بهینه‌سازی مقدار سدیم هیدروکسید در ترکیب گندله‌های آهن

وحید امیرکیائی [*۱]، مهرشاد صفری[۲]، سعید محمدی[۳]، حسین مظاهری[۴]

۱- کارشناس ارشد، مهندسی معدن، شرکت پایا صنعت سماء، واحد پاسکونکست، v.amirkiyaei@alumni.iut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، مدیر پایلوت پلنت گندله‌سازی، شرکت پایاصنعت سماء، m.s1993@aut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی معدن، شرکت پایا صنعت سماء، واحد پاسکونکست، mohammadi.s@mi.iut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، مدیر شرکت پایا صنعت سماء، info@payasanat.ir

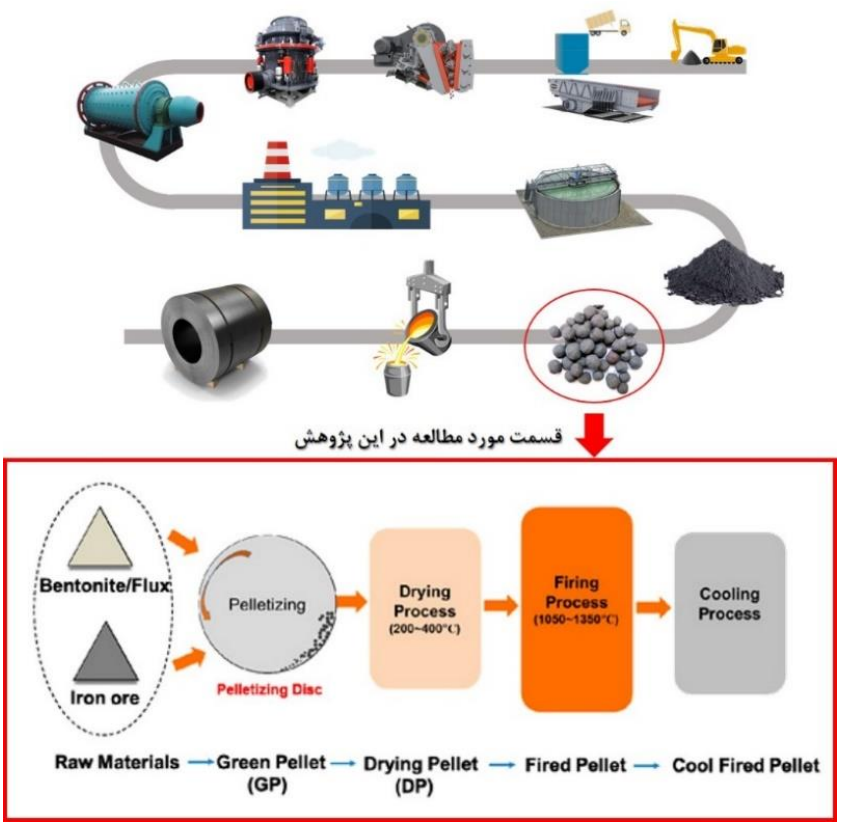
خلاصه

یکی از مهمترین مشکلات و دغدغه‌های اصلی در صنعت گندله‌سازی، رسیدن به بهترین بازدهی فرآیند گندله‌سازی می‌باشد. به عبارت دیگر با توجه به اینکه گندله‌های آهن باید از نظر مقاومت فشاری (گندله خام، گندله خشک و گندله پخته) و مقاومت سایشی شرایط خاص و مطلوبی را داشته باشند، لذا در این پژوهش سعی شده است با بهینه‌سازی میزان مصرف سدیم هیدروکسید متناسب با مقدار بنتونیت (به منظور فعال کردن بنتونیت) موجود در ترکیب، گندله‌هایی با پارامترهای مقاومتی مطلوب تولید گردد و در نهایت بتوان با توجه به حضور سدیم هیدروکسید به عنوان یک فعال کننده، تا حدالامکان مقدار بنتونیت در ترکیب گندله‌های آهن را کاهش داد. برای این منظور در این پژوهش ۶ ترکیب با مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید (۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ درصد وزنی) و با مقدار بنتونیت ثابت (۰/۷ درصد) پیشنهاد گردید و متناسب با هر مقدار سدیم هیدروکسید آزمایش‌ها در پایلوت پلنت گندله‌سازی در مقیاس نیمه صنعتی انجام شدند. پس از ساخت گندله‌ها مقاومت فشاری گندله‌های خام، خشک و پخته اندازه‌گیری شدند و سپس مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. بررسی مقایسه نتایج نشان دادند که ترکیب شامل ۰/۰۳ وزنی سدیم هیدروکسید و مقدار بنتونیت ۰/۷ درصد از بیشترین مقدار مقاومت فشاری گندله خام (GCS)، گندله خشک (DCS) و گندله پخته (CCS) برخوردار است، که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۱/۳، ۹/۸ و ۳۳۷/۲۳ کیلوگرم می‌باشند. لازم به ذکر است با توجه به مقادیر مطلوب مقاومت فشاری گندله‌های خام، خشک و پخته و همچنین با توجه به اینکه آزمایش‌ها در یک مقیاس نیمه صنعتی انجام گرفته است، ترکیب پیشنهادی (۰/۰۳ وزنی سدیم هیدروکسید) می‌تواند در سطح اطمینان بالایی در صنعت گندله‌سازی مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: سدیم هیدروکسید (NaOH)، گندله خام، گندله خشک، گندله پخته، بنتونیت، مقاومت فشاری گندله‌آهن.

۱. مقدمه

در حال حاضر در کشور ایران و سایر کشورهای دنیا تولید فولاد با استفاده از واحدهای گندله‌سازی به سرعت در حال گسترش است. به طور کلی ایده ساخت گندله زمانی به وجود آمد که برای تغلیظ کانی‌های فقیر آهن و کانی‌های حاوی ناخالصی‌های مضر مجبور شدند سنگ آهن را در اندازه‌های کمتر از میلیمتر خرد کنند. در این حالت، مقدار زیادی کنسانتره در اندازه‌های کمتر از ۰/۱ میلیمتر ایجاد می‌شود که نمی‌توان آن را در فرآیند کوره بلند مصرف نمود. محققان زیادی بر روی مسئله تبدیل کنسانتره سنگ آهن به محصول قابل مصرف برای احیا و یا کوره بلند مطالعه نموده‌اند که کم و بیش به یک روش مشابه رسیدند. ایده غلتاندن پودر کانی‌های مرطوب شده در یک دیسک دوار با استفاده از افزودنی‌های مختلف روش ایده‌آلی است که در اکثر واحدهای گندله‌سازی در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. روند تولید گندله آهن تا رسیدن به محصول نهایی در شکل ۱ مشاهده می‌گردد. مطالعات مختلفی به منظور بررسی تأثیر افزودنی بر روی پارامترهای مقاومتی گندله‌های آهن انجام شده است که برخی از آن‌ها در زیر شرح داده شده‌اند.



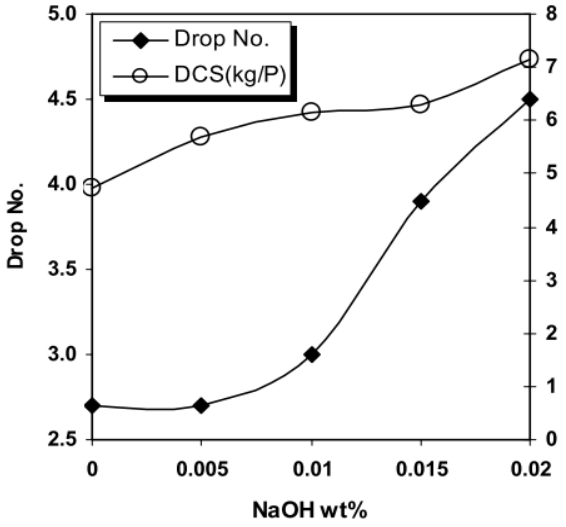
شکل ۱- روند تولید گندله‌های آهن (گندله خام تا پخته)

اسماعیل زاده و همکارانش در سال ۱۳۹۳، با اضافه کردن چسب جایگزین بنتونیت به آماده‌سازی گندله‌های خام تولیدی در دیسک گندله‌سازی به انجام آزمون‌های تعیین استحکام خام، خشک و عدد افتان گندله پرداختند [۱]. یکی از علل اصلی عدم نوسان و یکنواختی در کیفیت گندله تولیدی، توزیع نامناسب ذرات بنتونیت در بین ذرات سنگ آهن می‌باشد. نتایج نشان داد حضور $NaOH$ در محلول Na_2SiO_3 می‌تواند به افزایش پلی‌سیلیکات‌های سدیم بر روی سطح ذرات کمک کند که در نتیجه در محل تماس ذرات سنگ آهن مقدار بیشتری از ترکیبات پلی‌سیلیکاتی تجمع می‌کند و مصرف بنتونیت

(کاهش درصد FeO) بدلیل ایجاد باندهای اتصال در مرحله پخت کاهش پیدا کرده و همچنین باعث افزایش استحکام خام، خشک و عدد افتان گندله می‌گردد.

گال[1] و همکارانش در سال ۲۰۱۵، به بررسی استفاده از نمونه‌های سدیمی ، کلسیمی و نوع مخلوط بنتونیت به عنوان چسب در گندله‌سازی کنسانتره سنگ آهن ریز دانه پرداختند [۲]. با توجه به اینکه بنتونیت‌های سدیمی به دلیل ظرفیت اتصال بالا، بیشتر برای گندله‌کردن کنسانتره سنگ آهن ترجیح داده می‌شوند، در گندله‌سازی کنسانتره‌های مگنتیتی ریز ، زمانی می‌توان گندله‌هایی با استحکام مکانیکی مورد نیاز تولید کرد که بنتونیت سدیمی خام و بهبود یافته به ترتیب به میزان >۲٪ و >۰/۷٪ استفاده شود. از طرف دیگر، در مورد کلسیم و نوع بنتونیت‌های مخلوط، افزودنی‌های بیشتری به ترتیب >۳٪ و >۴٪ مورد نیاز بود. هنگام استفاده از بنتونیت‌های فعال شده برای تولید گندله‌هایی با استحکام بالا، بهترین نتایج با بنتونیت کلسیم فعال شده با ۳٪ و بنتونیت نوع مخلوط فعال شده با ۲٪ بی‌کربنات سدیم نتیجه شد که ثابت کرد مقاومت فشاری ، مقاومت دراپ و تخلخل گندله‌ها با مشخصات مطابقت دارد.

سعیدی و همکارانش در سال ۲۰۰۴، اثر بنتونیت و عامل فعال‌کننده سدیم هیدروکسید(NaOH) بر کیفیت گندله خام را مورد بررسی قرار دادند [۳]. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، افزودن سدیم هیدروکسید بر عدد افتان و استحکام فشاری گندله به طور قابل توجهی اثر گذاشته و محتوای سدیم هیدروکسید بالاتر از ۰/۰۱ درصد تأثیر زیادی بر کیفیت گندله خام دارد. نتایج بدست آمده نشان داد که ۰/۷ درصد بنتونیت، ۰/۰۱ درصد سدیم هیدروکسید برای دستیابی به خواص مطلوب مورد نیاز بوده و افزودن ۰/۰۲ درصد سدیم هیدروکسید منجر به افزایش کیفیت گندله خام شده است. بنابراین،کاهش مقدار بنتونیت و افزایش پارامترهای مقاومتی گندله خام در حضور محتوای بالای سدیم هیدروکسید یعنی بیش از ۰/۰۱ درصد وجود خواهد داشت.

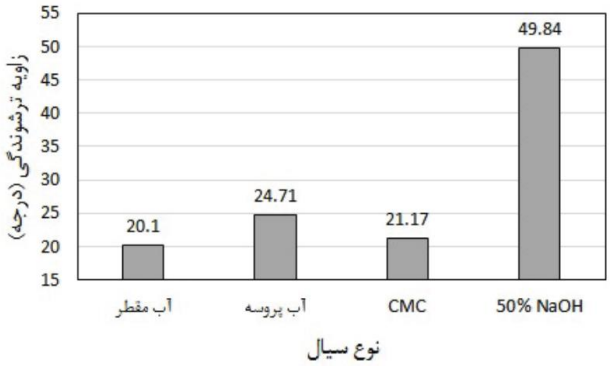


شکل ۲- تاثیر تغییرات سدیم هیدروکسید بر عدد افتان و مقاومت فشاری گندله خام [۳].

علی‌زاده و همکارانش در سال ۱۳۹۷، جهت دستیابی به گندله‌های خام با کیفیت مناسب با استفاده از افزودنی‌هایی شامل بنتونیت، سدیم کربوکسی‌متیل سلولز (CMC)، سدیم هیدروکسید(NaOH) و سدیم کربنات روی کنسانتره سنگ آهن با سطح ویژه پایین (کمتر از cm^2/g ۱۵۰۰)، راهکارهایی را ارائه دادند [۴].حضور یون سدیم در سدیم

[1] Gul

هیدروکسید(NaOH) باعث فعال نمودن بنتونیت و اثرگذاری آن روی عدد افتان و استحکام تر گندله می‌شود. با توجه به شکل ۳، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که محلول سدیم هیدروکسید در مخلوط مواد گندله‌سازی باعث کاهش ترشوندگی سیال شده و تاثیر آن توانسته اثر نیروی موئینگی سیال را کاهش دهد. در آزمونی دیگر، وقتی بنتونیت در حداکثر مقدار مجاز خود یعنی ۰/۷ درصد ثابت نگه داشته شد، سدیم کربنات جایگزین محلول NaOH شده و باعث شد استحکام گندله خشک افزایش یابد و این به دلیل توزیع یکنواخت بنتونیت در اثر نرم‌شدن آب توسط سدیم کربنات است.



شکل ۳- تغییرات زاویه ترشوندگی با نوع سیال روی سنگ آهن [۴].

روزاریو[1] و همکارانش در سال ۲۰۱۰، عملکرد افزودنی‌های قلیایی روی ویژگی‌های ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و تورم در سه نوع بنتونیت متفاوت برزیل، موزامبیک و آرژانتین را مورد مطالعه قرار دادند،که بنتونیت آرژانتین به شدت سدیمی می‌باشد [۵]. این تحقیق با فعال‌کننده‌های قلیایی از طریق واکنش‌های مکانیکی- شیمیایی با استفاده از محلول‌های سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات برای افزایش میزان سدیم بنتونیت و در نتیجه بهبود خواص گندله انجام گرفت. نتایج به دست آمده نشان دادند که وجود یون‌های سدیم، رفتار ظرفیت تبادل کاتیونی و تورم را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد. طبق جدول ۱، فعال شدن با سدیم کربنات ظرفیت تبادل رس طبیعی برزیل را دو برابر کرد درحالیکه فعال شدن با سدیم هیدروکسید، تا ۷ برابر میزان تورم را افزایش داد که می‌توان آن را یک عملکرد فوق‌العاده در نظر گرفت و این نشان دهنده تأثیر نوع رس و تغییرات آن‌ها می‌باشد.

جدول ۱- شاخص ظرفیت تبادل کاتیونی و تورم نمونه‌های خام و بهبودیافته سه نوع بنتونیت [۵].

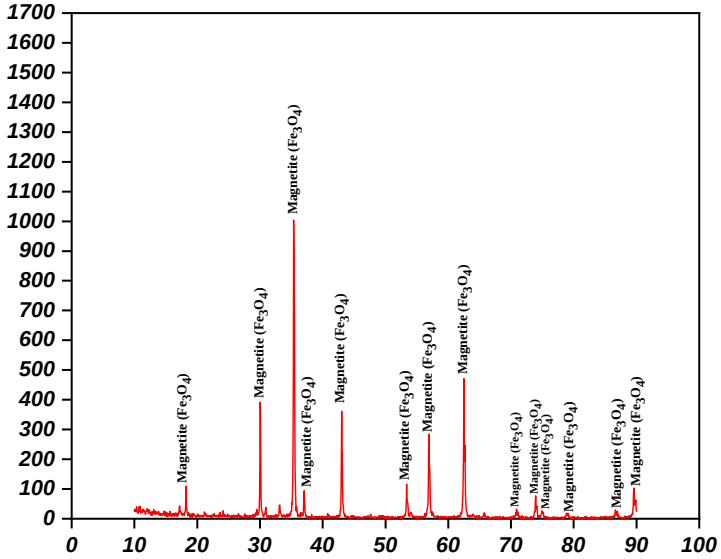
نمونه‌ها	بهبود یافته	ظرفیت تبادل کاتیونی (meq/100g clay)	تورم (mg/L)
برزیل	خام	۴۲/۵	۲
	سدیم هیدروکسید	۹۰	۱۳/۵
	سدیم کربنات	۱۰۰	۱۳
آرژانتین	خام	۶۵	۹
	سدیم هیدروکسید	۷۷	۱۲
	سدیم کربنات	۸۷/۵	۱۷
موزامبیک	خام	۶۵	۶/۵
	سدیم هیدروکسید	۶۸	۱۶
	سدیم کربنات	۷۳	۱۱

[1] Rosário

به طور کلی با توجه به بحث افزایش تولید فولاد در واحدهای گندله‌سازی، هدف اصلی در این پروژه بهینه کردن افزودنی‌های مورد استفاده (سدیم هیدروکسید) در ترکیبات گندله‌ها و رسیدن به پارامترهای مقاومتی حداکثر می‌باشد تا در نهایت بتوان مقدار زیادی از هزینه‌های مصرفی را کاهش داد. همچنین علاوه بر بهینه کردن افزودنی‌های مورد استفاده در ساختار گندله‌ها، مصرف زیاد بنتونیت در ساختار گندله، با توجه به اینکه پارامترهای مقاومت گندله‌ها به شدت افزایش می‌دهد، اما باعث ایجاد ناخالصی در گندله‌ها طی فرآیند پخت و احیا می‌گردد که در نهایت منجر به ایجاد سرباره‌های زیادی می‌گردد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست به همین دلیل کاهش مصرف بنتونیت با استفاده از سدیم هیدروکسید به عنوان یک فعال کننده، می‌تواند به شدت در فرآیند احیا مؤثر باشد که در این مطالعه یکی دیگر از اهداف، به حداقل رساندن میزان بنتونیت در ساختار ترکیب گندله‌ها با استفاده از فعال کردن بنتونیت می‌باشد. همچنین تعیین یک مقدار بهینه از سدیم هیدروکسید برای رسیدن خواصی مقاومتی مطلوب، در ترکیب گندله‌های آهن هدف اصلی این پژوهش می‌باشد که در ادامه افزودنی‌های مورد استفاده، روند انجام آزمایش‌ها و نتایج پارامترهای مقاومتی به کامل شرح داده می‌شوند.

۲. مشخصات کنسانتره

در این بخش نوع کنسانتره مورد استفاده در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به وجود ذخایر قابل توجه مگنتیت در کشور، ضرورت پژوهشی که گندله‌سازی مگنتیت به عنوان یکی از ملزومات احیا حالت جامد را بررسی کرده و شرایط دستیابی به بهترین بازدهی فرآیند گندله‌سازی را شناسایی کند، احساس می‌شود. با توجه به اینکه گندله‌های مورد استفاده در فرآیند احیا و سرباره‌سازی در معرض سایش و فرسایش بوده و بایستی شرایط خاصی را از نظر ابعاد، استحکام و سایر پارامترهای مقاومتی دارا باشند، هدف از پژوهش حاضر ساخت گندله‌هایی از کنسانتره مگنتیت با خواص فیزیکی مطلوب به‌منظور استفاده در فرایند پیش‌احیا و سرباره‌سازی است. دستیابی به چنین خواصی با تنظیم شرایط گندله‌سازی در دستگاه گندله‌ساز دیسکی مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است در این تحقیق از کنسانتره اپال به عنوان ساخت گندله‌های مگنتیتی استفاده شده است. همچنین در شکل ۴ آنالیز شیمیایی کنسانتره مورد استفاده در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۴- فازهای تشکیل دهنده کنسانتره مورد استفاده در این پژوهش.

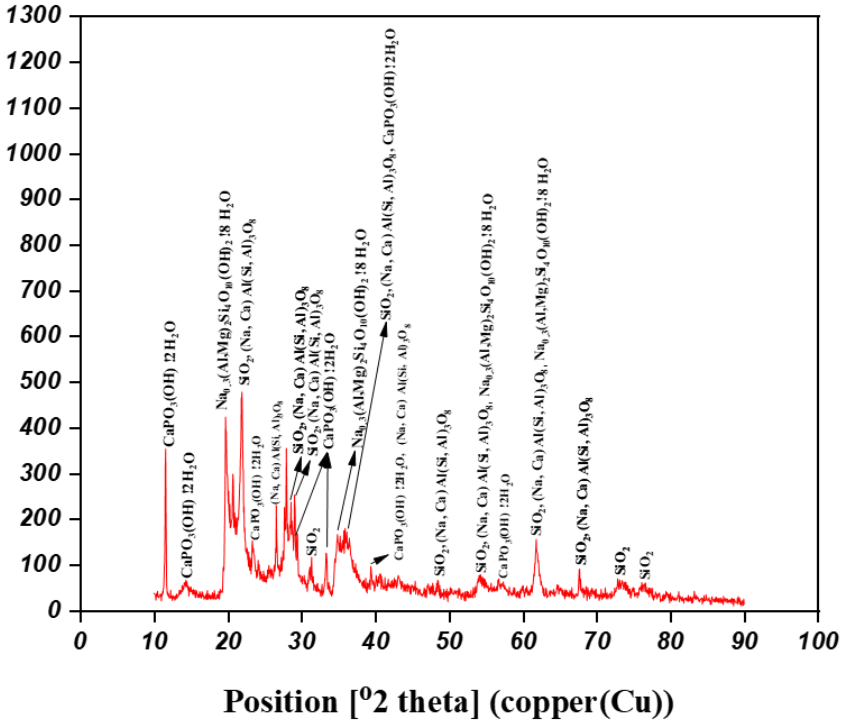
۳. افزودنی‌ها

افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ۲ نوع می‌باشد که به شرح زیر می‌باشند:

- بنتونیت
- سدیم هیدروکسید

۱.۳. بنتونیت

بنتونیت با فرمول عمومی $(Na,Ca)(Al,Mg)(Si_4O_{10})_3(OH)_6nH_2O$ در دسته رس‌ها قرار دارد و کانی غالب آن مونتموریونیت بوده و دارای ظرفیت تبادل کاتیونی بالایی است. بنتونیت در خانواده سیلیکات‌های صفحه‌ای و گروه اسمکتیت بوده و دارای ساختمان سه لایه‌ای می‌باشد که یک لایه آلومینیوم با پیوندهای سست بین دو لایه سیلیس قرار می‌گیرد. بنتونیت به دلیل وجود این ساختمان سه لایه، دارای خاصیت کلوئیدی می‌باشد. وجود مونتموریونیت در بنتونیت خاصیت سوسپانسیون‌کنندگی مناسبی به آن می‌دهد و در نتیجه می‌تواند مواد آلی، پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه را در ساختمان داخلی یا خارجی خود حفظ کند. بنتونیت توانایی بالایی در جذب رطوبت و نگهداری آب دارد. ساختمان آلومینوسیلیکاتی بنتونیت دارای کاتیون‌های آلی قابل تعویض می‌باشد و از هر کانی دیگری، به جز زئولیت، ظرفیت تبادل یونی بیشتری دارد. از خواص مهم کانی‌های خانواده اسمکتیت، می‌توان به جانشینی یونی، خاصیت شکل پذیری، انبساط و انقباض یونی اشاره کرد. بنتونیت‌ها به شدت دارای بار منفی هستند و با کاتیون‌هایی مثل Mg، K، Na که در حفره‌های آن جا گرفته‌اند، به حالت تعادل در می‌آیند. وجود بار الکتریکی منفی و نیز پیوندهای سست بین لایه‌های آلومینیوم و سیلیکات، باعث انتشار وسیع بنتونیت در آب می‌شود. در این تحقیق به منظور به حداقل رساندن بنتونیت مصرفی، در کل ترکیبات ۰/۷ درصد وزنی کل در نظر گرفته شد. لازم به ذکر در این پژوهش از بنتونیت سدیمی استفاده شده است که نتایج آنالیز شیمیایی و الگوی پراش مربوط به آن در شکل ۵ ارائه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵- فازهای تشکیل دهنده بنتونیت مورد استفاده در این پژوهش.

۲.۳. سدیم هیدروکسید

سدیم هیدروکسید یک باز بسیار قوی و قلیایی است که پروتئین‌ها را در دمای محیط معمولی تجزیه می‌کند و ممکن است سوختگی های شیمیایی شدیدی را به وجود آورد. سود مایع معمولاً پایدار است، اما در صورت گرم کردن غیر پایدار می‌شود. شکل ظاهری این ماده به صورت مایع روشن و شفاف می‌باشد و هیچ بویی ندارد. سود مایع می‌تواند در آب با هر نسبتی به سهولت حل شود و به راحتی رطوبت و دی اکسید کربن را از هوا جذب می‌کند. سود مایع دارای اثر خورندگی است بنابراین به شدت خورنده و واکنشگر است. در این مطالعه به منظور بررسی تاثیر سدیم کربنات بر پارامترهای مقاومتی گندله‌ها، ۶ ترکیب با ۶ درصد وزنی مختلف (۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ درصد) پیشنهاد شدند.

۴. روش انجام آزمایش

در این بخش روند انجام آزمایش‌های انجام شده شرح داده می‌شوند. با توجه به افزودنی‌های (بنتونیت، سدیم هیدروکسید) مورد استفاده در این مطالعه، ۶ ترکیب با درصد وزنی و مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید و مقدار ثابت بنتونیت (۰/۷ درصد کل ترکیب) پیشنهاد شد که جزئیات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد، ۶ مقدار متفاوت برای سدیم هیدروکسید در نظر گرفته شده است که برای کدام از این مقادیر گندله‌های آهن ساخته شدند و مقدار بهینه سدیم هیدروکسید با توجه به بیشترین تأثیرگذاری بر پارامترهای مقاومتی گندله‌های آهن مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین با توجه به بررسی‌های انجام شده و آزمایش‌های متعدد (ساخت گندله با رطوبت‌های مختلف)، رطوبت بهینه در نظر گرفته شده کل ترکیب در میکسر حدود ۷/۵ درصد در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به منظور ساخت گندله‌ها یک دیسک گندله‌سازی ۸۰ سانتی‌متری مورد استفاده قرار گرفت و همچنین به منظور شبیه‌سازی فرآیند پخت گندله در خطی اصلی، آزمایش‌ها و فرآیند پخت گندله در پایلوت پلنت گندله‌سازی ذوب آهن پاسارگاد انجام گرفت.

جدول ۲- درصد وزنی و مقدار افزودنی‌ها در ساخت گندله آهن

کد آزمایش	کنسانتره			بنتونیت		NaOH		رطوبت		
	وزن (kg)	درصد وزنی	بلین	وزن (g)	درصد وزنی	وزن (g)	درصد وزنی	رطوبت اولیه	رطوبت میکسر	رطوبت دیسک
T1	۷۷/۸۰۸	۹۷/۲۶	۱۵۸۷	۵۶۰	۰/۷	۸	۰/۰۱	۵/۱	۷	۷/۵
T2	۷۶/۸۷۶	۹۶/۱۰	۱۵۸۷	۵۶۰	۰/۷	۱۶	۰/۰۲	۴/۴۷	۷/۵۸	۷/۷
T3	۷۶/۵۵۵	۹۵/۶۹	۱۷۱۶	۵۶۰	۰/۷	۲۴	۰/۰۳	۴/۰۷	۷/۲۴	۷/۶۷
T4	۷۷/۴۸	۹۶/۳۱	۱۳۷۶	۵۶۰	۰/۷	۳۲	۰/۰۴	۴/۶۸	۷/۲۴	۷/۷
T5	۷۶/۹۵۰	۹۶/۱۶	۱۴۸۴	۵۶۰	۰/۷	۴۸	۰/۰۶	۴/۵۶۲	۷/۵۶	۷/۹
T6	۷۷/۶۴۲	۹۷/۰۵	۱۲۶۲	۵۶۰	۰/۷	۷۲	۰/۰۹	۵/۴۱۲	۷/۴۷	۷/۷۷

۵. بحث و نتایج

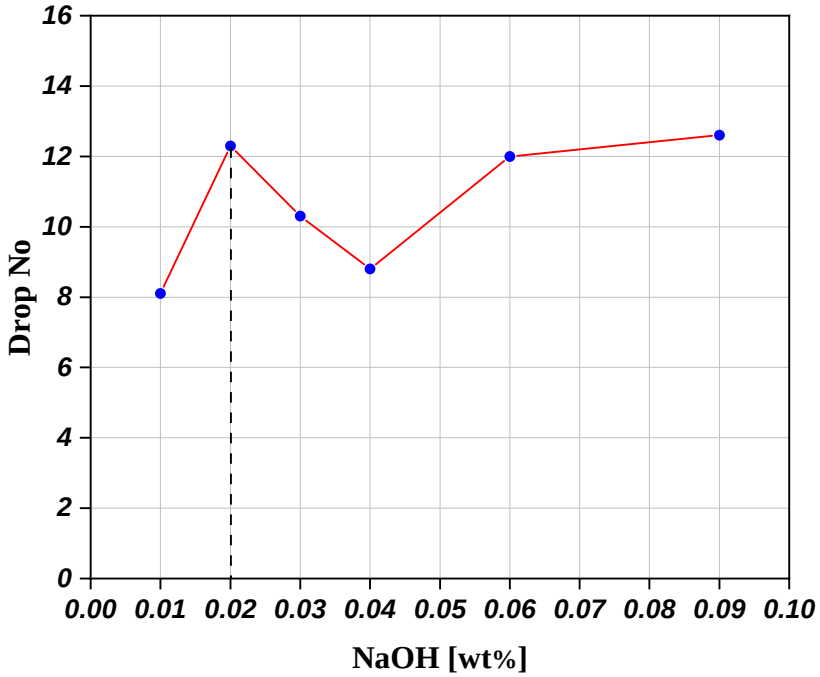
همانگونه که در جدول ۲ مشخص شده است، ۶ ترکیب با ۶ درصد وزنی ۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ سدیم هیدروکسید برای ساخت گندله‌ها تهیه شدند. سپس به منظور بررسی پارامترهای مقاومتی گندله‌های ساخته شده، مقاومت فشاری گندله‌های خام[1] (GCS)، خشک[2] (DCS) و پخته[3] (CCS) شده اندازه‌گیری شدند که نتایج تغییرات پارامترهای مقاومتی همراه با آنالیز شیمیایی هر ترکیب در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، برای درصد وزنی ۰/۰۳ درصد، بیشترین مقدار مقاومت فشاری را از خود نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که هرچه درصد وزنی سدیم هیدروکسید در ترکیب زیاد شود، متناسب با آن مقاومت فشاری افزایش نمی‌یابد. دلیل این امر این است که افزایش بیش از حد سدیم هیدروکسید در ترکیب، بافت و لایه‌های بنتونیت را از بین می‌برد و مقاومت فشاری گندله‌های خام و پخته به صورت چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. لذا از بین این ۶ ترکیب ارائه شده از سدیم هیدروکسید، ترکیب T3، با درصد وزنی ۰/۰۳ درصد، بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان داده است و به عنوان ترکیب بهینه در این پژوهش پیشنهاد می‌گردد که نتایج تغییرات پارامترهای مقاومتی (عدد دراپ، مقاومت فشاری گندله خام، مقاومت فشاری گندله خشک و مقاومت فشاری گندله پخته) به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است نتایج آنالیز شیمیایی گندله‌های تولیدی با ترکیب پیشنهادی T3 نشان می‌دهند مقدار C، FeO و Fe_{total} در محدوده مجازی قرار دارند که این مقادیر به ترتیب برابر با ۰، ۰/۸۳ و ۶۵/۷۹ می‌باشند. مقایسه مقادیر پارامترهای مقاومتی، میزان تخلخل و آنالیز شیمیایی نشان می‌دهند که ترکیب T3 (۰/۰۳ وزنی سدیم هیدروکسید) نسبت به سایر ترکیبات ارائه شده از برتری بیشتری برخوردار است.

جدول ۳- نتایج پارامترهای مقاومتی و آنالیز شیمیایی گندله‌ها

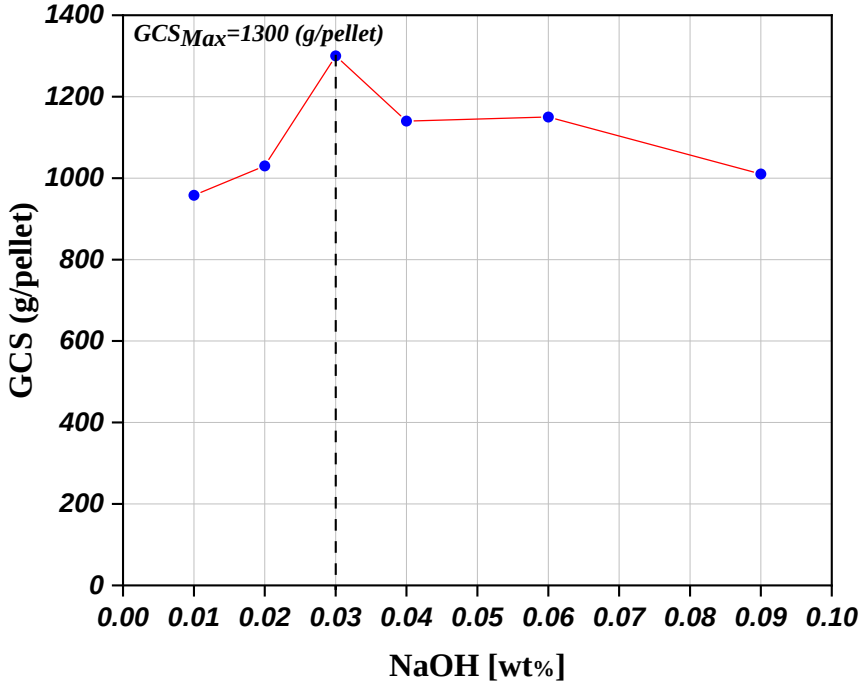
کد آزمایش	پارامترهای مقاومتی				تخلخل (٪)	آنالیز شیمیایی			
	Drop	GCS (g/pellet)	DCS (kg/pellet)	CCS (kg/pellet)		S (%)	C (%)	FeO (%)	Fe_{total} (%)
T1	۸/۱	۹۵۸	۷/۰۸	۳۰۳/۳۳	۱۸/۰۶	۰/۰۰۶۲	۰	۰/۹	۶۵/۵۹
T2	۱۲/۳	۱۰۳۰	۸/۹۸	۳۰۹/۳	۱۹/۷	۰/۰۰۳۸	۰	۰/۸۴	۶۶/۳۲
T3*	۱۰/۳	۱۳۰۰	۹/۸	۳۳۷/۲۳	۱۹/۵	۰/۰۰۹۴۹	۰	۰/۸۳	۶۵/۷۹
T4	۸/۸	۱۱۴۰	۸/۸	۲۷۴/۳۷	۲۱	۰/۰۱۰۸	۰	۰/۸۷	۶۶/۵۷
T5	۱۲	۱۳۵۰	۷/۹	۲۹۶/۳۶۷	۲۰/۱۱	۰/۰۰۶۹	۰	۰/۷۱	۶۶/۷۶
T6	۱۲/۶	۱۰۱۰	۷/۷۲	۲۷۹/۳	۲۱/۱۶	۰/۰۱۸۶	۰	۰/۶۲	۶۶/۳۹

* بهترین ترکیب پیشنهادی از نظر پارامترهای مقاومتی و آنالیز شیمیایی

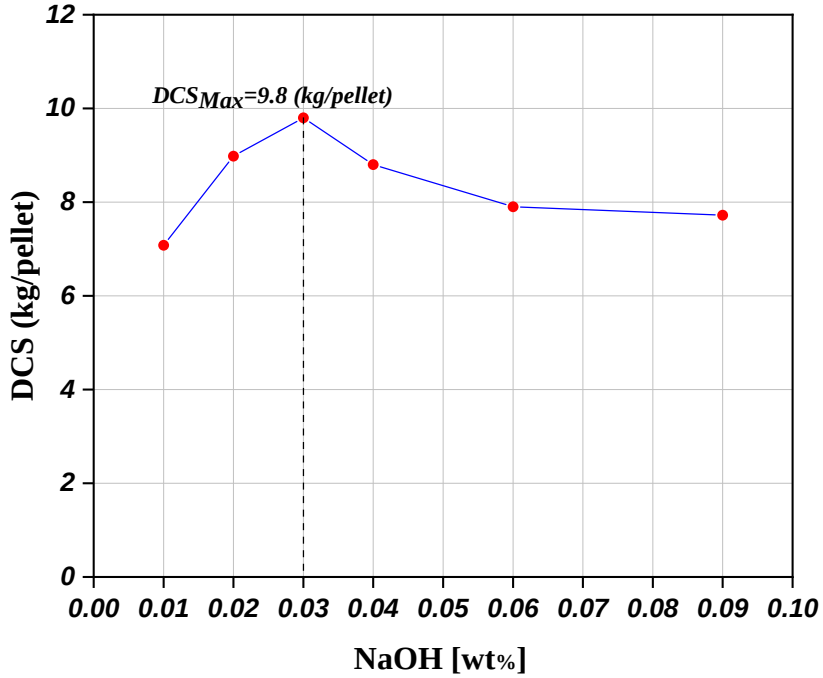
[1] Green Compression Strength
[2] Dry Compression Strength
[3] Cold Compression Strength



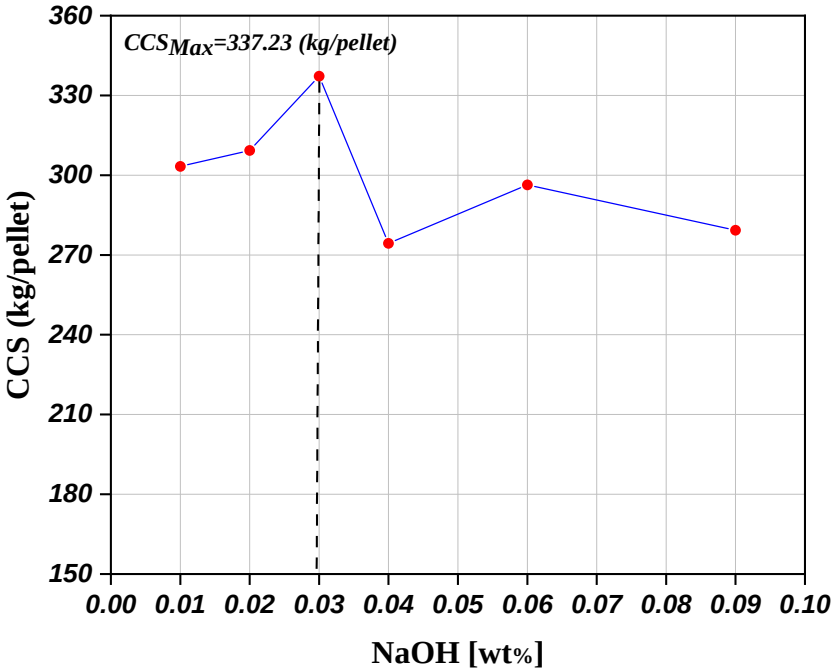
شکل ۶- تأثیر تغییرات درصد وزنی سدیم هیدروکسید بر عدد دراپ.



شکل ۷- تأثیر تغییرات درصد وزنی سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری گندله خام.



شکل ۸- تأثیر تغییرات درصد وزنی سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری گندله خشک.



شکل ۹- تأثیر تغییرات درصد وزنی سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری گندله پخته.

۶. نتیجه‌گیری

یکی از مهمترین اهداف در صنعت گندله‌سازی و فولاد در سرتاسر دنیا، تولید گندله‌هایی با کیفیت و با پارامترهای مقاومتی مطلوب می‌باشد. لازم به ذکر است به منظور ساخت گندله‌های آهن و چسبیدن ذرات به یکدیگر و رسیدم به مقاومت مطلوب، از بنتونیت در ساختار گندله‌ها استفاده می‌گردد. لذا با توجه به اینکه مصرف زیاد بنتونیت در ساختار گندله، با توجه به اینکه پارامترهای مقاومت گندله‌ها را به شدت افزایش می‌دهد، اما باعث ایجاد ناخالصی در گندله‌ها طی فرآیند پخت و احیا می‌گردد که در نهایت منجر به ایجاد سرباره‌های زیادی می‌گردد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. لذا در این پژوهش سعی شده است که با بهینه‌سازی میزان مصرف سدیم هیدروکسید متناسب با مقدار بنتونیت (به منظور فعال کردن بنتونیت) موجود در ترکیب گندله، گندله‌هایی با پارامترهای مقاومتی مطلوب تولید گردد و تا حد امکان میزان بنتونیت را با توجه به افزودنی سدیم هیدروکسید تا حدالامکان در ترکیب گندله کاهش داد. برای این منظور در این پژوهش ۶ ترکیب با درصد وزنی‌های مختلف سدیم هیدروکسید (۰/۰۱، ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۹ درصد) و با مقدار بنتونیت ثابت (۰/۷ درصد) پیشنهاد گردید و متناسب با هر مقدار سدیم هیدروکسید، آزمایش‌ها در پایلوت پلنت گندله‌سازی ذوب آهن پاسارگاد در مقیاس نیمه صنعتی ساخته شدند. پس از ساخت گندله‌ها مقاومت فشاری گندله‌های خام، خشک و پخته اندازه‌گیری شدند و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفتند. بررسی مقایسه نتایج نشان دادند که ترکیب T3، با ۰/۰۳ وزنی سدیم هیدروکسید و مقدار بنتونیت ۰/۷ درصد از بیشترین مقدار مقاومت فشاری گندله خام (GCS)، گندله خشک (DCS) و گندله پخته (CCS) برخوردار است که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۱/۳، ۹/۸ و ۳۳۷/۲۳ کیلوگرم می‌باشند. مقادیر بالای مقاومت فشاری نشان می‌دهند که ترکیب T3 به عنوان ترکیب بهینه نسبت به سایر ترکیبات می‌باشد. لذا با توجه به اینکه آزمایش‌ها در مقیاس نیمه صنعتی انجام گرفته است، ترکیب پیشنهادی (T3) می‌تواند در خط اصلی کارخانه‌های گندله‌سازی با سطح اطمینان بالایی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

[۱] ا. زاده. محمد، م. ر. مرتضی، ایران نژاد. احمد، "امکان سنجی استفاده از چسب های جایگزین بنتونیت به منظور افزایش خواص کیفی گندله"، ۱۳۹۳.

[2] A. Gul, A. A. Sirkeci, F. Boylu, G. Guldan, and F. Burat, “Improvement of mechanical strength of iron ore pellets using raw and activated bentonites as binders,” *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 51, no. 1, pp. 23–36, 2015, doi: 10.5277/ppmp150203.

[3] a Saidi and M. Shamanian, “Hyperactivation of bentonite in pelletizing process,” *Int. J. ISSI*, vol. 1, no. 1, pp. 38–41, 2004.

[۴] ع. مهدی، ع. مهدی، ج. علی، "ایجاد شرایط بهینه جهت تولید گندله خام مناسب از کنستانتره های سنگ آهن با سطح ویژه پایین توسط افزودنی های آلی و معدنی"، *مهندسی متالوژی*، صفحه ۲۱۷-۲۲۴، دوره ۲۱، شماره ۳، ۱۳۹۷.

[5] J. A. Rosário *et al.*, “Influence of alkaline activation over swelling and cation exchange capacity on bentonites,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 660–661, pp. 1064–1069, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.660-661.1064.