکام تر در آزمون C محسوس‌تر است.به بیان دیگر، هرچقدر ویسکوزیته سیال در گندله افزایش یابد باعث افزایش عدد افتادن می‌شود (شکل ۳) (۱۱). این امر ناشی از ارتباط عدد افتادن با نیروهای برشی است که به ویسکوزیته سیال به‌شدت وابسته خواهد بود. در حالی که همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، استحکام تر وابستگی کم‌تری به ویسکوزیته دارد و عمدتاً به نیروی کشش سطحی سیال بین ذرات وابسته است. البته افزودن چسب آلی CMC که افزایش ویسکوزیته سیال را به‌همراه دارد موجب افزایش کشش سطحی سیال نیز می‌شود ولی بدلیل افزایش متوسط اندازه ذرات اثرگذاری آن در مقایسه با عددافتادن بسیار کم‌تر است(۸). علاوه بر این، مشاهده می‌شود که استحکام خشک در آزمون C تا ۴/۸ kg/pellet افزایش یافته است که این موضوع به افزایش ویسکوزیته سیال ارتباطی ندارد. این پدیده ناشی از حضور ماده چسبنده آلی CMC در بین ذرات سنگ آهن و پایداری آن در دمای خشک‌شدن گندله (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) است.

در آزمون D سعی شده مصرف بنتونیت و سدیم هیدروکسید در قبال افزودن چسب آلی CMC به پودر کنسانتره چادرملو باسطح ویژه ۱۳۹۶ cm^2/g کاهش یابد. همان‌طور که مشخص است، به دلیل کاهش مصرف بنتونیت (نیروی ویسکوز) در مخلوط‌مواد،عدد افتادن، استحکام تر و خشک گندله نسبت به آزمون C کاهش یافته است. این موضوع بیانگر این مطلب است که در صورت کاهش مصرف بنتونیت، باید مصرف چسب آلی CMC افزایش داده شود که

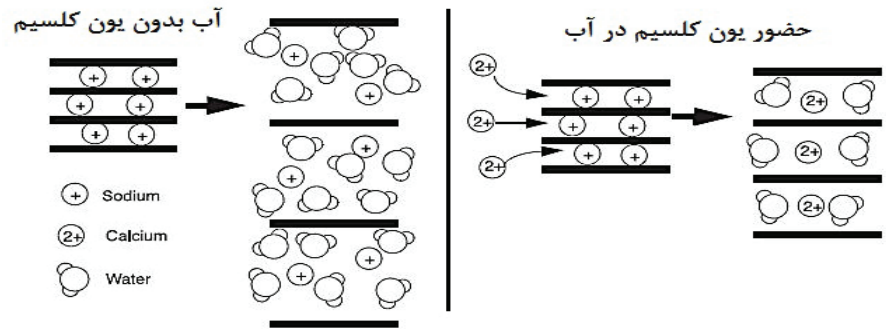


شکل ۳. اثر ویسکوزیته چسب آلی CMC بر کیفیت گندله (۸).

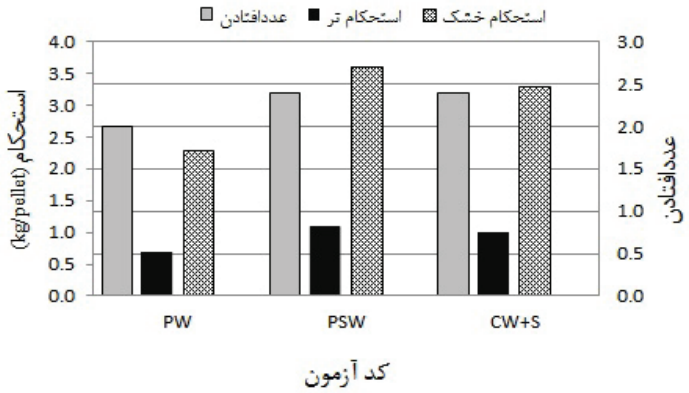
این موضوع به لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست. علاوه بر این، افزایش زیاد چسب آلی در گندله به‌دلیل اینکه در مرحله پخته‌شدن از بین می‌رود، منجر به افزایش تخلخل در گندله می‌شود. افزایش تخلخل باعث کاهش استحکام گندله پخته می‌شود(۱۱). به همین منظور در آزمون E مقدار مصرف بنتونیت در حداکثر مقدار مجاز (۰/۷ درصد وزنی) ثابت نگه داشته شد. علاوه بر این، در این آزمون، محلول سدیم هیدروکسید از مخلوط مواد حذف و بجای آن محلول سدیم کربنات به داخل مخلوط‌کن افزوده شد. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، افزودن سدیم کربنات به‌شدت موجب افزایش استحکام خشک شده که این ناشی از توزیع یکنواخت بنتونیت در اثر نرم‌شدن آب توسط سدیم کربنات است(۱۲). برای روشن‌شدن موضوع در جدول ۴ اطلاعات و نتایج آزمون مربوط به بررسی تأثیر سدیم کربنات و املاح موجود در آب مورد استفاده، بر کیفیت گندله مشخص شده است. با افزودن سدیم کربنات به آب فرایند عدد افتادن در آزمون PSW نسبت به PW از ۲/۰ به ۲/۴ افزایش یافته است. افزایش عدد افتادن و استحکام تر گندله خام با افزودن سدیم کربنات ناشی از حضور یون سدیم در سدیم کربنات و کاهش یون کلسیم آب توسط آن است. سدیم کربنات موجب می‌شود که بر اساس رابطه (۳) یون کلسیم در آب رسوب و از جایگزین‌شدن کلسیم در ساختار بنتونیت جلوگیری کند و همچنین یون سدیم موجود در بنتونیت را افزایش می‌دهد. به

جدول ۴. مشخصات و نتایج آزمون‌های مختلف

آزمون	نوع آب	درصد سدیم کربنات	درصد سدیم هیدروکسید	عدد افتادن	استحکام تر (kg/pellet)	استحکام خشک (kg/pellet)
PW	آب فرایند	۰	۰	۲/۰	۰/۷	۲/۳
PSW	آب فرایند نرم‌شده	۰/۰۵	۰	۲/۴	۱/۱	۳/۶
CW+S	شهری	۰	۰/۰۳	۲/۴	۱/۰	۳/۳



شکل ۴. اثر یون کلسیم بر عملکرد بنتونیت سدیمی (۱۲).



شکل ۵. مقایسه برخی از خواص کیفی گندله خام در آزمون‌های مختلف.

عبارتی، افزایش یون سدیم و کاهش یون کلسیم در مخلوط مواد موجب فعال‌شدن بنتونیت می‌شود. شکل ۴ اثر وجود یون کلسیم در آب بر عملکرد بنتونیت سدیمی را نشان می‌دهد (۱۲). مشخص است که با وجود کلسیم، صفحات بنتونیت از یکدیگر فاصله کمی گرفته‌اند و میزان جذب آب بنتونیت کم شده است. در بنتونیت به دلیل اینکه یون‌های کلسیم، نیروی قوی‌تری بین صفحات در مقایسه با سدیم در بنتونیت ایجاد می‌کند، به همین منظور جذب آب بنتونیت کم‌تر می‌شود. فعال‌شدن بنتونیت به معنای تورم بیش‌تر بنتونیت است که خود موجب افزایش ویسکوزیته چسب نیز می‌شود. بنابراین واضح است که هرچقدر ویسکوزیته سیال در گندله افزایش یابد، باعث زیادشدن عدد افتادن می‌شود. به همین دلیل عدد افتادن گندله در آزمون PSW افزایش یافته است (شکل ۵). علاوه بر این، حضور سدیم کربنات باعث افزایش استحکام تر گندله از ۰/۷ kg/pellet به ۱/۱ شده است. نرم‌شدن آب و جذب بیش‌تر سدیم به بنتونیت در اثر افزودن سدیم کربنات، باعث افزایش کشش سطحی سیال می‌شود که این خود موجب افزایش استحکام تر گندله شده است. در آزمون CW+S از سدیم هیدروکسید بجای سدیم کربنات استفاده شده است که خاصیت نرم‌کنندگی آب را ندارد. با این وجود مشخص است که عدد افتادن و استحکام تر نسبت به آزمون PW افزایش یافته و تقریباً مشابه نتایج آزمون PSW حاصل شده است. این موضوع ناشی از نوع آب مصرفی در مخلوط گندله‌سازی در آزمون CW+S است. آب شهری موجود در پایلوت به‌دلیل اینکه سختی پایینی دارد، میزان یون کلسیم آن پایین است (جدول ۲). علاوه بر این، حضور یون سدیم در سدیم هیدروکسید باعث فعال‌نمودن بنتونیت سدیمی و اثر گذاری آن بر عدد افتادن و استحکام تر می‌شود. افزودن سدیم کربنات اثر قابل توجهی بر استحکام خشک می‌گذارد که سدیم هیدروکسید این اثر را ندارد (شکل ۵).در آزمون CW+S با توجه به سختی کم آب (جدول ۲)، مقدار یون کلسیم و منیزیم اندک است؛ اما استحکام خشک کم‌تر از آزمون PSW به‌دست آمده است. حضور کاتیون‌های کلسیم و منیزیم در ساختار بنتونیت مانع از پراکندگی یکنواخت ذرات بنتونیت در آب می‌شوند. با رسوب‌نمودن کاتیون‌های دو ظرفیتی توسط سدیم کربنات، یک توزیع یکنواختی از اتصالات چسب در بین ذرات کنسانتره‌های سنگ آهن گندله خشک‌شده ایجاد می‌شود و این خود موجب فشرده‌شدن

جدول ۵. اثر حذف سدیم هیدروکسید و استفاده از ۰/۰۵ درصد وزنی سدیم کربنات با غلظت ۴۰ گرم بر لیتر بر نتایج گندله خام تولیدشده

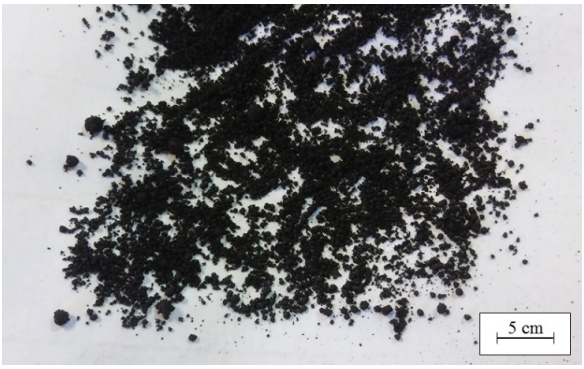
کد آزمون	درصد سنگ آهن		سطح ویژه مخلوط (cm^2/g)	درصد CMC	غلظت CMC(g/lit)	محل افزودن چسب CMC	عدد افتادن	استحکام تر (kg/pellet)	استحکام خشک (kg/pellet)	درصد رطوبت گندله
	چادرملو	بافق								
F	۷۰	۳۰	۱۲۹۰	۰/۰۳	۲۵	دیسک	۳/۶	۱/۰	۵/۳	۸/۰
G	۷۰	۳۰	۱۲۹۰	۰/۰۴	۲۵	مخلوط‌کن	۰	۰	۰	۰
H	۵۰	۵۰	۱۲۲۰	۰/۰۵	۲۵	دیسک	۴/۵	۰/۸	۵/۵	۹/۲
J	۵۰	۵۰	۱۲۲۰	۰/۰۳	۲۵	دیسک	۲/۴	۰/۷	۴/۱	۹/۶

بیش‌تر ذرات به یکدیگر می‌شود (۸, ۱۲). به بیان دیگر، حضور کاتیون‌های دو ظرفیتی حتی به مقدار اندک، مانع از توزیع یکنواخت ذرات بنتونیت می‌شود. لذا استحکام خشک زیاد به ویسکوزیته سیال ارتباط نداشته و به توزیع یکنواخت چسب در بین ذرات گندله مربوط می‌شود.

معادله ۳.

$$Na_2CO_3 + Ca^{2+}_{eq} \rightarrow CaCO_3(s) + 2Na^{+}_{eq}$$

با توجه به اثر بخشی موثر حضور سدیم کربنات بجای سدیم هیدروکسید، بنابراین سدیم هیدروکسید از مخلوط مواد حذف شده و بجای آن در آزمون‌ها از سدیم کربنات استفاده شده است. به‌همین منظور آزمون‌های دیگر در رابطه با کاهش بیش‌تر سطح ویژه کنسانتره آهن تا ۱۲۲۰ cm^2/g انجام شد که در جدول ۵ مشخص شده است. در آزمون‌های F تا لمقدار بنتونیت مصرفی ۰/۷ درصد وزنی، سدیم کربنات ۰/۰۵ درصد وزنی و غلظت آن ۴۰ گرم بر لیتر ثابت لحاظ شده است. در آزمون F سطح ویژه مخلوط مواد با ترکیب ۷۰ درصد وزنی چادرملو و ۳۰ درصد وزنی بافق از ۱۳۹۶ cm^2/g به ۱۲۹۰ کاهش داده شده است. با کاهش سطح ویژه مخلوط کنسانتره، میزان ۰/۰۳۷ درصد وزنی چسب آلی CMC در نظر گرفته شد که موجب افزایش عدد افتادن تا ۳/۶ شده است. به‌منظور بهبود خواص کیفی گندله، مقدار افزودن چسب آلی در آزمون G تا ۰/۰۴ درصد وزنی افزایش داده شد که تمامی محلول چسب در مخلوط‌کن به مواد افزوده شد. مشاهده شد که همه مواد داخل مخلوط‌کن به میکروپلت تبدیل شده و رشد گندله در دیسک متوقف شده است (شکل ۶). در آزمون H که سطح ویژه مخلوط مواد با ترکیب ۵۰ درصد وزنی چادرملو و ۵۰ درصد وزنی بافق به ۱۲۲۰ cm^2/g رسیده است، میزان مصرف چسب آلی تا ۰/۰۵ درصد وزنی افزایش داده شده است. مشاهده شد که عدد افتادن به علت افزایش ضریب پلاستیسیته گندله (پلاستیکی‌شدن گندله)، به شدت زیاد شده است؛ اما استحکام تر با وجود مصرف مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی چسب آلی افزایش نیافته است. همچنین در انتهای آزمون مشاهده شد که مقدار بسیاری از مواد به کف دیسک چسبیده شده است. لذا به منظور جلوگیری از پلاستیکی‌شدن گندله،میزان چسب آلی در آزمون J نسبت به آزمون H به ۰/۰۳۵ درصد وزنی کاهش داده شده است. مشخص است که عدد افتادن و استحکام‌تر گندله خام کاهش یافته است. بنابراین، نتایج نشان می دهد برای کنسانتره‌های با سطح ویژه پایین از ذرات نمی‌توان با مصرف بیش از حد چسب آلی خواص کیفی گندله خام را بهبود بخشید بلکه افزودن چسب آلی برای حفظ خواص گندله خام نسبت به مقدار مصرف و افت سطح ویژه ذرات پودر کنسانتره محدودیت خواهد داشت.



شکل ۶. تصویر تبدیل‌شدن همه مواد داخل مخلوط‌کن به جوانه در آزمون G.

۴. نتیجه‌گیری

۱- زاویه ترشوندگی محلول چسب آلی CMC تقریباً برابر با آب مقطر بوده و حدود ۲۰ درجه است. این در حالی است که زاویه ترشوندگی محلول ۵۰ درصد وزنی سدیم هیدروکسید حدود ۵۰ درجه به‌دست آمد.

۲- پاشش چسب آلی CMC روی گندله در حال رشد در دیسک موجب افزایش عددافتادن از ۲/۴ به ۴/۵ شد.

۳- استفاده از آب فرایند به منظور تأمین رطوبت مخلوط مواد گندله‌سازی می‌تواند منجر به کاهش قابلیت گندله‌شوندگی و اُفت خواص کیفی گندله خام ناشی از سختی بالای آن شود.

۴- با افزودن سدیم کربنات به آب فرایند، عدد افتادن از ۲/۰ به ۲/۴، استحکام تر از ۰/۷ به ۱/۱ kg/pellet و استحکام

خشک از ۲/۳ به ۳/۶ kg/pellet افزایش یافته است.

۵- حضور سدیم کربنات همراه با چسب آلی موجب افزایش استحکام خشک تا ۵/۵ kg/pellet شده است.

۶- به‌منظور حفظ خواص گندله خام در کنسانتره‌های سنگ آهن با سطح ویژه پایین و همچنین جلوگیری از افزایش مصرف بنتونیت، لازم است محلول ویسکوز آلی CMC به مخلوط مواد از ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ درصد وزنی اضافه شودو مصرف بیش از حد چسب آلی (بیش از ۰/۰۳۵ درصد وزنی) احتمال تشکیل میکروپلت‌های فراوان و افزایش پلاستیسیته گندله خام (پلاستیکی‌شدن) را به همراه خواهد داشت.

References

[1] Lu L. Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability: Elsevier; 2015.

[2] Nikai I, Garbers-Craig A. Use of iron ore fines in cold-bonded self-reducing composite pellets. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016;37(1):42-48.

[3] Forsmo S, Bjorkman B, Samskog P. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. Powder technology. 2008;182(3):444-52.

[4] Yang G, Fan X, Chen X, Yuan L, Huang X, Li X. Interaction mechanism between carboxylmethyl cellulose and iron ore concentrates in iron ore agglomeration. Journal of Central South University. 2015;22(4):1241-1246.

[5] Guro V, Yusupov F, Ibragimova M. Pelleting of molybdenite concentrate with organic-mineralbinder. AASCIT Communications. 2015;2(5):200-204.

[6] Fan X, Yang G, Chen X, He X, Huang X, Gao L. Effect of carboxymethyl cellulose on the drying dynamics and thermal cracking performance of iron ore green pellets. Powder Technology. 2014;267:11-17.

[7] Qiu G, Jiang T, Li H, Wang D. Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2003;224(1):11-22.

[8] Halt. J, Kawatra S. Review of organic binders for iron ore concentrate agglomeration. Minerals & Metallurgical Processing. 2014;31(2):73-94.

[9] Sivrikaya O, Arol Aİ. The bonding/strengthening mechanism of colemanite added organic binders in iron ore pelletization. International Journal of Mineral Processing.2012;110:90-100.

[10] Sivrikaya O, Arol AI. Use of boron compounds as binders in iron ore pelletization. The Open Mineral Processing Journal. 2010;3:25-35.

[11] Forsmo S, Apelqvist A, Bjorkman B, Samskog P. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets witha bentonite binder. Powder Technology. 2006;169(3):147-58.

[12] Kawatra SK, Ripke SJ. Laboratory studies for improving green ball strength in bentonite-bonded magnetite concentrate pellets. International Journal of Mineral Processing. 2003;72(1):429-41.

[13] Cirpar C. Heat treatment of iron ore agglomerates with microwave energy: Middle East Technical University; 2005.

[14] Iveson SM, Holt S, Biggs S. Contact angle measurements of iron ore powders. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2000;166(1):203-214.

[15] Sastry K, Fuerstenau D. Ballability index to quantify agglomerate growth by green pelletization. AIME Trans. 1972:254-258.

[16] Qiu G, Jiang T, Fan X, Zhu D, Huang Z. Effects of binders on balling behaviors of iron ore concentrates. Scandinavian journal of metallurgy. 2004;33(1):39-46.