



Investigating the Effect of Bentonite Heat Treatment Cycle on the Properties of Iron Ore Pellets

Ali Mirzaei*, Abolfazl Ghadiri and Ali Mazaheri

Paya Sanat Sama Company, Isfahan Science and Technology Town Isfahan 84156-83111, Iran

* Corresponding author, Email: mirzaieali2@gmail.com

(Received: 29 December 2024; Revised: 16 March 2025; Accepted: 23 April 2025; Available online: 30 July 2025)

ABSTRACT

Introduction and Objectives: The quality of produced pellets is directly dependent on the physicochemical properties of the bentonite used. This research aims to investigate the effect of heat treatment on the characteristics of bentonite and to evaluate the properties of the obtained raw and fired pellets.

Materials and Methods: In this study, the impact of heat treatment on the properties of bentonite, as a binder additive in a pelletizing unit, was investigated. A sample of sodium bentonite from South Khorasan mines was selected as the raw material. Following thermal analyses, temperatures of 400, 800, and 1300 °C were chosen as heat treatment temperatures. X-ray diffraction (XRD), elemental analysis, and scanning electron microscopy (SEM) were employed to analyze the phase and structural characteristics of the samples after heat treatment. Water absorption, swelling percentage of the samples, and the properties of pellets produced from the heat-treated bentonite were examined to assess the effect of heat treatment on bentonite properties.

Results: The results indicated that heat treatment led to structural and phase changes in bentonite. SEM images of raw bentonite revealed that the particle morphology and porosity of bentonite changed with increasing heat treatment temperature. Furthermore, the zeta potential test was utilized to compare the electrical potential difference between the layers of the samples. The results showed that heat-treated bentonite particles at 400 °C exhibited a lower tendency to settle.

Conclusion: The results of this study declared that heat treatment up to 400 °C improved the properties of bentonite and the obtained pellets.

Keywords: Iron ore pelletizing plant, Sodium bentonite, Heat treatment, Montmorillonite, Pellet strength.

How to Cite: Mirzaei A, Ghadiri A, Mazaheri A. Investigating the effect of bentonite heat treatment cycle on the properties of iron ore pellets. J Adv Mater Eng. 2025;44(4):33-53. <https://doi.org/10.47176/jame.44.4.1100>

Copyright © 2025 Isfahan University of Technology, Published by IUT press.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.



بررسی تأثیر سیکل عملیات حرارتی بتونیت بر خواص گندله سنگ آهن

علی میرزائی*^{ID}، ابوالفضل قدیری و علی مظاهری

شرکت پایا صنعت سما شهرک علمی تحقیقاتی اصفهان، اصفهان ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶ ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: mirzaiecali2@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۹، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۳، انتشار: ۱۴۰۴/۵/۸)

چکیده

مقدمه و اهداف: کیفیت گندله‌های تولیدی، به‌طور مستقیم به خواص فیزیکی و شیمیایی بتونیت مصرفی بستگی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ویژگی‌های بتونیت و بررسی خواص گندله خام و پخته‌شده حاصل از آن می‌پردازد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق، تأثیر عملیات حرارتی بر خواص بتونیت، به‌عنوان یک افزودنی اتصال‌دهنده در واحد گندله‌سازی، مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ای از بتونیت سدیمی از معادن خراسان جنوبی به‌عنوان ماده اولیه انتخاب شد و پس از انجام آنالیزهای حرارتی، دماهای ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دماهای عملیات حرارتی انتخاب گردید. به‌منظور تحلیل فازی و ساختاری نمونه‌ها پس از عملیات حرارتی، از آنالیزهای پراش پرتو ایکس، آنالیز عنصری و میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای بررسی تأثیر عملیات حرارتی روی خواص بتونیت، جذب آب، درصد تورم نمونه‌ها و همچنین خواص گندله حاصل از بتونیت عملیات حرارتی‌شده بررسی و ارزیابی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که عملیات حرارتی، باعث ایجاد تغییرات ساختاری و فازی در بتونیت می‌شود. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از بتونیت خام نشان داد که با افزایش دمای عملیات حرارتی، شکل ذرات و منافذ بتونیت تغییر پیدا کرده است. همچنین، به‌منظور مقایسه میزان اختلاف پتانسیل الکتریکی بین لایه‌های نمونه‌ها، از آزمون پتانسیل زتا استفاده شد. نتایج نشان داد که ذرات بتونیت عملیات حرارتی‌شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، تمایل کمتری به ته‌نشین شدن دارند.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که انجام عملیات حرارتی تا دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد خواص بتونیت و گندله‌های تولیدی از آن را بهبود بخشیده است.

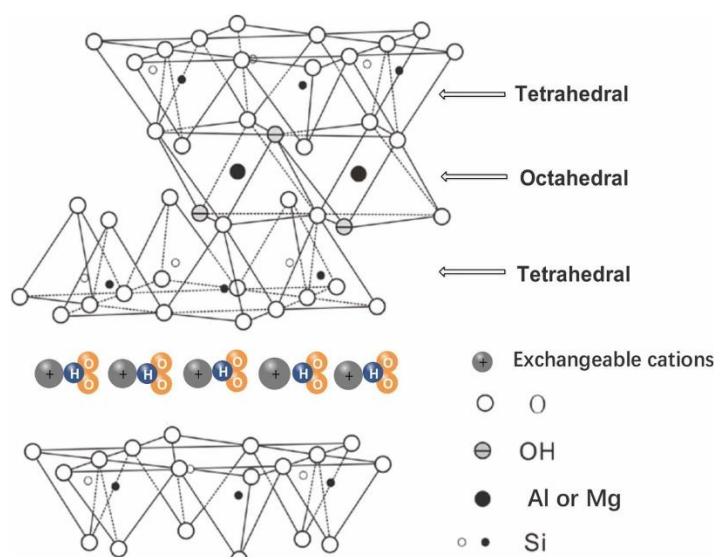
واژه‌های کلیدی: واحد گندله‌سازی سنگ‌آهن، بتونیت سدیمی، عملیات حرارتی، مونت‌موریلونیت، استحکام گندله.



۱- مقدمه

گندله‌سازی^۱، تبدیل نرمه مواد اولیه به توده‌ای متراکم است. برای تولید گندله خام^۲، نرمه سنگ‌آهن را به همراه بتونیت و مواد افزودنی در دستگاه‌های گندله‌سازی به چرخش درآورده تا گندله خام تولید شود. گندله‌های خام جهت سخت‌شدن، در اتمسفر اکسیدکننده تا زیر دمای نرم‌شدن سنگ‌آهن در کوره حرارت داده می‌شوند تا خشک و سپس پخته شوند. خواص مکانیکی، فیزیکی-شیمیایی و متالورژیکی گندله‌ها، به عوامل سه‌گانه نرمه-های سنگ‌آهن، چسب‌ها و افزودنی‌ها وابسته است (۱). طی فرآیند گندله‌سازی، از آب جهت ایجاد یک اتصال ضعیف ولی مؤثر بین ذرات نرمه سنگ‌آهن جهت جوانه‌زنی و رشد مداوم گندله استفاده می‌شود. آب، به‌تنهایی توانایی ایجاد اتصال قوی را نداشته و از بتونیت در کنار آب، جهت ایجاد اتصال پایدار استفاده شده است (۲). بتونیت، مناسب‌ترین عامل پیونددهنده ذرات گندله می‌باشد. بتونیت، به دلیل ویژگی‌هایی مانند کلئیدی‌بودن^۳، تورم‌پذیری، سطح ویژه بالا و قیمت مناسب، کاربرد مهمی در واحد گندله‌سازی دارد. مهم‌ترین کانی تشکیل‌دهنده بتونیت مونت‌موریلونیت^۴ می‌باشد که در کنار آن کانی‌های غیررسی مانند فلدسپار^۵، کلسیت^۶، کوارتز^۷، کائولینت^۸ و ایلیت^۹ نیز یافت می‌شود که بر کیفیت بتونیت اثر می‌گذارند (۱). همان‌طورکه در شکل (۱) مشاهده می‌شود کانی مونت‌موریلونیت، از گروه دی اکتاهدرال بوده و در صفحه اکتاهدرال آن معمولاً تعدادی یون منیزیم و آهن جایگزین بخشی از آلومینیوم شده و در اثر وقوع این پدیده، مونت‌موریلونیت بار منفی پیدا می‌کند که این بار منفی در شبکه، به‌وسیله جذب کاتیون‌هایی مانند کلسیم، منیزیم و سدیم در فضاهای بین‌لایه‌ها خنثی می‌شود و همچنین مولکول‌های آب می‌توانند در فضاهای بین‌لایه‌ای قرار گیرند لایه‌ها در شبکه رسی مونت‌موریلونیت، به-وسیله پیوندهای واندروالسی^{۱۰}، روی هم قرار می‌گیرند (۴). زمانی که مونت‌موریلونیت خشک، در معرض رطوبت یا آب قرار گیرد توانایی جذب مولکول‌های آب را در فضاهای بین‌لایه‌ای خود پیدا می‌کند (۲). تحقیقات نشان داده است که عملیات

حرارتی می‌تواند فعالیت پوزولانی^{۱۱} بتونیت را افزایش دهد و در نتیجه استحکام فشاری بتونیت را بهبود بخشد، اما بر خواص انبساطی آن نیز تأثیر می‌گذارد (۳). بر اساس مطالعات قبلی، بتونیت سدیمی در دماهای ۸۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به فاز آمورف^{۱۲} تبدیل می‌شود که فعالیت پوزولانی بالایی را نشان می‌دهد، اما حفظ خواص انبساطی در این دماها چالش‌برانگیز است (۴). همچنین، تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که تغییرات ساختاری مونت‌موریلونیت، شامل حذف آب جذب‌شده در دماهای پایین و تخریب لایه‌های کریستالی در دماهای بالاتر، نقش مهمی در تنظیم خواص مکانیکی و شیمیایی بتونیت ایفا می‌کند. براساس نتایج فازیبی و مطالعات حرارتی، دماهای ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌عنوان محدوده‌ای بحرانی برای فرآیند دفع آب ساختاری و تغییرات اولیه کریستالی شناسایی شده‌اند (۵). کاهش شدید استحکام فشاری پس از افزودن بتونیت طبیعی به مواد پرکننده معدنی یکی از چالش‌های اصلی بوده است، اما عملیات حرارتی به‌عنوان راه‌حلی مؤثر برای افزایش استحکام و درعین حال حفظ خواص انبساطی بتونیت مطرح شده است. مطالعات متعدد نشان داده است که دمای بالا، تأثیرات چشمگیری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بتونیت اعمال می‌کند. به‌عنوان مثال، افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به کاهش تدریجی ظرفیت تبادل کاتیونی و افزایش مساحت سطح ویژه و حجم منافذ می‌شود. با این حال، دمای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش سریع ظرفیت تبادل کاتیونی را به دنبال دارد که نشان‌دهنده تغییرات ساختاری و کاهش بلورینگی است (۶). آزمون‌های حرارتی، تخریب ساختار بلوری و شروع فرآیندهای تف‌جوشی^{۱۳} را در دماهای بالای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تأیید می‌کنند. علاوه‌براین، حرارت‌دهی بتونیت تا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، آن را به حالت غیرپلاستیک تبدیل کرده و خاصیت تورم آن را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (۷). در دماهای پایین‌تر (۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد)، تغییرات حجم و وزن مخصوص بتونیت جزئی است، اما از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به بعد، آب بین‌لایه‌ای از دست رفته و ساختار بلوری آن به‌طور



شکل ۱- ساختار کریستالی مونت موریلونیت (۷).

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF نمونه بتونیت گندله سازی

عنصر	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	CaO	SO ₃	L.O.I
مقدار	۶۱/۱۲	۱۲/۹۴	۲/۴۲	۲/۳۴	۰/۰۴	۱/۹۰	۲/۴۴	۰/۱۵	۱۵/۰۴

چشمگیری تغییر می‌کند. در نهایت، حرارت دهی بتونیت در دماهای مختلف (۱۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد)، تأثیرات قابل-توجهی را بر ساختار بلوری، خواص فیزیکی و شیمیایی آن نشان می‌دهد (۸). به طور کلی، مطالعات قبلی، بر اهمیت کنترل دقیق دما در کاربردهای مختلف بتونیت تأکید می‌کنند و مطالعه جامعی برای تأثیر عملیات حرارتی بر بتونیت مصرفی گندله سازی انجام نشده است. کیفیت گندله های تولیدی، به طور مستقیم به خواص فیزیکی و شیمیایی بتونیت مصرفی بستگی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ویژگی های بتونیت و بررسی خواص گندله خام و پخته شده حاصل از آن می‌پردازد.

چشمگیری تغییر می‌کند. در نهایت، حرارت دهی بتونیت در دماهای مختلف (۱۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد)، تأثیرات قابل-توجهی را بر ساختار بلوری، خواص فیزیکی و شیمیایی آن نشان می‌دهد (۸). به طور کلی، مطالعات قبلی، بر اهمیت کنترل دقیق دما در کاربردهای مختلف بتونیت تأکید می‌کنند و مطالعه جامعی برای تأثیر عملیات حرارتی بر بتونیت مصرفی گندله سازی انجام نشده است. کیفیت گندله های تولیدی، به طور مستقیم به خواص فیزیکی و شیمیایی بتونیت مصرفی بستگی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ویژگی های بتونیت و بررسی خواص گندله خام و پخته شده حاصل از آن می‌پردازد.

۲-۲- آنالیز حرارتی

برای مطالعه رفتار حرارتی بتونیت، از دستگاه Instrument STA449F3jupiter ساخت شرکت Netzsch استفاده شد. نمونه بتونیت با سرعت گرمایش ۱۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه در محیط اتمسفری هوا تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد گرم شد.

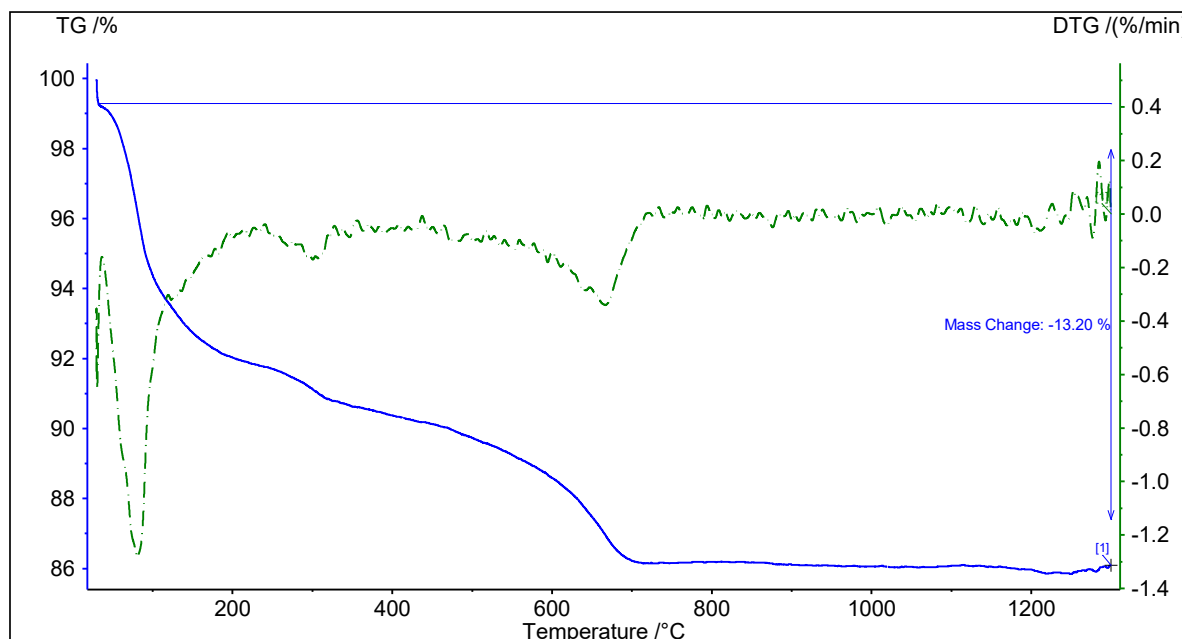
۲-۳- روش های مشخصه یابی

به منظور فاز یابی نمونه ها از دستگاه پراش پرتو ایکس^{۱۴} ASEWARE مدل AW-XDM300 ساخت کشور آمریکا، با استفاده از لامپ مسی با مشخصات جریان ۳۰ میلی آمپر و ولتاژ ۴۰ کیلوولت با طول موج ۱/۵۴۱۸۸ آنکستروم انجام شد. اندازه گام در زمان انجام آزمون برابر ۰/۰۵ درجه، نرخ روبش سه درجه

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

یک نمونه بتونیت سدیمی از معدن سربیشه استان خراسان جنوبی مورد استفاده در واحد گندله سازی فولاد سنگان، مورد بررسی قرار گرفت. بتونیت مورد بررسی، براساس استاندارد



شکل ۲- منحنی‌های گرماوژنی^{۱۶} به همراه مشتق گرماوژنی^{۱۷} بتونیت.

۲-۵- آنالیز تعیین پتانسیل زتا

برای مطالعه و مقایسه میزان اختلاف پتانسیل الکتریکی بین لایه‌ها، نمونه بتونیت خام با بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد در pH های مختلف (۴، ۷ و ۱۰) با محلول بافر تنظیم و از دستگاه پتانسیل زتا DLS مدل SZ-100 ساخت ژاپن، استفاده شد که جدول (۲) مشخصات محلول‌ها آورده شده است.

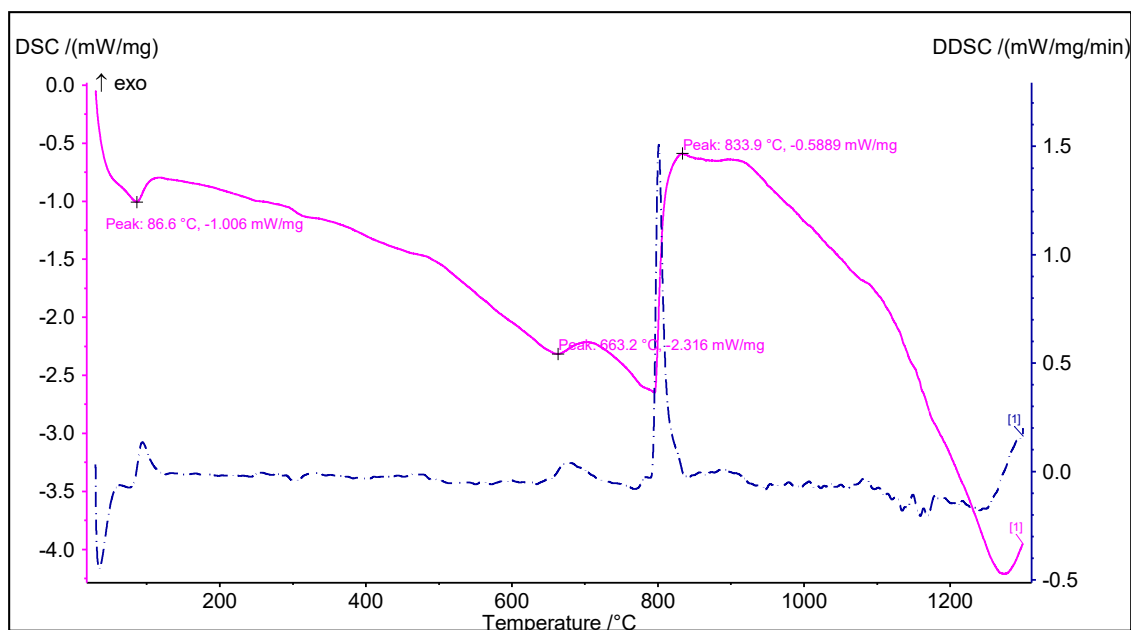
۲-۶- آزمون جذب آب

در این پژوهش، تأثیر عملیات حرارتی بر میزان جذب آب نمونه‌های بتونیت با استفاده از استاندارد ASTM E946-92 و در چهار بازه زمانی مختلف بررسی شد. بدین منظور، دو گرم بتونیت خشک و پودر شده، به صورت یکنواخت روی کاغذ صافی با قطر ۰/۰۹ متر که از قبل روی قالبی با قطر ۰/۰۵ متر قرار داده شده بود، پخش گردید. سپس کاغذ صافی حاوی بتونیت به مدت ۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت، روی یک صفحه متخلخل نیمه- غوطه‌ور در آب قرار گرفت، به گونه‌ای که ارتفاع نمونه از سطح آب ۰/۰۱۲ متر باشد. پس از گذشت زمان‌های مشخص

بر دقیقه و زاویه مورد آزمایش از ۶ تا ۹۰ درجه انتخاب شد. سپس نتایج به دست آمده از این آزمون توسط نرم‌افزار PANalytical HighScoreXpert، از محصولات نرم‌افزاری شرکت MAUD، فازیابی شد. برای بررسی ریزساختار بتونیت قبل و پس از عملیات حرارتی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۸} Philips مدل XL30 ساخت کشور هلند، مجهز به آنالیزگر عنصری EDX silicon Drift استفاده شد.

۲-۴- انجام سیکل عملیات حرارتی

با توجه به نتایج TG-DSC، منحنی‌های DSC در شکل‌های (۲) و (۳)، دو پیک گرماگیر واضح در نزدیکی ۸۷ و ۶۶۳ درجه سانتی‌گراد و دو پیک گرماگیر پهن در نزدیکی ۸۳۴ و ۱۱۲۹ درجه سانتی‌گراد نشان دادند. برای تسهیل کارهای آزمایشی بعدی و مطالعات فازی، دماها به ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گرد شدند. نمونه‌ها با سرعت گرمایش چهار درجه بر دقیقه، به دمای عملیات حرارتی مورد نظر رسیده و سپس به مدت چهار ساعت در دمای تنظیم شده نگه داشته شدند و به آرامی در کوره سرد شدند.



شکل ۳ - منحنی آنالیز گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC) به همراه منحنی مشتق گرماسنج روبشی تفاضلی (DDSC) بتونیت.

جدول ۲- محلول‌های بافر مورد استفاده جهت تنظیم pH در تعیین پتانسیل زتا^{۱۵}

شماره ردیف	نوع محلول بافر	pH محلول بافر
۱	پتاسیم هیدروژن فتالات ($C_8H_5KO_4$)	۴
۲	KH_2PO_4/Na_2HPO_4	۷
۳	بوراکس ($Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$)	۱۰

D5890 ارزیابی گردید. درابتدا، نمونه موردنظر را از سرندهای ۱۰۰ و ۲۰۰ مش عبور داده، به‌صورتی که ۱۰۰ درصد مواد از سرند ۱۰۰ مش (۱۵۰ میکرون) و حداقل ۶۵ درصد مواد از سرند ۲۰۰ مش (۷۵ میکرون) عبور کنند. در راستای این هدف، ابتدا پودر بتونیت به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. سپس، در یک استوانه مدرج ۱۰۰ میلی‌لیتری، ۹۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد و به‌تدریج دو گرم از پودر بتونیت به آن افزوده شد. در ادامه، حجم استوانه مدرج با آب مقطر به ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد. پس از گذشت ۱۶ ساعت، حجم بتونیت موجود در استوانه مدرج به ازای واحد وزن دو گرم، به‌عنوان شاخص تورم درنظر گرفته شد و نمونه‌های بتونیت بر اساس این شاخص با یکدیگر مقایسه شدند.

شده، نمونه‌های بتونیت و کاغذ صافی وزن شدند. میزان آب جذب‌شده توسط نمونه‌ها از طریق کسر میانگین وزن کاغذ صافی مرطوب از وزن کاغذ صافی هیدراته به‌اضافه بتونیت محاسبه گردید. درنهایت، درصد جذب آب نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) و برحسب درصدی از جرم خشک گزارش شد که در آن W_w وزن نمونه بتونیت مرطوب و W_d وزن نمونه بتونیت خشک را نشان می‌دهد.

$$\text{Absorption, \%} = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

۷-۲- بررسی تورم نمونه‌ها

میزان تورم‌پذیری نمونه‌های بتونیت مطابق با استاندارد ASTM

جدول ۳- نتایج آنالیز شیمیایی کنسانتره مصرفی

عنصر	Fe _{total}	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	P	S	L.O.I
مقدار	۶۷/۱۹	۲۸/۴۹	۰/۵۳	۱/۷۴	۲/۱۷	۰/۲۰	۰/۰۲۶	۰/۰۳۷	۰/۰۰۳	۱/۲



شکل ۴- بسکت ساخته شده از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۴ به همراه گندلهای تولیدی.

شده و تست عدد افتادن انجام شد. برای اندازه‌گیری استحکام گندله خام، استحکام در سقوط آزاد از فاصله ۰/۴۵ متری بر صفحه فولادی اندازه‌گیری شد. تعداد دفعات سقوط آزاد، از طریق رهاکردن گندله خام بدون صدمه دیدن تعیین گردید. در مجموع تعداد ۱۰ گندله مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین عدد افتادن محاسبه شد. جهت پخت گندلهای خام تولیدشده در دیسک پایلوت، از روش تست بسکت استفاده شد که در شکل (۴)، نمایی از بسکت مورد استفاده آورده شده است.

بسکت استوانه‌ای، ارتفاع متناسب با لایه بستر گندله خام داشته (۰/۳ متر) و قطر آن حدود ۰/۱۵ متر و از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۴ است. گندلهای خام، درون بسکت قرار داده شده و در خط اصلی، در ابتدای کوره پخت گندله وارد و از انتهای آن خارج شد تا جهت حفظ شرایط کوره (دما و فشار)، از متوقف کردن کوره در حین بسکت‌گذاری و بسکت‌برداری، خودداری شود. در این پژوهش، برای تولید گندله از کنسانتره مگنتیتی آسیاب فولاد سنگان استفاده شد که مشخصات آن در جدول (۳) آورده شده است. همچنین برای بررسی تأثیر نمونه‌های بتونیت،

۹-۲- آنالیز BET چند نقطه‌ای

برای بررسی اندازه سطح ویژه، تخلخل و اندازه منافذ از دستگاه BET ساخت کشور ژاپن مدل Belsorp mini استفاده شد. روش کار، به این صورت است که میزان گاز نیتروژن جذب و دفع شده توسط وزن مشخصی از نمونه‌های بتونیت (۰/۱۶۱۸۶ گرم) در دمای ۷۷ درجه کلوین (دمای نیتروژن مایع)، اندازه‌گیری می‌شود. به دلیل خروج گازهای اضافی موجود در نمونه، از فرایند گاززدایی با گاز نیتروژن استفاده می‌شود. پس از این عمل، به تدریج فشار گاز نیتروژن زیاد شده و حجم گاز جذب شده در هر مرحله، توسط دستگاه اندازه‌گیری می‌شود. میزان دفع گاز، با کاهش تدریجی فشار گاز اندازه‌گیری شده و در نهایت میزان گاز دفع و جذب شده توسط نمونه‌های بتونیت در دمای ثابت، روی یک نمودار رسم شده و اطلاعات لازم از آن استخراج می‌گردد.

۱۰-۲- فرایند گندله‌سازی

مخلوط‌سازی مواد شامل کنسانتره سنگ آهن با رطوبت نه درصد و یک درصد از بتونیت‌های مختلف مورد بررسی، با استفاده از دستگاه میکسر به مدت دو دقیقه انجام گرفت و در دیسکی به قطر ۰/۸۰ متر با زاویه ۴۵ درجه و سرعت ۲۵ rpm به گندله خام تبدیل شد که برای هر تست تولید گندله، ۶۰ کیلوگرم مخلوط (شامل کنسانتره، بتونیت و آب)، درون میکسر ریخته شده و با تنظیم میزان رطوبت نه درصد، ترکیب مواد انجام شد. بعد از انتقال مواد به نوار نقاله، فرایند گندله‌سازی شروع شده که قبل از شروع فرایند، لازم است دیسک به‌طور کامل مرطوب شود تا کنسانتره‌های ورودی به دیسک، امکان تشکیل جوانه گندله را داشته باشند. در جدول (۳)، مشخصات کنسانتره مصرفی آورده شده است.

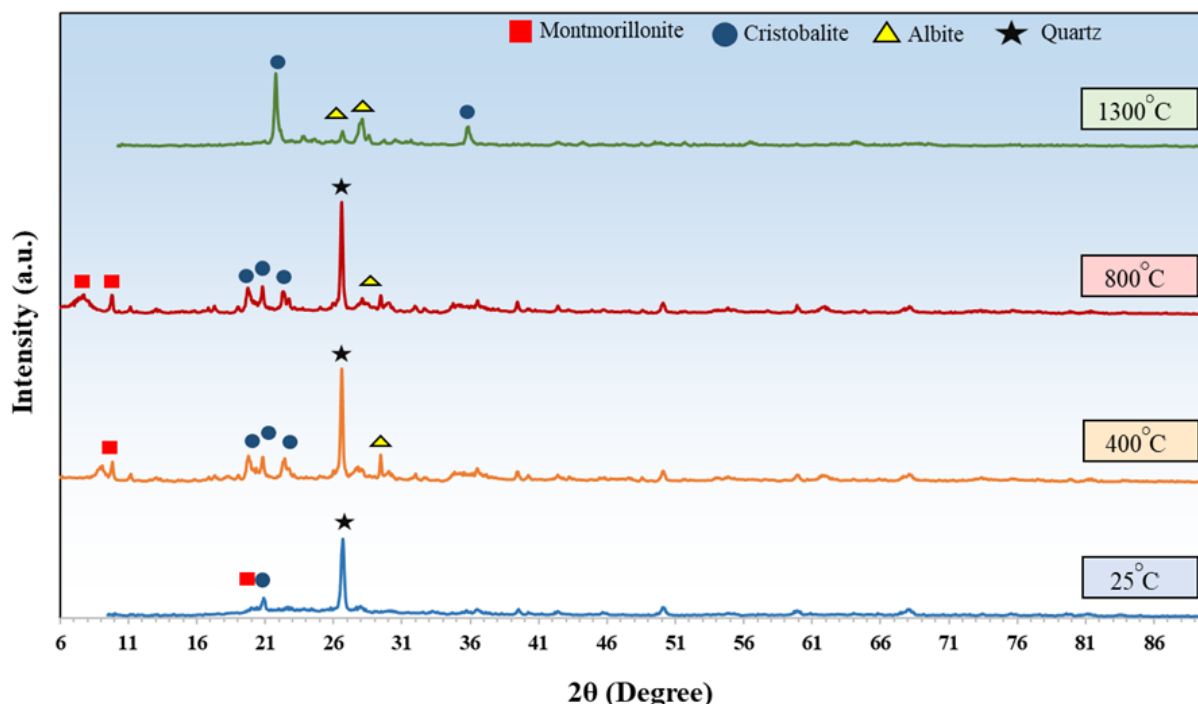
در بازه زمانی مختلف از دیسک گندله‌سازی، نمونه گرفته

می‌دارد که کاهش مذکور با سطح موج دوم گرماگیر نسبت عکس دارد. بتونیت با جذب رطوبت و ترکیب آن در ساختار مولکولی اجزا، بستری به وجود می‌آورد که منجر به ایجاد تورم در گندله و همچنین ایجاد اتصال محکمی بین ذرات می‌گردد که استحکام گندله، به شکل بستر ایجاد شده و توزیع ذرات بتونیت بستگی دارد. با افزایش بتونیت در بار گندله، عدد افتادن، استحکام گندله تر و خشک افزایش می‌یابد. فعال‌سازی حرارتی بتونیت از طریق عملیات حرارتی می‌تواند فعالیت پوزولانی آن را افزایش دهد که به نوبه خود، مقاومت فشاری ماده را افزایش داده و مشکل کاهش مقاومت فشاری را برطرف می‌کند (۷). با این حال، مطالعات قبلی در مورد استفاده از بتونیت حرارت‌دیده، به عنوان افزودنی برای بتن، عمدتاً بر افزایش فعالیت پوزولانی آن از طریق عملیات حرارتی برای افزایش مقاومت فشاری متمرکز بوده و کمتر به اثرات عملیات حرارتی بر خواص بتونیت مورد استفاده در واحد گندله‌سازی می‌پردازد. مطالعات قبلی نشان داده است که فاز مونت‌موریلونیت، زمانی که دمای عملیات حرارتی به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، شروع به از بین رفتن می‌کند. از بین رفتن فاز مونت‌موریلونیت، نشان‌دهنده از دست دادن خواص انبساطی در بتونیت است (۸). بتونیت تحت عملیات حرارتی، دگرگونی‌های فیزیکی و شیمیایی قابل توجهی را تجربه می‌نماید. این دگرگونی‌ها همراه با تغییرات آنتالپی بوده و عمدتاً به صورت واکنش‌های گرماگیر و گرماده بروز می‌کند (۱۰). تحلیل منحنی‌های گرماورزی و مشتق گرماورزی، حاکی از وقوع دو مرحله کاهش وزن مشخص در حدود ۱۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است که در شکل (۳) مشاهده می‌شود. حداکثر نرخ کاهش وزن، به ترتیب، در دماهای ۸۷ و ۶۶۳ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود. همچنین، منحنی‌های گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC) در شکل (۴)، پیک‌های گرماگیر تیزی را در نزدیکی دماهای ۸۷ و ۶۶۳ درجه سانتی‌گراد و پیک‌های گرماگیر پهن‌تری را در اطراف دماهای ۸۳۴ و ۱۱۲۹ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. با توجه به دماهای مربوط به این چهار پیک گرماگیر، می‌توان کل فرآیند واکنش را به چهار مرحله مجزا تقسیم نمود.

گندله‌های تولیدی با درصد یکسان از نمونه‌های بتونیت (یک درصد) پس از پخت، برای بررسی و مقایسه مقاومت فشاری گندله‌های پخته براساس استاندارد ISO4700، از طریق بار اعمال‌شده به‌طور یکنواخت و تدریجی بر تک‌تک گندله‌های مستقر بین دو سطح موازی اعمال و تا مرحله خردشدن، سنجیده شد. مجموعاً تعداد ۶۰ گندله، به صورت تکی تحت فشار قرار داده شد و استحکام آن‌ها به دست آمد. از آنجایی که ابعاد گندله‌ها متفاوت می‌باشد، نیروی لازم برای خردشدن آن‌ها نیز متفاوت خواهد بود که برای به دست آوردن میانگین استحکام گندله‌ها، تعداد ۶۰ گندله با میانگین اندازه بین ۰/۰۱-۰/۱۲۵ متر، در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفت و سپس میانگین استحکام فشاری آن‌ها تعیین شد.

۳- بحث و نتایج

بتونیت، به علت داشتن ترکیبات آلومینی و سیلیسی، ناخالصی‌های گندله را افزایش می‌دهد. از جهت دیگر با توجه به جدول (۳)، وجود عناصر قلیایی در روند احیا، موجب تورم گندله می‌شود. آب، بخش اصلی ساختار بتونیت است و در ساختار مونت‌موریلونیت به دو صورت مولکولی (H_2O) و گروه‌های هیدروکسید (OH)، وجود دارد که آب مولکولی در میان ذرات، حفرات، سطح ذرات و همچنین فواصل بین لایه‌ها وجود دارد که این آب، به وسیله گرما در فرایند پخت گندله صورت گرفته و در دمای ۲۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، آب بین‌لایه‌ای حذف می‌گردد و در دمای ۵۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، به تدریج حذف یون‌های (OH) رخ می‌دهد (۹). استحکام بتونیت با از دست دادن آب به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. محدوده حرارتی آب در منحنی گرماورزی، به عنوان اولین فعالیت گرماگیر در شکل (۳) ملاحظه می‌گردد. استحکام گندله خشک، متناسب با سطح اولیه موج گرماگیر منحنی گرماورزی برای بتونیت مورد بررسی قرار گرفته است (۲). سطح کوچک‌تر موج دوم گرماگیر، در دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، مربوط به کاهش یون‌های هیدروکسید است که استحکام گندله را کاهش و یا ثابت نگه



شکل ۵- الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه‌های بتونیت خام و عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف.

اما ساختار اصلی کریستالی مونت‌موریلونیت با وجود اعوجاج و پیچش لایه‌ها، همچنان حفظ می‌شود (۱۳).

در مرحله سوم (۸۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد)، شروع تجزیه ساختار کریستالی مونت‌موریلونیت و تشکیل فاز آمورف، منجر به ایجاد یک پیک گرماگیر در دمای ۸۳۴ درجه سانتی‌گراد می‌شود. در این دما، ساختار لایه‌ای اصلی مونت‌موریلونیت، برای تولید مونت‌موریلونیت بدون آب، از بین می‌رود.

در نهایت، در مرحله چهارم (۱۰۰۰-۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، تبدیل کوارتز به کریستوبالیت و ذوب آلینیت، منجر به ایجاد یک پیک گرماگیر در ۱۱۲۹ درجه سانتی‌گراد می‌شود. فرآیند گرمازای بعدی، ناشی از تبلور مجدد^{۲۰} فاز آمورف بتونیت است (۶). در شکل (۵)، تغییرات فازی بتونیت در دماهای مختلف ارائه شده است.

۳-۱- فازشناسی

فازهای نمونه بتونیت خام، با استفاده از آنالیز پراش پرتو ایکس که در شکل (۵) ارائه شده است، بیانگر فازهای اصلی آن یعنی

مرحله اول (۳۰-۴۰۰ درجه سانتی‌گراد)، خروج آب جذب‌شده و بین‌لایه‌ای روی سطح مونت‌موریلونیت با افزایش دما، منجر به ایجاد یک پیک گرماگیر در ۸۷ درجه سانتی‌گراد شده و باعث کاهش وزن قابل‌توجه در منحنی‌های گرماوژنی می‌گردد (۶). مقدار کاهش وزن در منحنی‌های گرماوژنی در این مرحله ۴/۲ درصد می‌باشد. این مقدار زیاد کاهش وزن، حاکی از دفع محتوای بالای آب جذب‌شده و بین‌لایه‌ای مونت‌موریلونیت و خروج سریع آن است (۱۱).

مرحله دوم (۴۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، تجزیه آب مولکولی مونت‌موریلونیت با افزایش دما و حذف دو گروه هیدروکسیل^{۱۹} در ساختار کریستالی به صورت یک مولکول آب، منجر به ایجاد یک پیک گرماگیر و کاهش قابل‌توجه وزن در نمودار شکل (۳) و در دمای ۶۶۳ درجه سانتی‌گراد می‌شود. کاهش وزن ناشی از حرارت در این مرحله ۱۲/۳۵ درصد می‌باشد. دمایی که در آن مونت‌موریلونیت، تحت واکنش آب‌زدایی قرار می‌گیرد که شاخصی برای ارزیابی پایداری حرارتی آن است (۶). اگرچه آب ساختاری در این مرحله حذف می‌شود،

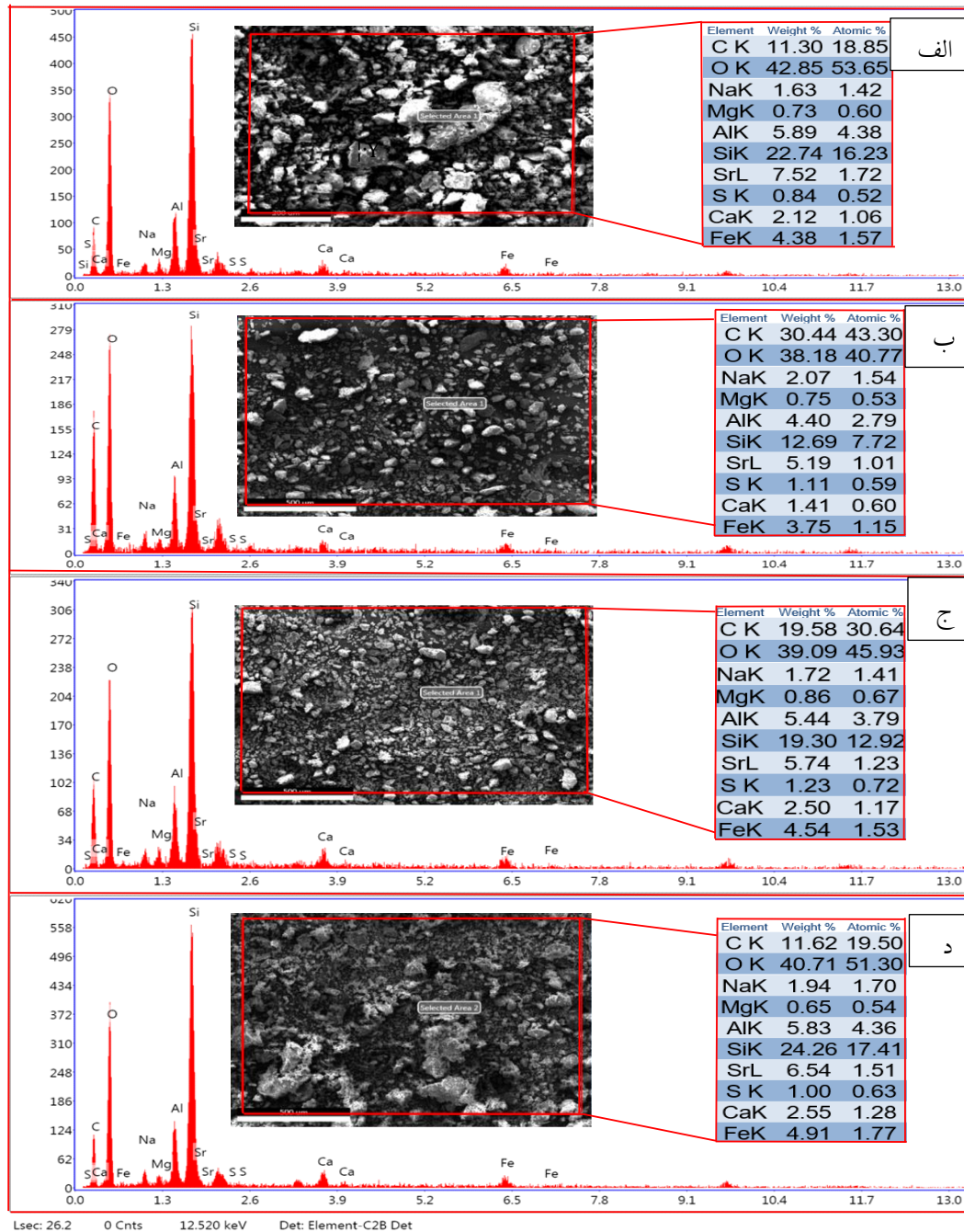
نقطه ذوب آن در حدود ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد است که در این دما شروع به ذوب شدن و تشکیل یک فاز آمورف می کند. بر اساس مطالعات اسلانی و همکاران (۱۲)، عملیات حرارتی روی مواد معدنی رسی، ساختار کریستالی آن ها را به یک فاز آمورف تبدیل می کند و به طور قابل توجهی فعالیت پوزولانی آن ها را افزایش می دهد. باین حال، بتونیت سدیمی رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. مقدار فاز آمورف در ابتدا با افزایش دما افزایش می یابد، اما در ادامه با گرمایش بیشتر، تحت تبلور مجدد قرار می گیرد که فعالیت پوزولانی بتونیت عملیات حرارت شده را کاهش می دهد (۱۳).

۲-۳- آنالیز تعیین پتانسیل زتا

پتانسیل زتا، نقش حیاتی در تعیین تمایل ذرات بتونیت در ته نشین شدن در محلول آبی ایفا می کند. ذرات کلوئیدی بتونیت به دلیل اندازه کوچک خود، تمایل کمی به ته نشینی دارند (۱۸). نیروی جاذبه و اندروالس بین این ذرات، موجب نزدیکی آن ها می شود (۱۹). تجمع این ذرات در کنار یکدیگر، سبب افزایش اندازه آن ها می گردد که به تبع آن، سرعت ته نشینی در داخل سیال را افزایش می دهد. افزایش پتانسیل زتا، تمایل ذرات برای ائتلاف را کاهش می دهد و در نتیجه، یک مخلوط سوسپانسیونی با مقادیر بالاتر پتانسیل زتا ایجاد می شود که در آن ذرات تمایل کمتری به ته نشینی دارند (۲۰). این مطالعه، پتانسیل زتا برای دو نوع بتونیت شامل بتونیت معمولی و بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد را مورد بررسی قرار می دهد. هدف از این بررسی، تحلیل رفتار این دو نوع بتونیت در محلول ها، pH، مختلف و ارزیابی تأثیر عملیات حرارتی بر ویژگی های سطحی و پتانسیل زتا آن ها می باشد. به منظور مقایسه بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد و بتونیت معمولی در شکل (۷) نمودار pH-Zeta، برای دو نمونه بتونیت معمولی و بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد آورده شده است. نمودارهای A، مربوط به تغییرات پتانسیل زتا در مقادیر pH مختلف برای نمونه بتونیت معمولی در محلول

مونت موریلونیت، کریستوبالیت، کوارتز و آلبيت است. بتونیت، عمدتاً از سیلیسیوم، آلومینیوم، آهن، کلسیم و عناصر دیگر تشکیل شده است که محتوای اصلی عناصر در جدول (۱) نشان داده شده است. در شکل (۶-الف) که مربوط به آنالیز عنصری ناحیه ای نمونه بتونیت خام می باشد، عناصر اکسیژن و سیلیسیم با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس در شکل (۵)، مربوط به عناصر اصلی کانی های سیلیکاتی مانند مونت موریلونیت، کریستوبالیت و کوارتز در نمونه بتونیت خام می باشد. در ادامه شکل (۶-ب تا د)، آنالیز عنصری ناحیه ای بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد ارائه شده است. با افزایش دما، تغییرات محسوسی در ترکیب عنصری بتونیت مشاهده می شود. بر اساس الگوی پراش پرتو ایکس در شکل (۵)، فازهای اصلی تشکیل دهنده بتونیت خام شامل مونت موریلونیت، کریستوبالیت و کوارتز می باشند. پس از عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتی گراد، مقدار مونت موریلونیت کاهش می یابد و فاز آلبيت نیز تشکیل می شود (۱۳). پس از رسیدن به دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد مقدار مونت موریلونیت کاهش می یابد و مقدار کریستوبالیت، آلبيت و کوارتز نسبتاً ثابت می ماند. تحلیل DSC در شکل (۳)، نشان می دهد که تجزیه مونت موریلونیت بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد رخ می دهد که مربوط به سومین پیک گرماگیر در منحنی DSC است

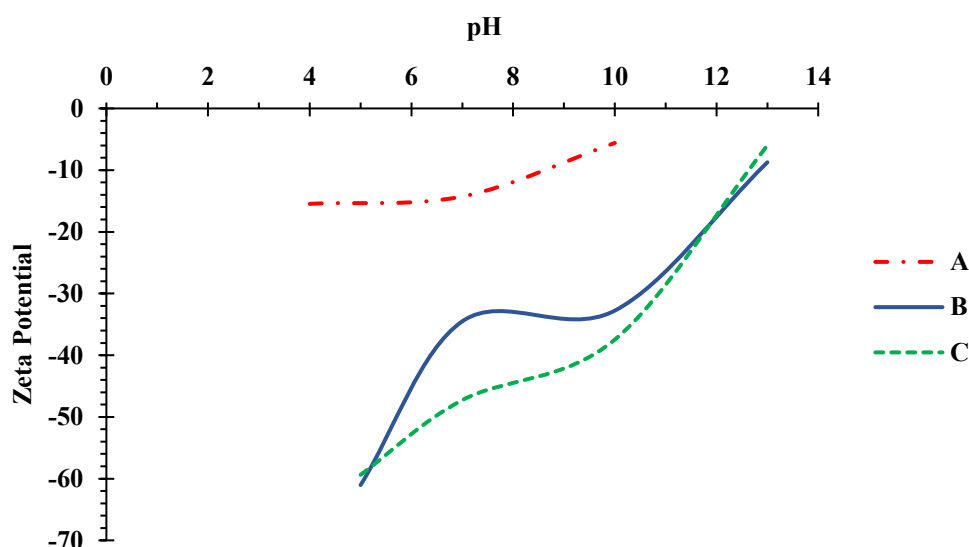
فرآیند تجزیه مونت موریلونیت، در ۸۳۴ درجه سانتی گراد آغاز می شود و در ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد به پایان می رسد. در ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد، پیک های مونت موریلونیت و کوارتز ناپدید می شوند و مقدار کریستوبالیت افزایش می یابد، در حالی که آلبيت و فاز آمورف کاهش می یابد. افزایش مقدار کریستوبالیت به دلیل تبلور مجدد فاز آمورف است (۱۴). طبق تحقیقات ژانگ و همکاران (۱۱)، تبلور مجدد بتونیت آمورف منجر به تشکیل سیلیکات منیزیم آلومینیوم ($MgAl_2Si_4O_{12}$) می شود که یک فاز شبه پایدار است که بیشتر به کریستوبالیت تجزیه می شود. ناپدید شدن کوارتز نیز نتیجه تبدیل آن به کریستوبالیت، تحت عملیات حرارتی در دمای بالا است. کاهش مقدار آلبيت، به دلیل



شکل ۶- آنالیز عنصری ناحیه‌ای نمونه‌ها، الف) بتونیت خام، ب) بتونیت پس از عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ج) بتونیت پس از عملیات حرارتی در ۸۰۰ سانتی‌گراد، د) بتونیت پس از عملیات حرارتی در ۱۳۰۰ سانتی‌گراد.

انتخاب NaOH، استفاده از آن در صنعت گندله‌سازی برای فعال-کردن بتونیت می‌باشد. با افزایش غلظت Na^+ ناشی از افزایش NaOH، برای بالابردن مقدار pH، بارسطحی ذرات بتونیت تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد (۱۵). به دلیل حضور یون‌های

بافر است. نمودارهای B و C، به ترتیب مربوط به تغییرات پتانسیل زتا در pH مختلف برای نمونه‌های بتونیت عملیات حرارتی شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و بتونیت معمولی در محلول آب مقطر و تنظیم pH با NaOH در pHهای مختلف را نشان می‌دهد. دلیل



شکل ۷- نمودارهای پتانسیل زتا برحسب pH برای نمونه بتونیت معمولی در محلول بافر (A)، بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد در محلول آب مقطر و NaOH (B) و بتونیت معمولی در محلول آب مقطر و NaOH (C).

نسبت به بتونیت خام است که این بهبود در ویژگی‌های پراکندگی، برای کاربرد بتونیت در ساخت گندله مطلوب ارزیابی می‌شود.

۳-۳- تغییرات مورفولوژی بتونیت عملیات حرارتی شده

مشاهدات میکروسکوپی طبق شکل (۸) نشان داد که بتونیت خام سبزرنگ در دمای محیط، با افزایش دمای عملیات حرارتی به ۴۰۰ درجه سانتی گراد، به رنگ قهوه‌ای، سپس در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد به رنگ صورتی و در انتها در دمای ۱۳۰۰ به قهوه‌ای کم‌رنگ تغییر پیدا می‌کند.

برای بررسی تغییرات مورفولوژی نمونه‌های حرارت داده - شده، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از نمونه‌های خام و حرارت‌دیده در شکل (۹-الف) نشان داده شده است. نفوذ، یک پدیده‌ی فعال- شونده با گرما است، بدین معنی که حرکت‌های اتمی به انرژی ویژه نیاز دارند. حرکت اتم، بستگی به این دارد که انرژی برابر یا بیشتر از انرژی فعال‌کننده کسب کند تا بتواند از وضعیت موجودش به یک مکان خالی (تهی‌جا) جابه‌جا شود. طبق نظریه

مثبت Na^+ ، بار سطحی منفی ذرات بتونیت خنثی شده است و باعث کاهش چگالی بار منفی شده که این امر منجر به افزایش پتانسیل زتا می‌گردد. در نمودار A، از محلول‌های بافر مختلف به جهت تنظیم pH استفاده شده که در جدول (۲) آورده شده است. همان‌طور که قابل مشاهده است، از pH ۴ تا ۷، تغییر محسوسی در پتانسیل زتا رخ نداده و با افزایش pH از مقدار ۷ تا ۱۰، پتانسیل زتا روند صعودی داشته است و وجود یون سدیم در محلول بافر بوراکس ($\text{pH}=10$)، باعث کاهش بار سطحی ذرات بتونیت شده و مقدار پتانسیل زتا را افزایش می‌دهد. مقایسه نمودارهای B و C، نشان می‌دهد که روند نمودار C، اکیدا صعودی بوده، درحالی- که نمودار B روند صعودی را نشان می‌دهد؛ این امر ناشی از کاهش حساسیت بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ نسبت به pH خنثی بوده و در بازه ۶ تا ۱۰ تقریباً بدون تغییر بوده است (۲۱). روند تغییرات پتانسیل زتا در نمونه بتونیت تیمار شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد نشان می‌دهد که این نمونه در مقایسه با بتونیت خام، حساسیت کمتری به تغییرات pH از خود نشان می‌دهد (رفتار خنثی). مقادیر بالاتر پتانسیل زتا در این نمونه، بیانگر تمایل کمتر آن به آگلومره شدن و ته‌نشینی



شکل ۸- تصاویر از نمونه‌های بنتونیت خام و عملیات حرارتی شده در دماهای مختلف.

است، اعمال عملیات حرارتی در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد منجر به ذوب قابل توجه ذرات بنتونیت شده است. این پدیده احتمالاً ناشی از ذوب فاز آلbite در این دما و به دنبال آن، چسبندگی ذرات بنتونیت و افزایش چگالی سطحی آن بوده است (۶). این تغییرات می‌توانند زمینه را برای تبلور مجدد در ساختار بنتونیت فراهم آورند (۲۴).

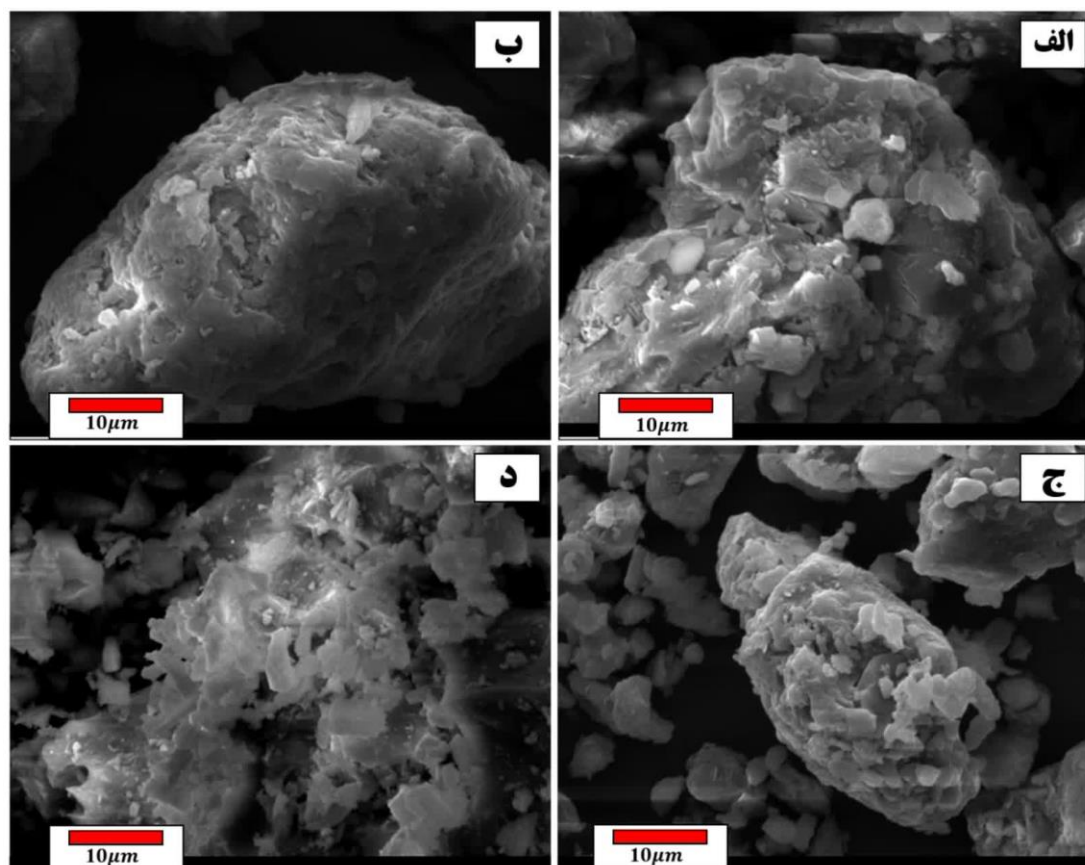
۳-۴- بررسی آنالیز BET

جذب فیزیکی گاز نیتروژن توسط نمونه‌ها در دمای ۷۷ درجه کلوین، با هدف اندازه‌گیری و بررسی حجم کل منافذ، سطح ویژه، حجم میکروحفرات، حجم مزوحفرات، میانگین قطر حفرات و سطح ویژه مزوحفره توسط آنالیز BJH بررسی شده است. لازم به ذکر است که با داشتن اطلاعات مربوط به حجم مزوحفرات و حجم کل منافذ در نهایت مقدار حجم میکروحفرات توسط رابطه (۲) محاسبه و در جدول (۴) نتایج آنالیز BET انجام شده روی نمونه‌ها گزارش شده است.

(۲) حجم مزوحفرات - حجم کل منافذ = حجم میکروحفره
شکل (۱۰)، منحنی جذب - واجذب فیزیکی گاز نیتروژن در دمای ۷۷ کلوین برای نمونه‌ها را نشان می‌دهد. این منحنی برطبق طبقه‌بندی IUPAC، از نوع IV می‌باشد که بسته شدن نمودار حلقه پسماند در فشار تقریبی $(\frac{P}{P_0})$ معادل ۰.۴، بیانگر حضور مزوحفرات کوچک است. در اینجا، P_0 و P به ترتیب فشار بخار نیتروژن مایع حجیم و فشار تعادلی واجذب در دمای نیتروژن مایع (۷۷ درجه کلوین) هستند. شعاع مزوحفره‌ها، با فرض

تفجوشی فاز جامد، برای پودر با افزایش دما و فعال شدن مکانیزم نفوذ ذرات گسسته میکروسکوپی اولیه، یک ساختار جامد پیوسته را تشکیل می‌دهند (۱۸). قبل از عملیات حرارتی، مورفولوژی ذرات بنتونیت دارای حفرات و منافذی بوده‌اند که با افزایش دمای عملیات حرارتی، باعث تغییر انرژی سطحی ذرات شده و در نهایت به ذوب شدن لبه‌های ذرات منجر گردیده است. افزایش دما و فعال شدن مکانیزم نفوذ، منجر به پرشدن منافذ بین-ذرات و کاهش تخلخل و ظاهر شدن مرزخانه‌های بین ذرات شد (۶). با افزایش بیشتر دمای عملیات حرارتی، اندازه مرزخانه‌ها به-تدریج افزایش یافت و باعث شد که بنتونیت متراکم‌تر شود و تبلور مجدد رخ دهد (۲۳). در دمای اتاق، بنتونیت خام هیچ پدیده تجمع ذرات آشکاری ندارد، همان‌طور که در شکل (۹-الف)، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان داده شده است، ذرات بنتونیت خام، دارای تجمع لایه‌های نامنظم با سطوح خشن آشکار در لبه‌ها می‌باشند.

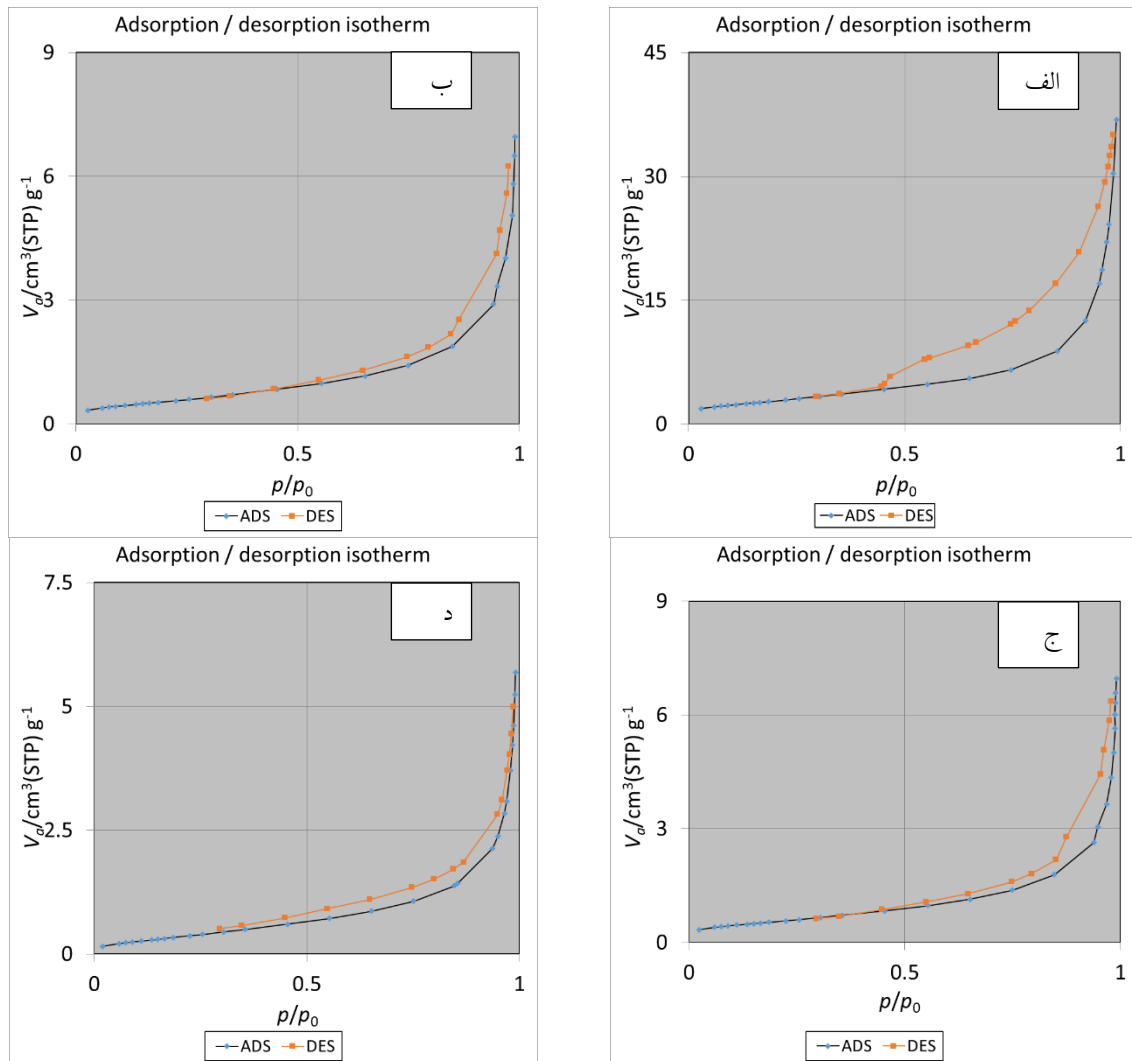
تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی در شکل (۹-ج)، مربوط به بنتونیت پس از عملیات حرارتی در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نشان می‌دهد لبه‌های ذرات بنتونیت به دلیل فرار آب ساختاری، دچار پیچیدگی ذرات شده است. در سطح ماکروسکوپی، رنگ بنتونیت به صورتی تغییر کرده و همچنین بنتونیت به صورت پودر باقی مانده است. به ظاهر لبه‌های ذرات بنتونیت ذوب شده‌اند و از طرفی پیچیدگی ذرات کاهش یافته و چسبندگی به دلیل ساختار لایه‌ای مونت موریلونیت مختل شده است و در سطح ماکروسکوپی به صورت تجمع بنتونیت ظاهر گردیده است. همان‌طور که در شکل (۹-د) نشان داده شده



شکل ۹- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با بزرگنمایی یکسان از (الف) بتونیت خام، (ب) بتونیت پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، (ج) بتونیت پس از عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد، (د) بتونیت پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد.

جدول ۴- نتایج آنالیز BET انجام شده روی نمونه بتونیت خام

نمونه	سطح ویژه کل	حجم کل منافذ	میانگین قطر حفرات	حجم مزوحفره	سطح ویژه مزوحفره	حجم میکرو حفره
واحد	m^2g^{-2}	$10^{-3} \times \text{m}^2\text{g}^{-2}$	$10^{-3} \times \text{nm}$	$10^{-3} \times \text{m}^2\text{g}^{-2}$	$10^{-3} \times \text{m}^2\text{g}^{-2}$	$10^{-3} \times \text{m}^2\text{g}^{-2}$
بتونیت خام	۱۰/۱۱۹	۰/۰۵۵۴۹	۲۱/۹۷۴	۰/۰۵۵۳۸۲	۱۱/۳۸۲	۰/۰۰۰۴۴
بتونیت عملیات حرارتی در ۴۰۰ درجه سانتی گراد	۱/۹۷۲۱	۰/۱۰۶۰۸	۲۱/۵۱۶	۰/۰۱۰۷۷۶	۲/۴۲۱	۰/۰۹۵۴۰
بتونیت عملیات حرارتی در ۸۰۰ درجه سانتی گراد	۱/۹۹۸۶	۰/۱۰۵۳۱	۲۱/۰۲۰	۰/۰۱۰۵۳	۲/۳۰۷	۰/۰۰۰۱۹
بتونیت عملیات حرارتی در ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد	۱/۳۷۲۲	۰/۰۰۸۶۲	۲۴/۴۷۲	۰/۰۰۸۵۲	۲/۰۴۶	۰/۰۰۰۲۴



شکل ۱۰- منحنی جذب و واجذب ایزوترم الف) بتونیت خام، ب) بتونیت پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد، ج) بتونیت پس از عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد، د) بتونیت پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد.

فشارهای نسبی پایین در ابتدای منحنی جذب، با افزایش فشار نسبی، مقدار جذب به سرعت افزایش می یابد که نشان دهنده پرشدن میکرو حفرات است (۲۱). با انجام عملیات حرارتی، منحنی جذب-واجذب مساحت این حلقه نسبت به نمونه خام کاهش پیدا کرده است و نسبت $(\frac{P}{P_0})$ ، به مقادیر کمتری تبدیل شده است. مقادیر سطح ویژه با انجام عملیات حرارتی کاهش پیدا کرده و همچنین در نمونه های عملیات حرارتی شده در دماهای ۴۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد، حجم مزوحفرات و همچنین سطح ویژه مزوحفرات، در مقایسه با نمونه خام کاهش

استوانه ای بودن آن ها و براساس مقادیر $(\frac{P}{P_0})$ ، با استفاده از معادله اصلاح شده کلون محاسبه شده اند. ایزوترم نوع IV در مورد جاذب های مزومتخلخل مانند اکسیدها، جاذب های صنعتی مزومتخلخل مشاهده می شود. رفتار جذب در مزوحفرات، با کمک برهمکنش های جاذب-جذب شونده و برهمکنش بین مولکول ها در حالت متراکم مشخص می شود. ناحیه کم شیب در میانه ایزوترم، بیانگر نخستین لایه ها است. برهمکنش میان سطح نمونه و جذب شونده نسبتاً قوی بوده و تخلخل آن به صورت مزومتخلخل (۲-۵۰ نانومتر) می باشد. افزایش سریع جذب در

پیدا کرده است (شکل ۱۰-ب و ج). با افزایش دمای عملیات حرارتی و شکل‌گیری پیوند بین‌ذره‌ای، باعث تحرک اتمی می‌شود که منجر به تغییرات عمده‌ای در ساختار حفرات در نمونه‌ها شده است.

افزایش تدریجی جذب در فشارهای نسبی متوسط، بیانگر این موضوع می‌باشد که پس از پرشدن میکروحفرات، افزایش جذب با شیب ملایم‌تری ادامه می‌یابد که مربوط به پرشدن مزوحفرات است. در فشارهای نسبی بالا، منحنی جذب به یک نقطه می‌رسد که نشان‌دهنده تکمیل‌شدن لایه‌های جذب روی سطح خارجی ذرات است. شکل منحنی پسماند در نمونه بتونیت طبق JUPAC، از دسته H3 می‌باشد که بیانگر مزوحفرات به‌صورت شکل تقریباً شیاری است که در تجمع غیرصلب ذرات صفحه-مانند، در نمونه‌های خاک رس نیز مشاهده می‌شود (۲۱).

حلقه پسماند در ایزوترم نوع IV، نشان می‌دهد که پرشدن و تخلیه مزوحفرات فرایندهای متفاوتی هستند. در هنگام جذب، مولکول‌های گاز ابتدا میکروحفرات را پر می‌کنند و سپس به تدریج مزوحفرات را پر می‌کنند. اما در هنگام واجذب، برخی از مولکول‌های گاز در مزوحفرات به دام می‌افتند و برای تخلیه کامل مزوحفرات، فشار کمتری نسبت به فشار جذب موردنیاز است. ایزوترم‌های نوع IV به‌طور معمول، برای مواد جاذب متخلخل با توزیع اندازه حفره‌های متنوع، مانند سیلیکاژل، ژئولیت‌ها و برخی از کربن‌های فعال مشاهده می‌شود (۲۱). هدف از ارزیابی ایزوترم جذب و واجذب نمونه‌ها برای تعیین مساحت سطح ویژه، حجم کل حفرات و توزیع اندازه حفره‌ها می‌باشد. نمودار توزیع اندازه شعاع حفرات در نمونه‌ها با استفاده از تئوری BJH در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که اندازه حفرات تا ۱۰۰ نانومتر گسترش یافته‌اند و با انجام عملیات حرارتی و فعال‌شدن مکانیزم نفوذ و انتقال مواد، منجر به تغییر توزیع اندازه حفرات نسبت به نمونه خام شده است.

موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور در چهار زمان مختلف، میزان جذب آب بتونیت براساس استاندارد ASTM E946-92 اندازه‌گیری شد. سیکل‌های زمانی به همراه درصد جذب آب در هر زمان، در جدول (۵) ارائه شده است که تغییرات جذب آب در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، میزان جذب آب در یک ساعت اول، بیشترین مقدار را دارد و بعد از یک ساعت با شدت کمتری درصد جذب آب افزایش پیدا می‌کند. میزان جذب آب در نمونه بتونیت عملیات حرارتی‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. با توجه به نتایج پراش پرتو ایکس در شکل (۵)، در دمای بالای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، فاز مونت‌موریلونیت شروع به تجزیه می‌کند و بر خواص بتونیت از جمله جذب آب آن تأثیر دارد (۷). همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، بیشترین درصد جذب آب مربوط به نمونه عملیات حرارتی، در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است، به‌طوری‌که یک سری ترکیباتی که آب‌دوستی را تغییر داده حذف شده‌اند. با افزایش دما به ۸۰۰ و سپس به ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، به‌علت ازبین رفتن فاز مونت‌موریلونیت، درصد جذب آب در این نمونه‌ها نسبت به نمونه خام و نمونه ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است.

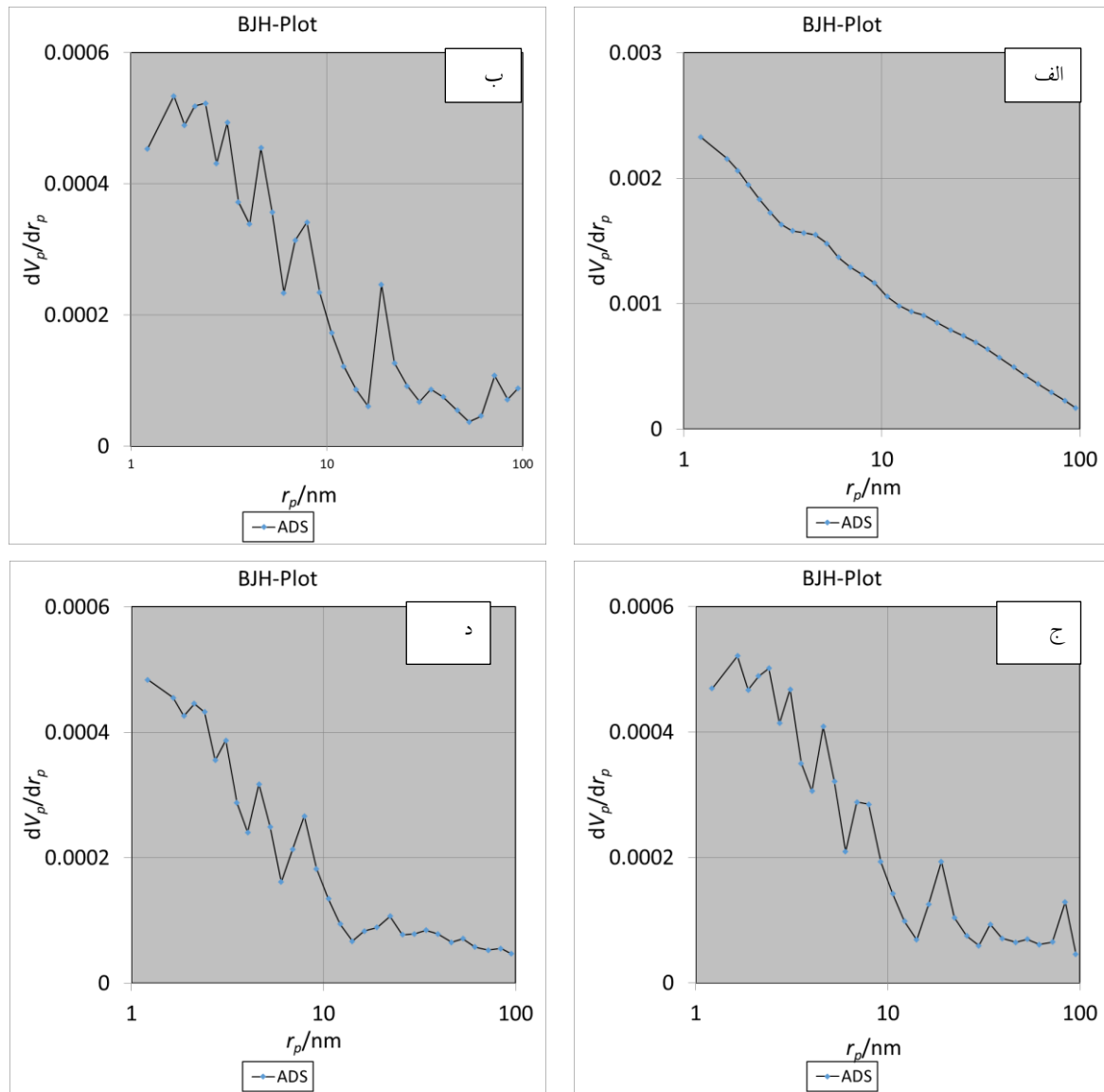
یکی از مهم‌ترین پارامترهای انتخاب بتونیت، میزان تورم‌پذیری آن است. جهت بررسی و مقایسه تورم‌پذیری نمونه‌ها از استاندارد ASTM D5890 استفاده شد. توجه به نتایج به‌دست‌آمده طبق جدول (۶)، بتونیت عملیات حرارتی‌شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، دارای بیشترین تورم‌پذیری می‌باشد که در مقایسه با بتونیت خام با انجام این سیکل عملیات حرارتی، خاصیت تورم‌پذیری بتونیت افزایش پیدا کرده است و در دماهای بالاتر عملیات حرارتی، خاصیت تورم‌پذیری بتونیت، به‌علت ازبین رفتن فاز مونت‌موریلونیت کاهش یافته است.

۳-۶- بررسی خواص گندله خام و پخته

گندله‌ها در حین حمل‌ونقل، خشک و سخت‌شدن در درجه حرارت بالا، باید بارهای مکانیکی قابل‌ملاحظه‌ای را تحمل کنند؛

۳-۵- بررسی خواص جذب آب و تورم نمونه‌های بتونیت

بررسی جذب آب نمونه‌های بتونیت در طی زمان‌های مختلف،



شکل ۱۱- نمودار توزیع اندازه شعاع حفرات الف) بتنویت خام، ب) بتنویت پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، ج) بتنویت پس از عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، د) بتنویت پس از عملیات حرارتی در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد.

جدول ۵- نتایج تغییرات جذب آب برای نمونه‌های بتنویت مورد بررسی در زمان‌های مختلف

درصد جذب آب				نوع بتنویت
۲۴ ساعت	۴ ساعت	۲ ساعت	۱ ساعت	زمان
۴۸۵	۴۲۰	۳۴۹	۳۶۵	بتنویت خام
۵۲۴	۴۴۳	۴۰۸	۳۷۹	بتنویت عملیات حرارتی ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد
۳۸۳	۳۱۴	۲۸۷	۲۴۴	بتنویت عملیات حرارتی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد
۱۳۸	۱۱۲	۸۴	۷۷	بتنویت عملیات حرارتی ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

جدول ۶- نتایج آزمون تورم برای نمونه‌های بتونیت موردبررسی

نوع بتونیت	میلی‌لیتر به ازای دو گرم بتونیت
بتونیت خام	۲۱
بتونیت عملیات حرارتی ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد	۲۴
بتونیت عملیات حرارتی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱۸
بتونیت عملیات حرارتی ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱۱

جدول ۷- نتایج خواص گندله خام و پخته نمونه‌های بتونیت موردبررسی

خواص	میانگین عدد افتادن	میانگین استحکام تر kg/pellet	میانگین استحکام خشک kg/pellet	انحراف معیار استحکام خشک
بتونیت خام	۲/۲	۰/۸	۲۶۱	۶۳
بتونیت عملیات حرارتی ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد	۳/۲	۱/۰۵	۲۸۲	۵۷
بتونیت عملیات حرارتی ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱/۸	۰/۸۳	۲۴۲	۶۱
بتونیت عملیات حرارتی ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد	۱	۰/۷۵	۲۳۱	۵۲

بنابراین باید مقاومت به سایش و استحکام کافی در برابر خردشدن را دارا باشند. در گندله مصرفی در روش‌های احیای مستقیم یا کوره بلند، در روند احیا تغییراتی به وجود می‌آید که ممکن است باعث خرد و متلاشی شدن گندله‌ها گردد؛ لذا بررسی خواص گندله‌ها، از نظر فیزیکی از اهمیت بالایی برخوردار است (۲). مهم‌ترین ویژگی مکانیکی گندله‌ها، استحکام آن‌ها است که برای بررسی تأثیر سیکل عملیات حرارتی بتونیت بر گندله‌های تولیدی از آن، خواص گندله خام و پخته بررسی و در جدول (۶) نتایج مربوط به آن آورده شده است. استحکام گندله خام، با انجام دو آزمون استحکام فشاری تر و عدد افتادن تعیین می‌گردد. عدد افتادن گندله خام، به‌طور جزئی در نمونه بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه خام افزایش یافته است. به‌طور کلی، عدد افتادن در گندله خام به رطوبت و مقدار بتونیت بستگی دارد که برای مقایسه بین نمونه‌ها این دو پارامتر در تولید گندله، یکسان در نظر گرفته شده است.

افزایش جزئی در عدد افتادن، می‌تواند ناشی از افزایش قفل مکانیکی ذرات باشد. به‌دلیل انتقال گندله‌های خام در نوار نقاله، تغییر شکل الاستیک گندله خام مهم می‌باشد (۱). افزایش ویسکوزیته چسب، سبب افزایش تغییر شکل الاستیک در گندله‌های خام می‌گردد. به‌دلیل این که مقدار بتونیت مصرفی در تمام نمونه‌ها یکسان است، در نتیجه می‌توان گفت که به علت تغییر در ویسکوزیته بتونیت ناشی از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، عدد افتادن گندله‌های خام تغییر کرده است. در جدول (۷)، استحکام فشاری تر برای گندله‌های خام نیز آورده شده است که استحکام گندله در حالت خام به دلیل وجود پیوند هیدرولیکی بین ذرات کنسانتره و بتونیت، می‌تواند با جذب آب به‌صورت یک ژل درآید و با زیاد شدن جذب آب، بتونیت عملیات حرارتی شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه بتونیت خام، حجم ژل بتونیتی را نسبت به دیگر نمونه‌ها افزایش می‌دهد. ذرات کنسانتره توسط ژل بتونیتی

و کوارتز کاهش و مقدار فاز کریستوبالیت افزایش می‌یابد، این فرآیند با کاهش جذب آب و تورم بتونیت همراه بوده و محدوده بهینه عملیات حرارتی بتونیت باید در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد.

۳- روند تغییرات پتانسیل زتا در نمونه بتونیت تحت عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، نشان می‌دهد که این نمونه در مقایسه با بتونیت خام نسبت به pH رفتار خنثی داشته و مقادیر بالاتر پتانسیل زتا در این نمونه بیانگر تمایل کمتر این نمونه به ته‌نشین شدن در محلول دارد.

۴- با افزایش دما، تغییرات قابل توجهی در مورفولوژی و رنگ بتونیت رخ داد. ابتدا رنگ سفید به قهوه‌ای و سپس به صورتی تغییر کرده و در نهایت در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد به رنگ قهوه‌ای کم‌رنگ درآمده است.

۵- مقادیر جذب آب و تورم در نمونه بتونیت عملیات حرارتی- شده، نسبت به دیگر نمونه‌ها بیشتر است و خواص نمونه نسبت به نمونه خام بهبود پیدا کرده است.

۶- عدد افتادن و استحکام فشاری تر و خشک گندله‌های خام و پخته تولیدشده با بتونیت عملیات حرارتی‌شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با نمونه بتونیت خام و دو نمونه دیگر (عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰ و ۱۳۰۰)، بیشتر بوده و عملیات حرارتی بتونیت در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به بهبود خواص گندله خام و پخته شده است.

تشکر و سپاسگزاری

تأمین کننده اعتبار پژوهشی این مقاله شرکت پایا صنعت سما بوده، در همین راستا از کمک‌های مهندس حسین مظاهری و در ضمن از پرسنل محترم فولاد سنگان خراسان و مهندس مهرشاد صفری (آراتل آفتاب) نیز تقدیر می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منافی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

پوشانده و از این طریق به یکدیگر پیوند داده و سبب استحکام می‌شود. تورم بتونیت ناشی از جذب آب و فاصله گرفتن لایه‌های بتونیت از یکدیگر کمک به افزایش استحکام در گندله می‌کند. نتایج آزمون تورم نشان می‌دهد که در نمونه بتونیت عملیات حرارتی ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، تورم بیشتر است که این موضوع تأثیرات مثبتی بر افزایش استحکام می‌گذارد.

استحکام فشاری تر گندله‌های خام با نمونه‌های بتونیت در جدول (۷) آورده شده است. مشاهده می‌شود که استحکام تر گندله خام با بتونیت عملیات حرارتی‌شده در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مراتب از نمونه‌های دیگر بیشتر است و گندله‌های تولیدشده با نمونه‌های دیگر عملیات حرارتی‌شده، استحکام کافی را ندارند. بتونیت‌های عملیات حرارتی‌شده در دمای ۸۰۰ و ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، به علت از بین رفتن ساختار مونت‌موریلونیت در این دماها، کاهش جذب آب و تورم این نمونه‌ها و همچنین ایجاد پیوند ضعیف‌تر هیدرولیکی، منجر به کاهش استحکام فشاری تر در گندله‌های خام تولیدی شده‌اند. بررسی استحکام فشاری گندله‌های پخته‌شده از نمونه‌های بتونیت مختلف، نشان می‌دهد که انجام عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد تأثیر به‌سزایی بر افزایش استحکام فشاری گندله پخته‌شده داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی و مطالعه تغییرات خواص فیزیکی-شیمیایی بتونیت ناشی از سیکل عملیات حرارتی و ارزیابی تغییرات خواص مکانیکی و فیزیکی گندله‌های خام و پخته‌شده انجام شده است که نتایج حاصل از این بررسی‌ها در ادامه به صورت خلاصه ارائه می‌گردد:

- ۱- تحلیل‌های حرارتی شامل TG و DSC، نشان دادند که با افزایش دما، مقدار قابل توجهی از آب بین‌مولکولی و ساختاری بتونیت حذف می‌شود. این فرآیند با دو مرحله کاهش وزن مشخص (در حدود ۸۷ و ۶۶۳ درجه سانتی‌گراد) ارتباط دارد.
- ۲- با افزایش دما تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، فاز مونت‌موریلونیت

سهم نویسندگان

تحلیل و تفسیر داده‌ها و نوشتن مقاله. ابوالفضل قدیری:
اعتبارسنجی نتایج. علی مظاهری: مدیریت منابع، راهنمایی پروژه.

علی میرزائی: طراحی و ایده‌پردازی مطالعه، جمع‌آوری داده‌ها،

واژه‌نامه

1. pelletizing
2. green pellet
3. colloidal
4. montmorillonite
5. feldspar
6. calcite
7. quartz
8. kaolinite
9. illite
10. van der Waals bonds

11. pozzolanic
12. amorphous
13. sintering
14. X-ray diffraction (XRD)
15. zeta potential
16. thermogravimetric (TG)
17. derivative thermogravimetric (DTG)
18. scanning electron microscope (SEM)
19. hydroxyl
20. recrystallization

مراجع

1. Zhu D, Pan J, Lu L, Holmes RJ. Iron ore pelletization. In: Iron Ore. Amsterdam: Elsevier; 2022. p. 539-578. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820226-5.00014-8>
2. Gladky A, Labra C, Stannarius R, Just S, Shinohara K. Numerical modeling of bulk flow on a pelletizing disc in different rotational regimes. Granul Matter. 2021;23(1):1-9. <https://doi.org/10.1007/s10035-021-01121-6>
3. Wang C, Zhang Z, Zhao J, Wang M, Ma B. Effect of organic binders on the activation and properties of indurated magnetite pellets. Int J Miner Metall Mater. 2021;28(1):45-52. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2055-7>
4. Barati S, Tabatabaie Shourijeh P, Samani N, Asadi S. Stabilization of iron ore tailings with cement and bentonite: A case study on Golgozar mine. Bull Eng Geol Environ. 2020;79(7):51-66. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01843-6>
5. Moraes SL, Baptista de Lima JR, Ribeiro TR. Iron ore pelletizing process: Iron ores and iron oxide materials. In: IntechOpen; 2018. p. 41-59. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73164>
6. Hai L, Wang J. Experimental study on the heat treatment reaction process of bentonite. Sci Rep. 2024;14(1):16-49. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67555-z>
7. Huang YF, Zhang YB, Han GH, Jiang T, Li GH, Yang YB, et al. Sodium-modification of Ca-based bentonite via semidry process. J Cent South Univ Technol. 2010;17(6):1201-6. <https://doi.org/10.1007/s11771-010-0619-9>
8. Sarikaya Y, Önal M, Baran B, Alemdaroğlu T. The effect of thermal treatment on some of the physicochemical properties of a bentonite. Clays Clay Miner. 2000;48(5):557-62. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2000.0480508>
9. Yilmaz G. The effects of temperature on the characteristics of kaolinite and bentonite. Sci Res Essays. 2011;6(9):1928-39. <https://doi.org/10.5897/SRE10.727>
10. Bayram H, Önal M, Yilmaz H, Sarikaya Y. Thermal analysis of a white calcium bentonite. J Therm Anal Calorim. 2010;101(3):873-9. <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0626-y>
11. Zhang Y, Ye W, Chen Y, Chen B. Thermal behavior analysis of two bentonite samples selected from China. J Therm Anal Calorim. 2015;101(3):1287-95. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7799-9>
12. Man X, Zhang X, Wang B. Study on influencing factors of sodium modification of bentonite. In: Proceedings of the 2016 5th International Conference on Advanced Materials and Computer Science (ICAMCS). 2016. p. 86-90. <https://doi.org/10.2991/icamcs-16.2016.45>
13. Hayakawa T, Nakaya M, Nishimoto S, Miyazaki T, Kohyama N. Preparation of sodium-type bentonite with useful swelling property by a mechanochemical reaction from a weathered bentonite. Appl Clay Sci. 2019;177:124-9. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.009>
14. Patel A, Hingston EDC, Demlie M. Investigation of the suitability of activated and nonactivated bentonites from the Imerys Mine (South Africa) for geosynthetic clay liners. S Afr J Sci. 2022;118(11):13-18. <https://doi.org/10.17159/sajs.2022/12566>
15. Fode TA, Jande YAC, Kivevele T. Effects of raw and different calcined bentonite on durability and mechanical properties of cement composite material. Case Stud Constr Mater. 2024;20:30-36. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03012>

16. Önal M, Sarıkaya Y. Thermal behavior of a bentonite. *J Therm Anal Calorim.* 2007;90(1):167-72. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7799-9>
17. Alkizwini RS, Alquzweeni SS. Modeling natural bentonite, thermal-modified bentonite, and iron-modified bentonite with artificial neural network, sorption kinetics and sorption isotherms for simulated sorption tetracycline. *Int J Environ Sci Technol.* 2021;18(9):2633-50. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03004-4>
18. Tong Y, Xu W, Jia Y, Gao C, Zhang Q. Experimental study on sodium modification and purification of GMZ bentonite. *Constr Build Mater.* 2023;383:130-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130060>
19. Abazarpour A, Halvaeian A, Shiri A, Mohseni M. Investigation of iron ore particle size and shape on green pellet quality. *Can Metall Q.* 2020;59(2):242-50. <https://doi.org/10.1080/00084433.2020.1730116>
20. Pousette H, Kojola N. Factors influencing physical and mechanical properties of direct reduced iron ore pellets. *Ironmak Steelmak.* 2024;51(4):214-20. <https://doi.org/10.1177/03019233241277422>
21. Mo W, Wan Y, Lu S, Zhou P, Chen Z. Optimization of the evaluation method for bentonite used in iron ore pelletizing. *Metall Mater Trans B.* 2024;55(5):3464-7 <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03187-y>