بررسی تأثیر افزودنی‌های قلیایی بر بهبود جذب آب بنتونیت‌های گندله‌سازی

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

۱- کارشناس ارشد، مهندسی معدن، شرکت پایا صنعت سماء، واحد پاسکو نکست

۲- کارشناس ارشد، مهندسی معدن، شرکت پایا صنعت سماء، واحد پاسکو نکست

۳- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، سرپرست پایلوت پلنت گندله‌سازی، شرکت پایا صنعت سماء

۴- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، مدیر شرکت پایا صنعت سماء

خلاصه

بنتونیت یکی از پرکاربردترین افزودنی‌ها در صنعت فولاد و گندله‌سازی می‌باشد. از قابلیت و قدرت چسبندگی بنتونیت به منظور ساخت گندله‌های آهن اسفاده می‌گردد، به عبارت دیگر بنتونیت نقش قابل توجهی در پارامترهای مقاومتی گندله (به صورت خام و پخته) ایفا می‌کند که با توجه به کاهش کیفیت بنتونیت‌ها لازم است با استفاده از افزودنی‌هایی میزان قدرت بنتونیت (میزات جذب آب) را بهبود بخشید. در این مطالعه هدف اصلی بهبود خاصیت جذب آب (بیش فعالی) بنتونیت‌های سدیمی و کلسیمی با استفاده از محلول‌های قلیایی سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات می‌باشد که از لحاظ کیفیت و میزان قدرت چسبندگی کاهش چشمگیری داشته‌اند. برای این منظور ۱۰ ترکیب با مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات ارائه شدند و میزان جذب آب بنتونیت برای کدام از از ترکیب‌های پیشنهادی اندازه‌گیری شدند. سپس بررسی نتایج جذب آب نشان دادند که هر دو افزودنی سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات به دلیل وجود یون سدیم Na^+ در ساختار خود، قابلیت افزایش جذب آب بنتونیت را تا حدود ۵۰۰ درصد در کمتر از یک ساعت دارند که از میزان جذب آب در ۲۴ ساعت هم بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است، بررسی نتایج نشان دادند که سدیم کربنات با مقداری کمتری می‌تواند نسبت به سدیم هیدروکسید میزان جذب آب بنتونیت را به طور چشمگیری در حدود یک ساعت افزایش دهد.

کلمات کلیدی: بنتونیت سدیمی، بنتونیت کلسیمی، درصد جذب آب، سدیم هیدروکسید ($NaOH$)، سدیم کربنات (Na_2CO_3).

۱.مقدمه

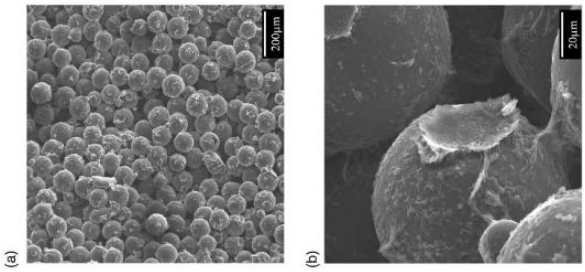
در حال حاضر در کشور ایران و سایر کشورهای دنیا تولید فولاد با استفاده از واحدهای گندله‌سازی به سرعت در حال گسترش است. به طور کلی ایده ساخت گندله زمانی به وجود آمد که برای تغلیظ کانی‌های فقیر آهن و کانی‌های حاوی ناخالصی‌های مضر مجبور شدند سنگ آهن را به اندازه‌های کمتر از میلیمتر خرد کنند. در این حالت، مقدار زیادی کنسانتره در اندازه‌های کمتر از ۱۰۰ میکرون ایجاد می‌شود که محققان زیادی بر روی این مسئله مطالعه نموده‌اند که کم و بیش به

[*]**Corresponding author: کارشناس ارشد، مهندسی معدن، شرکت پایا صنعت سماء، واحد پاسکو نکست**
Email: v.amirkiyaei@alumni.iut.ac.ir

یک روش مشابه رسیدند، که روش پیشنهادی همه آن‌ها تبدیل کنسانتره سنگ آهن به گندله می‌باشد. لذا تولید گندله‌های آهن، روش ایده‌آلی است که با توجه به اینکه از لحاظ اقتصادی و زمانی به صرفه‌تر از روش‌های دیگر می‌باشد، در اکثر واحدهای گندله‌سازی در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که به منظور ساخت گندله‌های آهن و چسبیدن ذرات به یک دیگر و رسیدن به مقاومت مطلوب، از بنتونیت در ساختار گندله‌ها استفاده می‌شود. بنتونیت به طورگسترده‌ای در گندله‌سازی سنگ آهن مورد استفاده قرار می‌گیرد به طوری که در صنعت گندله‌سازی به عنوان چسب اصلی به کار برده می‌شود. این ماده معدنی رسی به عنوان یک افزودنی، خواص مقاومتی را به گندله‌های آهن می‌دهد و همچنین دارای قیمتی پایینی می‌باشد و افزودن آن به ترکیب گندله‌های آهن باعث تغییرات عمده در رفتار متالورژی گندله‌ها نمی‌گردد. لازم به ذکر است که بنتونیت با جذب آب و پرکردن حفرات درون بافت گندله‌های آهن همانند یک ژل چسبناک عمل می‌کند و ذرات کنسانتره به یکدیگر متصل می‌کند. 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 به همین دلیل کاهش مصرف بنتونیت می‌تواند به شدت در فرآیند احیا مؤثر باشد. بنتونیت به طور عمده در دو نوع بنتونیت سدیمی یا وایومینگ[1] و بنتونیت کلسیمی یا مدیترانه[2] شناخته می‌شود که از این بین بنتونیت سدیمی نسبت به بنتونیت کلسیمی دارای جذب آب بالاتری بوده و به عنوان یک چسب مناسب تر در فرآیند گندله‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳–۱]. اما با این حال، به دلایل مختلف در برخی از کارخانه‌های تولید گندله این دو بنتونیت با یکدیگر ترکیب شده و این عمل خواص بنتونیت را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با توجه به کاهش عملکرد بنتونیت، می‌توان با استفاده فرآیند بیش‌فعالی، ساختار لایه‌های بنتونیت را فعال نمود و میزان جذب آن را تا حد قابل قبولی به منظور بالا بردن خاصیت جسبندگی آن، افزایش داد. به طور کلی بنتونیت با فرمول عمومی $(Na,Ca)(Al,Mg)(Si_4O_{10})_3(OH)_6nH_2o$ در دسته رس‌ها قرار دارد و کانی غالب آن مونتمورلونیت 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 مونتمورلونیت 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 قرار 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. به طور کلی یکی از مهترین موضوعاتی که در چند دهه اخیر، صنعت گندله‌سازی کشور با آن رو به رو شده است، کاهش چشمگیر کیفیت بنتونیت و کاهش جذب آب آن می‌باشد که این مشکل افزایش میزان بنتونیت مصرفی (به منظور افزایش مقاومت گندله‌ها) و افزایش میزان سیلیس در فرآیند ذوب را به همراه خواهد داشت که در نهایت مشکلات بسیار زیادی را در روند فولادسازی به وجود می‌آورد. لذا مطالعات مختلفی برای رفع این مشکل انجام شده است که برخی از این مطالعات به شرح زیر می‌باشند:

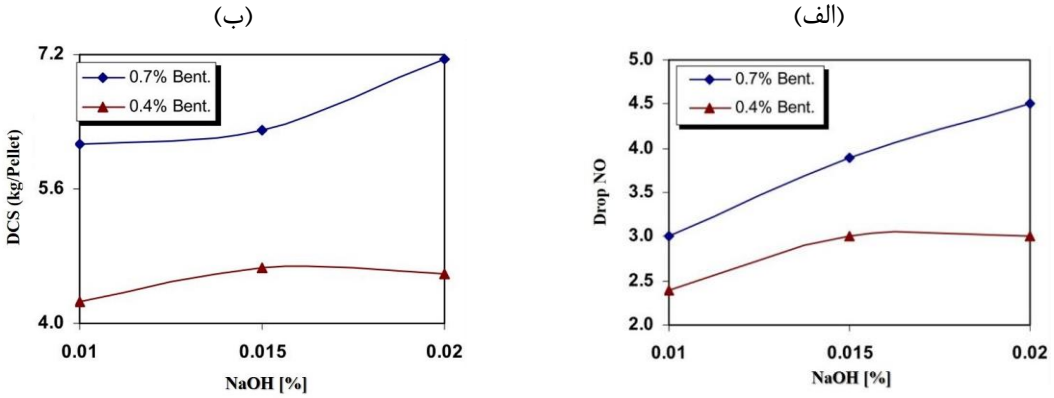
[1] sodium bentonite or Wyoming bentonite
[2] calcium bentonite or Mediterranean bentonite

کاواترا و همکاران در سال ۲۰۰۲، یک مکانیزم جدید و مهم اتصال بنتونیت را که باعث توسعه الیاف بنتونیت تحت نیروهای برشی ـ فشاری توسط آسیا غلطکی بود را شناسایی کردند و در نتیجه این مطالعات منجر به کاهش چسب از ۶ به ۳ کیلوگرم با استحکام بالای گندله شد [۴]. نتایج نشان می‌دهد زمان اختلاط در میکسر در استحکام گندله تاثیر ندارد و به ۳۰۰ ثانیه اختلاط معمولی نیاز بود تا استحکام مشابهی با ۱۰ بار عبور از آسیا (در ۵۰ ثانیه) از طریق فشار ـ برش افزایش یابد. هنگامیکه دانه‌های شیشه مانند[1] دارای سطح صاف و کروی (تشکیل شده از مخلوط چسب و آب) قبل از گندله شدن از آسیا عبور می‌کند، باعث پخش یکنواخت بنتونیت در سطح ذرات شده که این امر منجر به اتصال قوی‌تر، استفاده کارآمدتر از چسب و استحکام بالای گندله می‌شود که این توزیع یکنواخت در شکل یک قابل مشاهده می‌باشد.



شکل۱- توزیع بنتونیت روی سطح دانه‌های شیشه‌ای پس از فشرده‌سازی توسط غلطک در مقیاس‌های ۲۰ و ۲۰۰ میکرومتر [۴].

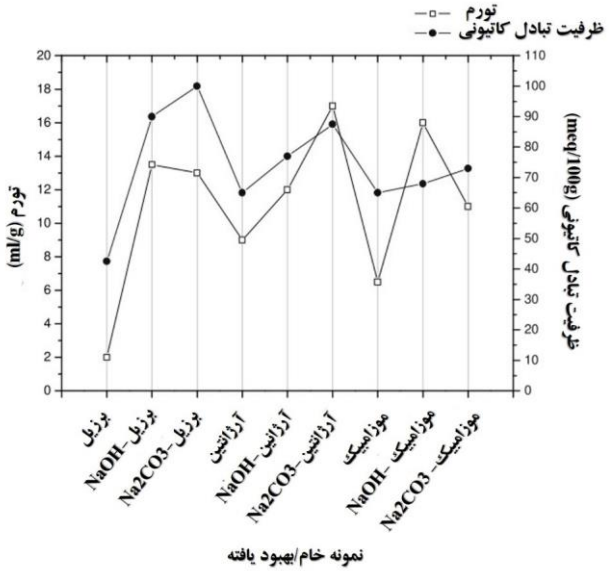
سعیدی و همکارانش در سال ۲۰۰۴ به بررسی تأثیر سدیم هیدروکسید بر فعال‌سازی بنتونیت و کاهش مقدار بنتونیت مصرفی در ساختار گندله پرداختند [۲]. آن‌ها در این مطالعه برای بررسی تأثیر سدیم هیدروکسید بر پارامترهای مقاومتی گندله، مقدار سدیم هیدروکسید را از ۰ تا ۰/۰۲ درصد وزنی تغییر دادند و روند تغییرات عدد افتان و گندله خشک را مورد ارزیابی قرار دادند. سپس بررسی نتایج آن‌ها نشان دادند که با افزودن ۰/۰۱۵ درصد وزنی سدیم هیدروکسید به ترکیب (برای ۰/۷ درصد وزنی بنتونیت)، مقادیر عدد افتان و مقاومت فشاری گندله خشک (در مقیاس پایلوت) به صورت چشمگیری افزایش یافتند. سپس در ادامه آن‌ها با توجه به فرآیند بیش‌فعالی بنتونیت توانستند با افزایش مقدار سدیم هیدروکسید به ۰/۰۲ درصد وزنی، میزان بنتونیت مصرفی را به ۰/۴ درصد کاهش دهند. همانگونه که در شکل ۱ قابل مشاهد می‌باشد، با کاهش میزان بنتونیت از ۰/۷ به ۰/۴ درصد وزنی مقادیر عدد افتان (شکل ۲-ب) و مقاومت فشاری گندله خشک (شکل ۲-الف) متناسب با استاندارد در بازه قابل قبولی قرار گرفتند.



شکل ۲: تأثیر تغییرات سدیم هیدروکسید و بنتونیت بر پارامترهای مقاومتی گندله خام [۲].
(شکل ۱-الف: تغییرات عدد افتان، شکل ۲-ب: تغییرات مقاومت فشاری گندله خشک)

[1] Shot glass

روزاریو و همکاران در سال ۲۰۱۰، عملکرد فرآیندهای قلیایی روی خواص ظرفیت تبادل کاتیونی(CEC) و تورم در سه نوع بنتونیت مختلف از برزیل، آرژانتین و موزامبیک را مورد مطالعه قرار دادند که این کار با فعالسازی‌های قلیایی با استفاده از واکنش‌های مکانیکی‌شیمیایی با محلول‌های NaOH و Na_2CO_3 برای افزایش میزان سدیم بنتونیت و در نتیجه بهبود خواص فوق انجام شد [۵]. نتایج نشان داد که وجود یون‌های سدیم رفتار CEC و تورم را به طور قابل توجهی تغییر می‌دهد و طبق شکل۳، فعال شدن با Na_2CO_3 ظرفیت تبادل رس طبیعی برزیل را دو برابر کرد در حالیکه فعال شدن با NaOH تقریباً ۷ برابر میزان تورم را افزایش داد اما با وجود دو برابر شدن میزان تورم برای بنتونیت‌های موزامبیک و آرژانتین، فعال‌سازی قلیایی بازده یکسانی برای رس‌های خارجی نشان نداد که نشان دهنده تأثیر روشنی از نوع رس و تغییرات آن است.



شکل۳- رفتار تورم و CEC برای نمونه های خام و رس بهبود یافته در ۳ نوع بنتونیت برزیل، آرژانتین و موزامبیک [۵].

فان و همکاران در سال ۲۰۱۱، به آزمایشات مختلفی بر عوامل موثر بر بازده پیوند بنتونیت حین گندله‌سازی و همچنین استفاده از یک چسب آلی برای کاهش مصرف بنتونیت پرداختند [۱]. خواص فیزیکی شامل جذب آب، شاخص تورم و ضریب قلیایی شاخص‌های مهمی برای کیفیت بنتونیت بوده و وقتی بنتونیت توسط Na_2CO_3 فعال شد، این خواص بهبود پیدا کردند. در نتیجه، مصرف بنتونیت از ٪۲ به ٪۱ کاهش یافت و با توجه به اینکه قابلیت تبادل Ca^{2+} همراه بنتونیت پایدارتر از Na^+ است، اما اگر Ca^{2+} با آنیون در محلول عمل کند رسوبی ایجاد می‌کند که می‌تواند غلظت Ca^{2+} را به شدت کاهش و بنتونیت سدیمی را افزایش دهد. به همین دلیل است که استفاده از NaF، Na_2CO_3 و NaOH در مقایسه با Na_3PO_4 یا NaCl اثر بهتری ایجاد کرده و نرم کردن آب با Na_2CO_3 کیفیت گندله‌های خام را بهبود می‌بخشد و با بهبود مخلوط مواد توسط سدیم کربنات، مقاومت فشاری گلوله‌های پخته شده از N/pellet ۱۴۰۵به ۲۵۳۴ افزایش می‌یابد.

اسماعیل زاده و همکاران در سال ۱۳۹۳ با آماده سازی گندله‌های خام تولیدی و اضافه کردن چسب جایگزین بنتونیت شامل سیلیکات سدیم (که به تنهایی نمی‌تواند گندله‌ای با خواص کیفی گندله‌های بنتونیتی ایجاد کند) در دیسک گندله‌سازی به انجام آزمون‌های تعیین استحکام تر و خشک و همچنین تعیین عدد افتان پرداختند [۶]. توزیع نامناسب ذرات بنتونیت در بین ذرات سنگ آهن یکی از علل اصلی عدم یکنواختی و ایجاد نوسان در کیفیت گندله تولیدی می‌شود. نتایج نشان

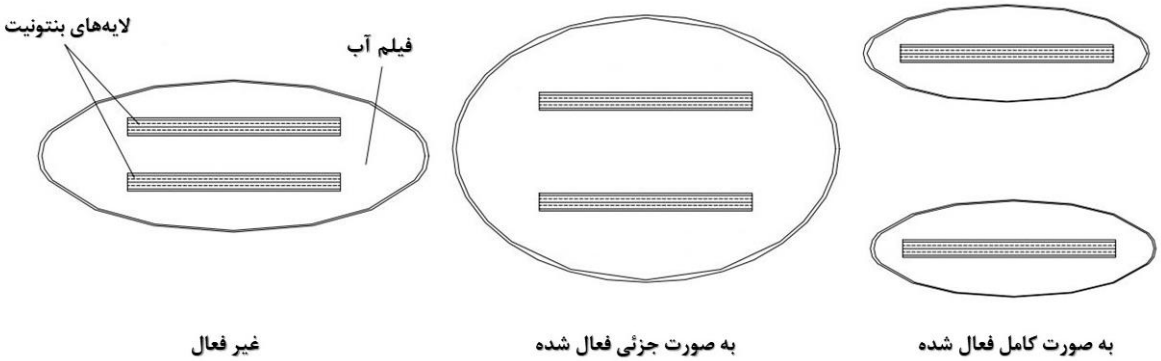
می‌دهد حضور سود در محلول سیلیکات سدیم توانسته به افزایش پلی‌سیلیکات‌های سدیم بر روی سطح ذرات کمک نماید، در نتیجه در محل تماس ذرات سنگ آهن مقدار بیشتری از ترکیبات پلی‌سیلیکاتی تجمع کرده و با ایجاد باندهای اتصال در مرحله پخت سبب کاهش مصرف بنتونیت (کاهش درصد FeO)، افزایش استحکام تر، خشک و عدد افتان گندله گردد.

گال و همکاران 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 [۳]. با توجه به اینکه بنتونیت‌های سدیمی به دلیل ظرفیت اتصال بالا، بیشتر برای گندله کردن کنسانتره سنگ آهن ترجیح داده می‌شوند و 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.

به طور کلی مطالعات انجام شده بر روی فعال‌سازی بنتونیت نشان می‌دهند که این فرآیند شامل واکنش تبادل یونی به شرح زیر است [۱,۲]:

$$Ca - Bentonite + NaOH/Na_2CO_3 = Na - bentonine + Ca(OH)_2)/CaCO_3$$

بنابراین فعال شدن بنتونیت[1] از دو دیدگاه بر ویژگی‌های بنتونیت تأثیر می‌گذارد که شامل تغییر در ظرفیت جذب آب و در نتیجه تورم بنتونیت و جداسازی صفحات بنتونیت از یکدیگر می‌باشد [۲]. لذا به منظور بررسی مکانیسم کیفیت گندله‌ها با عملکرد بیش‌فعالی این دو جنبه از رفتار بنتونیت باید مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در شکل۴ اثر فعال‌سازی در ساختار بنتونیت با استفاده از فعال کننده‌ها قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴- نمایش اثر فعال‌سازی بر ساختار بنتونیت [۲].

این پژوهش به منظور تکمیل مطالعات گذشته، به بررسی تأثیر محلول‌های قلیایی بر میزان جذب آب بنتونیت پرداخته است. بنابراین برای بررسی تغییرات میزان جذب آب بنتونیت دو افزودنی قلیایی سدیم هیدروکسید[2] و سدیم کربنات[3] مورد

[1] Hyperactivation
[2] Sodium hydroxide
[3] Sodium carbonate

استفاده قرار گرفتند که در بخش‌های بعدی روند انجام آزمایش و نتایج حاصل از تأثیر این دو افزودنی بر میزان جذب آب بنتونیت به طور کامل شرح داده شده است.

۲. مواد و روش

۱.۲. افزودنی‌ها

افزودنی‌های مورد استفاده در این تحقیق به منظور تغییرات جذب آب بنتونیت شامل ۲ نوع می‌باشد، که عبارتند از:

- سدیم هیدروکسید (NaOH)
- سدیم کربنات (Na_2CO_3)

۱.۱.۲. سدیم هیدروکسید (NaOH)

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 هیدروکسید بر روند جذب آب بنتونیت، ۵ ترکیب شدند، که در ادامه نتایج تأثیر سدیم هیدروکسید بر میزان جذب آب بنتونیت ارائه شده است. همچنین ترکیب‌های پیشنهادی سدیم هیدروکسید در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که میزان تغییرات سدیم هیدروکسید اضافه شده به منظور ارزیابی میزان جذب آب بنتونیت بر اساس نتایج پارامترهای مقاومتی به دست آمده از پایلوت پلنت ذوب آهن پاسارگاد می‌باشد.

جدول ۱- میزان تغییرات سدیم هیدروکسید برای بررسی تغییرات جذب آب.

کد ترکیب	سدیم هیدروکسید (گرم)	غلظت محلول (درصد)	درصد وزنی
T1	۰	۰	۰
T2	۰/۲	۱	۰/۰۳
T3	۱۰/۰۲	۵۰	۰/۰۳
T4	۲۰	-	۰/۰۳
T5	۳۵۷	-	۰/۵

۲.۱.۲. سدیم کربنات (Na_2CO_3)

سدیم کربنات دارای یک بنیان آنیونی ($CO3^{-2}$) و دو بنیان کاتیونی (Na^+) است. شکل‌های کریستالی این ماده به صورت مونو هیدرات، هپتا هیدرات و دکا هیدرات وجود دارد. مونو هیدرات آن دارای ۸۵ درصد وزنی سدیم کربنات بوده که به صورت کریستال های کوچک از کریستالیزاسیون محلول اشباع آن در دمای بالاتر از ۳۵ درجه سانتی گراد به دست می‌آید. هپتا هیدرات آن دارای ۴۵ درصد وزنی سدیم کربنات بوده که در دمای ۳۲ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید، و دکا هیدرات آن که washing soda نیز نامیده می‌شود، دارای ۳۷ درصد وزنی سدیم کربنات است و در دمای پایین تر از ۳۲ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آید. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر سدیم کربنات بر میزان آب‌گیری بنتونیت، ۵ ترکیب

ساخته شدند و میزان جذب آب بنتونیت مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، مقادیر پیشنهادی سدیم کربنات به همراه غلظت و درصد وزنی آن‌ها ارائه شده است.

جدول ۲- میزان تغییرات سدیم کربنات برای بررسی تغییرات جذب آب.

کد ترکیب	سدیم کربنات (گرم)	غلظت محلول (درصد)	درصد وزنی
T1	۰	۰	۰
T6	۰/۲	۱	۰/۰۳
T7	۱۰/۰۲	۵۰	۰/۰۳
T8	۲۰	-	۰/۰۳
T9	۳۵۷	-	۰/۵

۲.۲. روش انجام آزمایش

در این بخش روند انجام مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر دو افزودنی سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت شرح داده می‌شوند. در ابتدا به منظور بررسی تأثیر این دو افزودنی ۹ حالت (آب مقطر، ۴ حالت وزنی برای سدیم هیدروکسید و ۴ حالت وزنی برای سدیم کربنات) برای مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات در نظر گرفته شدند که در بخش بعدی جزئیات مقادیر وزنی این دو افزودنی مشخص شده‌اند. سپس در ادامه همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مقدار ۲ گرم بنتونیت بر روی هر کاغذ صافی ریخته شد و بر روی آجرهایی با جذب آب بالا درون هر محلول مشخص (محلول‌هایی با مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات) قرار داده شدند. لازم به ذکر است، جهت به حداقل رساندن خطا و افزایش دقت آزمایش‌ها، تا حد امکان بنتونیت‌ها بر روی کاغذهای صافی به صورت یکنواخت قرار داده قرار گرفتند و همچنین مطابق با استاندارد محلول‌ها تا ارتفاع یک سانتی‌متری لبه بالای آجر درون مخزن ریخته شدند. سپس ۴ سیکل زمانی (۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت) به منظور بررسی اثر افزودنی‌ها در زمان فعال‌شدن لایه‌های بنتونیت در نظر گرفته شدند. در نهایت پس از هر سیکل زمانی مقدار آب جذب شده توسط بنتونیت اندازه‌گیری شد و میزان تأثیر افزودنی‌ها بر مقدار جذب آب بنتونیت مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

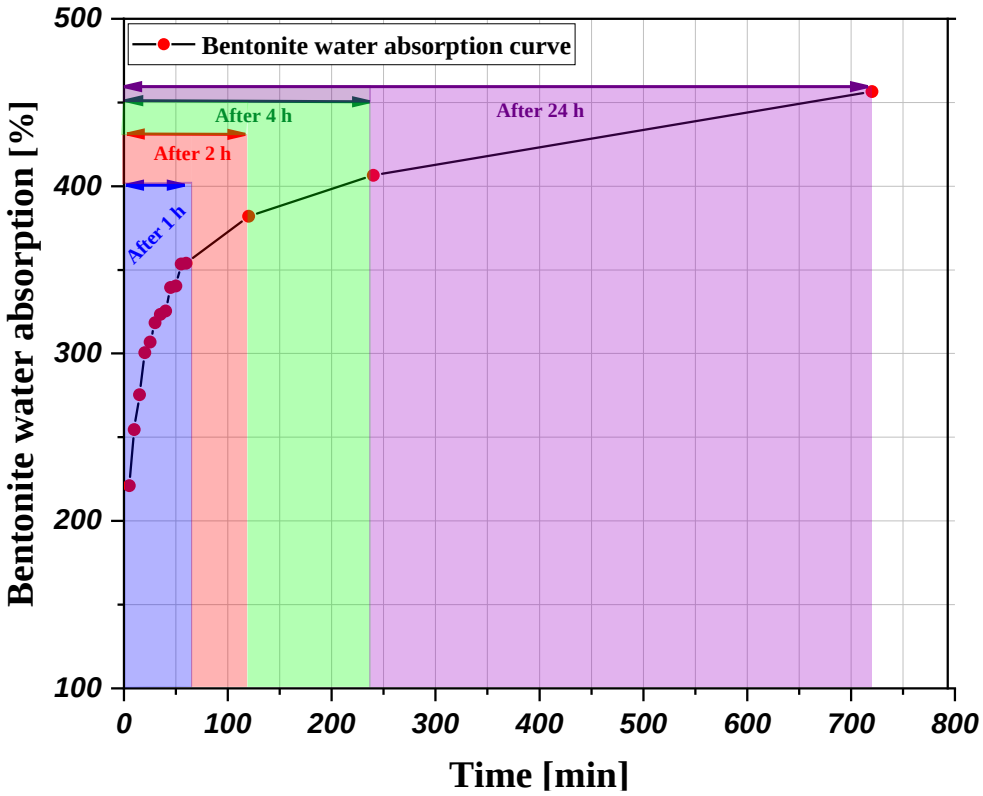
۳.بررسی جذب آب بنتونیت در طی زمان

در این بخش میزان جذب آب بنتونیت در طی زمان‌های مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور در ۱۵ سیکل زمانی میزان جذب آب بنتونیت بر اساس استاندارد ASTM E946-92 اندازه‌گیری شد، که سیکل‌های زمانی به همراه درصد جذب آب در هر سیکل در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین شکل ۵ روند تغییرات جذب آب را در طی سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میزان جذب آب بنتونیت در یک ساعت اول در حدود ۳۵۴ درصد است و بعد از یک ساعت با شیب ملایم‌تری درصد جذب آب افزایش پیدا می‌کند. این موضوع بیانگر این می‌باشد که بنتونیت در یک ساعت اول حدود ۷۸ رطوبتی که در ۲۴ ساعت جذب می‌کند، در ساختار لایه‌ای خود ذخیره می‌کند. به عبارتی دیگر نرخ جذب آب بنتونیت در سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۲/۴۲، ۰/۴۷، ۰/۲۰۵ و ۰/۱۰۵ می‌باشد که این مقادیر نشان می‌دهند که میزان جذب آب بنتونیت در سیکل زمانی یک

ساعت با سرعت چشمگیری افزایش می‌یابد و پس از آن با سرعت کمتری میزان جذب آب در ساختار بنتونیت افزایش پیدا می‌کند.

جدول ۳- میزان جذب آب بنتونیت در طی زمان.

وزن بنتونیت (g)	جذب آب (درصد)													
	بعد از ۵ دقیقه	بعد از ۱۰ دقیقه	بعد از ۱۵ دقیقه	بعد از ۲۰ دقیقه	بعد از ۲۵ دقیقه	بعد از ۳۰ دقیقه	بعد از ۳۵ دقیقه	بعد از ۴۰ دقیقه	بعد از ۴۵ دقیقه	بعد از ۵۰ دقیقه	بعد از ۵۵ قیقه	بعد از ۶۰ دقیقه	بعد از ۲ ساعت	بعد از ۴ ساعت	بعد از ۲۴ ساعت
۲/۰۰	۲۲۱	۲۵۴/۵۰	۲۷۵/۵	۳۰۰/۵	۳۰۷	۳۱۸/۵	۳۲۳/۵	۳۲۵/۵	۳۳۹/۵	۳۴۰/۵	۳۵۳/۵	۳۵۴	۳۸۲	۴۰۶/۵	۴۵۶/۵



شکل ۵- روند تغییرات جذب آب بنتونیت در طی زمان‌های مختلف.

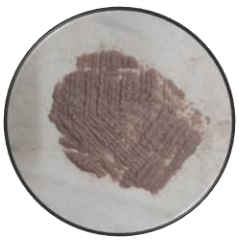
۴. بحث و بررسی

۱.۴. بررسی تأثیر سدیم هیدروکسید

به منظور بررسی تأثیر سدیم هیدروکسید بر میزان جذب آب بنتونیت، چهار ترکیب با درصد وزنی ۰/۰۳ درصد و چهار غلظت مختلف ساخته شدند که جزئیات مقادیر سدیم هیدروکسید در هر ترکیب در جدول ۱ ارائه شده است. سپس در ادامه چهار محلول با مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید ساخته شد و مطابق با استاندارد ASTM میزان جذب آب بنتونیت برای هر محلول در چهار بازه زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ اندازه‌گیری شد. نتایج تأثیر سدیم هیدروکسید بر میزان جذب آب بنتونیت در بازه‌های زمانی مذکور در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین علاوه بر تغییرات عددی در میزان جذب آب بنتونیت، تغییرات ظاهری هم در زمان‌های مختلف ایجاد شد که این تغییرات ظاهری برای محلول‌های مختلف در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. بررسی بیشتر از نتایج تأثیر سدیم هیدروکسید نشان دادند که میزان جذب آب بنتونیت در ترکیب T4 نسبت به سایر ترکیب‌های پیشنهادی بیشتر بوده است. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، با افزایش سدیم هیدروکسید از ۰/۲ تا ۲۰ گرم، میزان جذب آب بنتونیت در هر چهار سیکل زمانی (۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت) به صورت چشمگیری افزایش داشته است. به عبارتی دیگر با افزایش مقدار سدیم هیدروکسید از ۰/۲ تا ۲۰ گرم، میزان جذب آب بنتونیت در ترکیب T4 (۲۰ گرم سدیم هیدروکسید در ۵ لیتر آب) نسبت ترکیب T1 (آب مقطر) برای سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت به ترتیب حدود ۶۰، ۶۴/۵، ۶۲/۵ و ۴۵/۵ درصد افزایش یافته است. همچنین لازم به ذکر است که افزایش بیش از حد سدیم هیدروکسید در ترکیب باعث تخریب لایه‌های موجود ساختار بنتونیت شده و میزان جذب را به صورت چشمگیری در سیکل زمانی کم کاهش می‌دهد. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌گردد، افزایش مقدار سدیم هیدروکسید تا ۴۰۰ گرم در ترکیب، باعث کاهش چشمگیر جذب آب بنتونیت می‌گردد، به طوریکه نسبت جذب آب بنتونیت برای ترکیب T5 (۴۰۰ گرم سدیم هیدروکسید) نسبت به ترکیب T1 (آب مقطر) برای سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۴۵/۸۷-، ۲۴/۹۵-، ۱۲/۰۸ و ۳۸/۶۲ درصد می‌باشد که این مقادیر نشان می‌دهند افزایش بیش از حد سدیم هیدروکسید در ترکیب میزان جذب آب بنتونیت را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که مقایسه تأثیر مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید در میزان جذب آب بنتونیت نشان می‌دهد که مقدار ۲۰ گرم سدیم هیدروکسید در ۵ لیتر آب (شبیه‌سازی با مقدار آب لازم برای تولید گندله در پایلوت)، باعث بیشترین مقدار جذب آب بنتونیت نسبت به سایر ترکیب‌های پیشنهادی می‌گردد. همچنین در شکل ۸ مقایسه‌ای از تأثیر مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید بر میزان جذب اب بنتونیت در سیکل‌های مختلف زمانی ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج تأثیر سدیم هیدروکسید بر میزان تغییرات جذب آب بنتونیت در طی زمان‌های مختلف.

کد ترکیب	وزن بنتونیت (g)	جذب آب (درصد)			
		بعد از ۱ ساعت	بعد از ۲ ساعت	بعد از ۴ ساعت	بعد از ۲۴ ساعت
T2	۱/۹۹	۳۸۶/۴۳	۴۰۲/۵۱	۴۰۷/۵۴	۴۶۴/۸۲
T3	۲/۰۳	۴۰۷/۳۹	۴۱۲/۸۱	۴۳۱/۵۳	۴۸۲/۲۷
T4	۲/۰۳	۴۹۳/۶۰	۵۱۳/۷۹	۵۳۴/۴۸	۵۷۱/۴۳
T5	۲/۰۱	۱۶۷/۱۶	۲۳۴/۳۳	۳۶۸/۶۶	۵۴۴/۲۸



نمونه **T1** بعد از ۲۴ ساعت

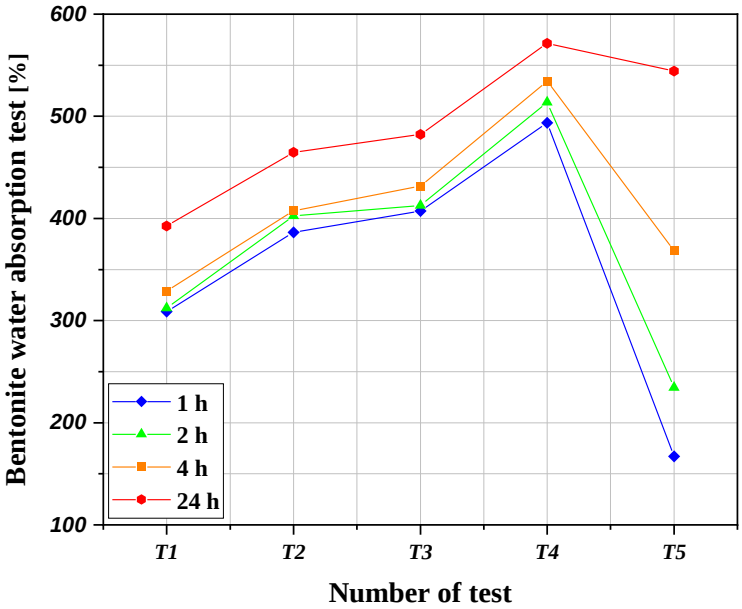
نمونه **T2** بعد از ۲۴ ساعت

نمونه **T3** بعد از ۲۴ ساعت

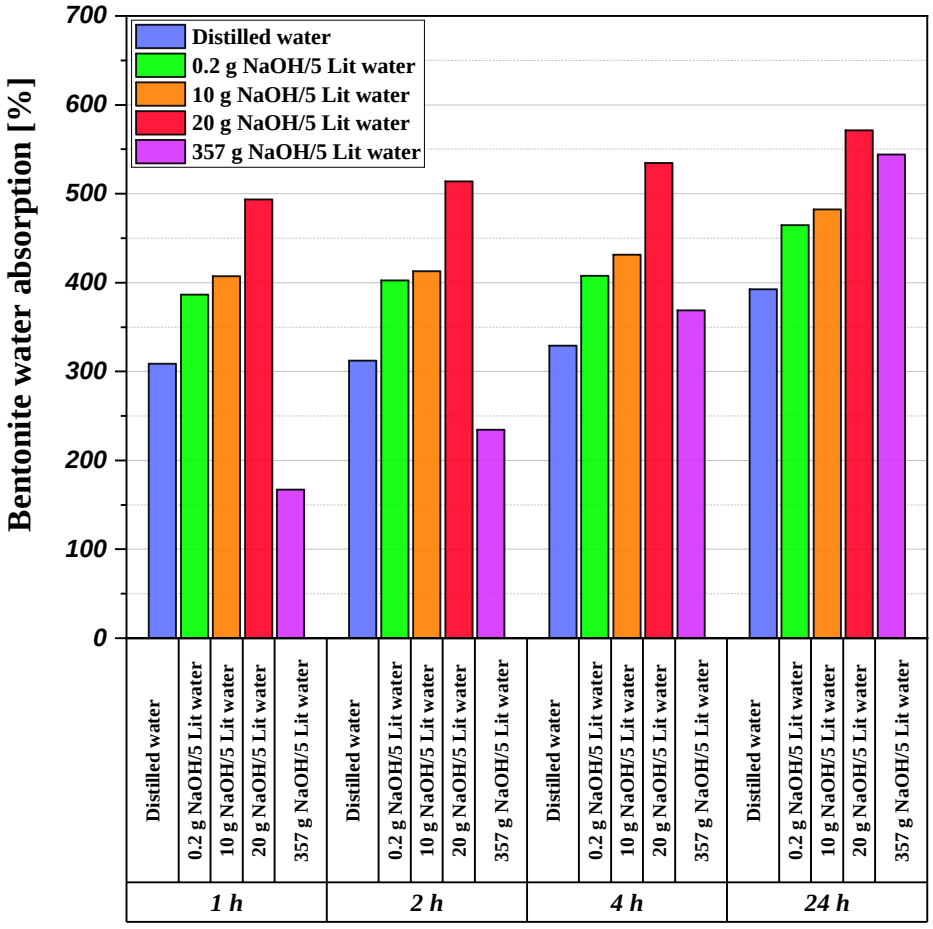
نمونه **T4** بعد از ۲۴ ساعت

نمونه **T5** بعد از ۲۴ ساعت

شکل ۶- تغییرات ظاهری بنتونیت در محلول‌های مختلف سدیم هیدروکسید بعد از ۲۴ ساعت.



شکل ۷- روند تغییرات جذب آب بنتونیت در ترکیب‌های مختلف سدیم هیدروکسید در چهار سیکل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت.



شکل ۸- مقایسه تغییرات جذب آب بنتونیت در مقادیر مختلف سدیم هیدروکسید در چهار سیکل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت.

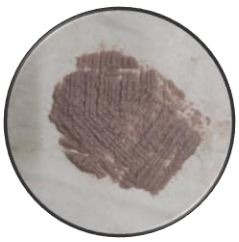
۲.۴. بررسی تأثیر سدیم کربنات

در این بخش به بررسی اثر سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت پرداخته شده است. برای این منظور مطابق با بخش قبلی ۴ ترکیب با مقادیر مختلف سدیم کربنات ساخته شدند و مطابق با استاندارد ASTM میزان جذب آب بنتونیت برای هر کدام از ترکیبات در چهار بازه زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شد. نتایج تأثیر سدیم کربنات بر جذب آب در در چهاربازه زمانی در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار اندازه‌گیری شده جذب آب بنتونیت نشان می‌دهند که بنتونیت در محلول T7 (۱۰ گرم سدیم کربنات در ۵ لیتر آب) بیشترین جذب را نسبت به سایر ترکیب‌های دیگر داشته است. همچنین تغییرات ظاهری حاصل در بنتونیت‌ها در محلول‌های مختلف سدیم کربنات در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش سدیم کربنات از ۰/۲ تا ۱۰ گرم، میزان جذب آب بنتونیت در هر چهار سیکل زمانی (۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت) به صورت چشمگیری افزایش داشته است و میزان جذب تا ۵۶۴ درصد رسیده است. به عبارتی دیگر با افزایش مقدار سدیم کربنات تا ۲۰ گرم، میزان جذب آب بنتونیت در ترکیب T7 (۱۰ گرم سدیم کربنات در ۵ لیتر آب) نسبت ترکیب T1 (آب مقطر) برای سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت به ترتیب حدود ۳۷/۵، ۴۴/۸۲، ۴۱/۲۲ و ۴۳/۷۷ درصد میزان جذب آب برای چهار سیکل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۴۲۴/۱۴، ۴۵۲/۲۱، ۴۶۴/۵۳ و ۵۶۴/۵۳ درصد می‌باشد) افزایش یافته است. همچنین اضافه کردن مقدار ۰/۲ گرم سدیم کربنات به ترکیب با عث افزایش چشمگیر در میزان جذب آب بنتونیت در زمان‌های بسیار کم می‌گردد. به عبارتی دیگر به عبارتی دیگر با اضافه کردن مقدار ۱۰ گرم

سدیم کربنات، میزان جذب آب بنتونیت در ترکیب T6 (۱۰ گرم سدیم کربنات در ۵ لیتر آب) نسبت ترکیب T1 (آب مقطر) برای سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۵۲/۱، ۵۴/۳، ۵۳/۷ و ۳۷ درصد (میزان جذب آب برای چهار سیکل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت به ترتیب برابر با ۴۶۹/۷، ۴۸۱/۸۲، ۵۰۵/۵۶ و ۵۳۷/۸۸ درصد می‌باشد) افزایش یافته است. مقایسه مقادیر جذب آب بنتونیت برای دو ترکیب T6 و T7 نشان می‌دهند که مقدار ۰/۲ گرم سدیم کربنات در ترکیب باعث افزایش جذب آب بنتونیت در سیکل‌های زمانی پایین می‌گردد و مقدار ۱۰ گرم سدیم کربنات در ترکیب در سیکل‌های زمانی بالاتر باعث افزایش میزان جذب آب در ساختار بنتونیت می‌گردد. همچنین مقایسه‌ای از نتایج تأثیر مقادیر مختلف سدیم کربنات در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت در شکل ۱۱ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین در بخش بعدی مقایسه از میزان جذب آب دو افزودنی سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات ارائه می‌گردد.

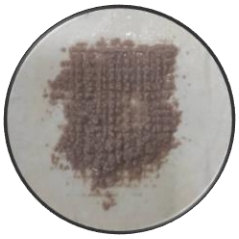
جدول ۵- نتایج تأثیر سدیم کربنات بر میزان تغییرات جذب آب بنتونیت در طی زمان‌های مختلف.

کد ترکیب	وزن بنتونیت (g)	جذب آب (درصد)			
		بعد از ۱ ساعت	بعد از ۲ ساعت	بعد از ۴ ساعت	بعد از ۲۴ ساعت
T6	۱/۹۸	۴۶۹/۷۰	۴۸۱/۸۲	۵۰۵/۵۶	۵۳۷/۸۸
T7	۲/۰۳	۴۲۴/۱۴	۴۵۲/۲۲	۴۶۴/۵۳	۵۶۴/۵۳
T8	۲/۰۲	۴۱۲/۸۷	۴۳۳/۱۷	۴۴۶/۰۴	۵۳۰/۲۰
T9	۲/۰۱	۴۰۵/۹۷	۴۴۵/۲۷	۴۸۱/۰۹	۵۲۱/۳۹


نمونه **T1** بعد از ۲۴ ساعت

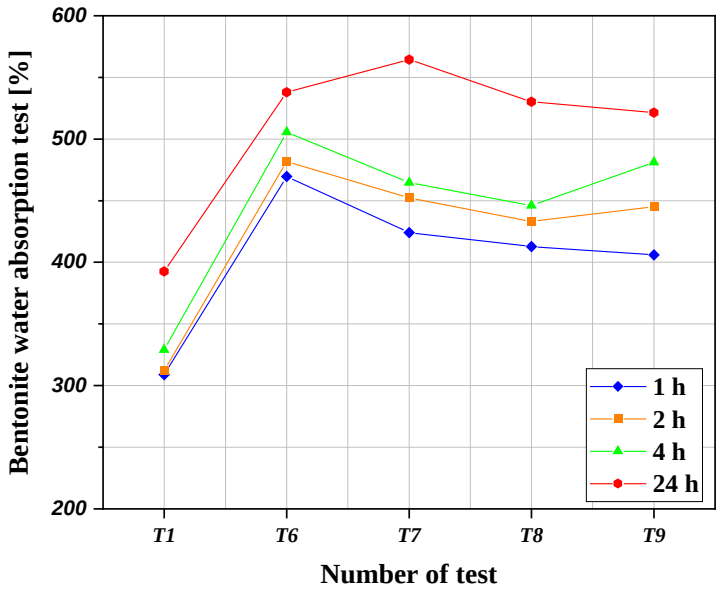
نمونه **T6** بعد از ۲۴ ساعت

نمونه **T7** بعد از ۲۴ ساعت

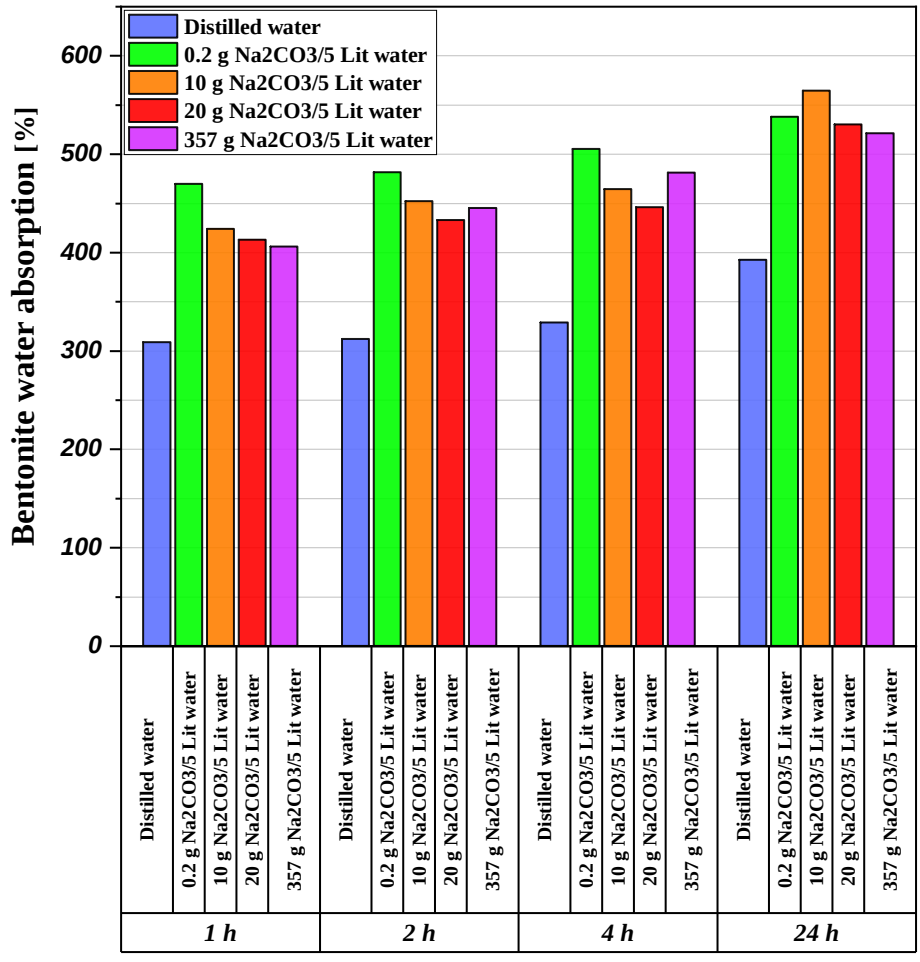

نمونه **T8** بعد از ۲۴ ساعت

نمونه **T9** بعد از ۲۴ ساعت

شکل ۹- تغییرات ظاهری بنتونیت در محلول‌های مختلف سدیم کربنات بعد از ۲۴ ساعت.



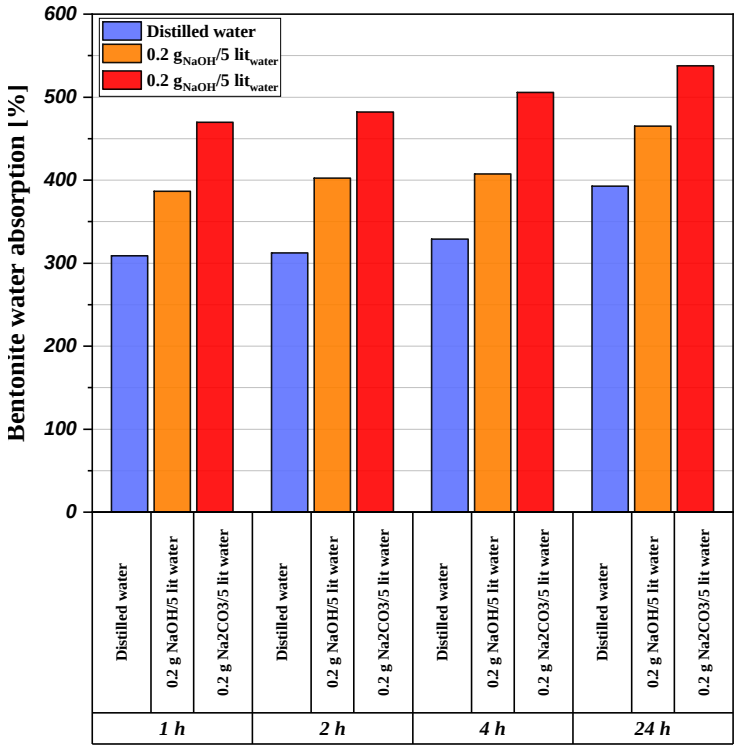
شکل ۱۰- روند تغییرات جذب آب بنتونیت در ترکیب‌های مختلف سدیم کربنات در چهار سیکل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت.



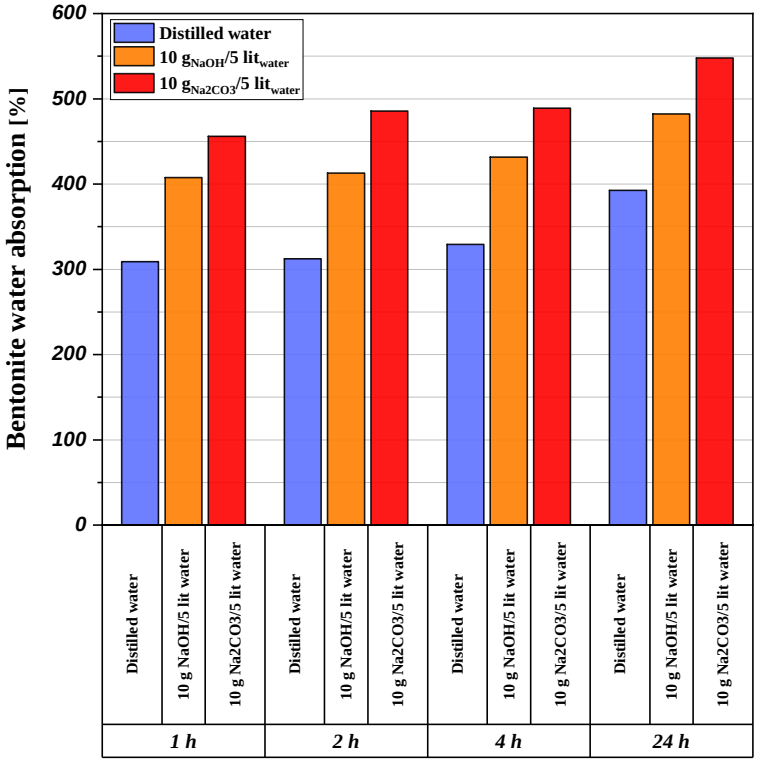
شکل ۱۱- مقایسه تغییرات جذب آب بنتونیت در مقادیر مختلف سدیم کربنات در چهار سیکل زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت.

۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

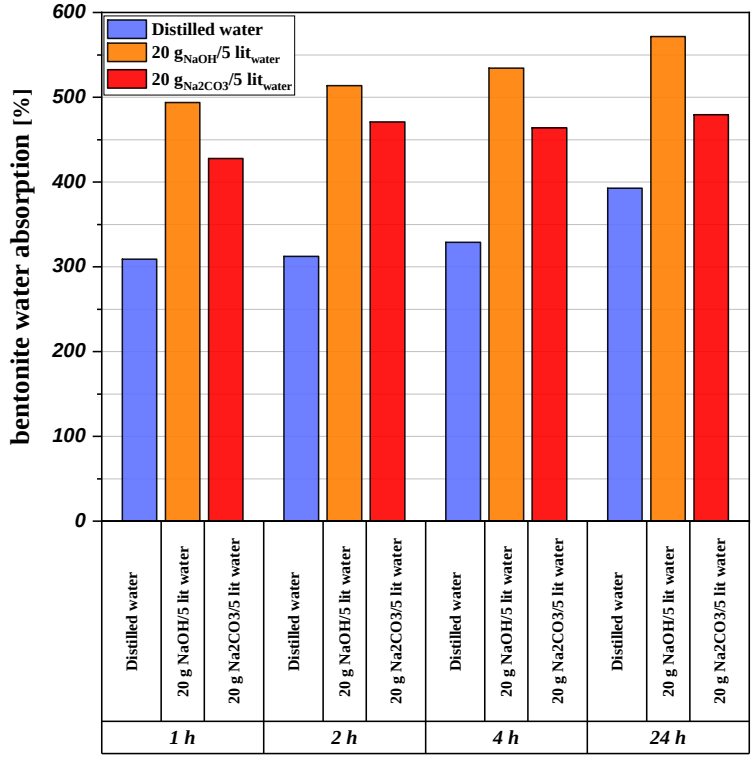
در این بخش نتایج مقایسه‌ای از تأثیر سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت ارائه می‌گردد. همانگونه که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود، در تمام سیکل‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت میزان جذب آب بنتونیت در محلول سدیم کربنات نسبت به محلول سدیم هیدروکسید برای مقادیر وزنی ۰/۲ و ۱۰ گرم نیز بیشتر است. همچنین شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بیانگر این هستند که وجود سدیم کربنات و سدیم هیدروکسید به مقدار یکسان در دو ترکیب با یک مقدار آب معین، می‌توانند جذب آب متفاوتی را برای بنتونیت ایجاد کنند. به عبارت دیگر سدیم کربنات نسبت به سدیم هیدروکسید برای مقادیر وزنی ۰/۲ و ۱۰ گرم، بیش‌فعالی بیشتری را در ساختار بنتونبت ایجاد می‌کند. همچنین با افزایش مقدار سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات در ترکیباب تا ۲۰ گرم، میزان جذب آب بنتونیت در محلول سدیم هیدروکسید نسبت به سدیم کربنات افزایش پیدا کرده و نسبت به سایر ترکیب‌های پیشنهادی میزان جذب آب بنتونیت در بازه‌های زمانی ۱، ۲، ۴ و ۲۴ ساعت افزایش می‌یابد که نتایج آن در شکل ۱۴ قابل مشاهده می‌باشد. لازم به ذکر است که افزایش بیش از حد سدیم سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات در ترکیب نه تنها جذب آب بنتونیت را افزایش نمی‌دهد، بلکه میزان جذب آب بنتونیت با حد زیادی کاهش می‌دهد که شکل ۱۵ نتایج حاصل از جذب آب بنتوینت در محلول‌های با غلظت بالای سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات (۳۵۷ گرم در ۵ لیتر آب معادل با آب مورد نیاز برای ساخت گندله در مقیاس پایلوت) در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد.



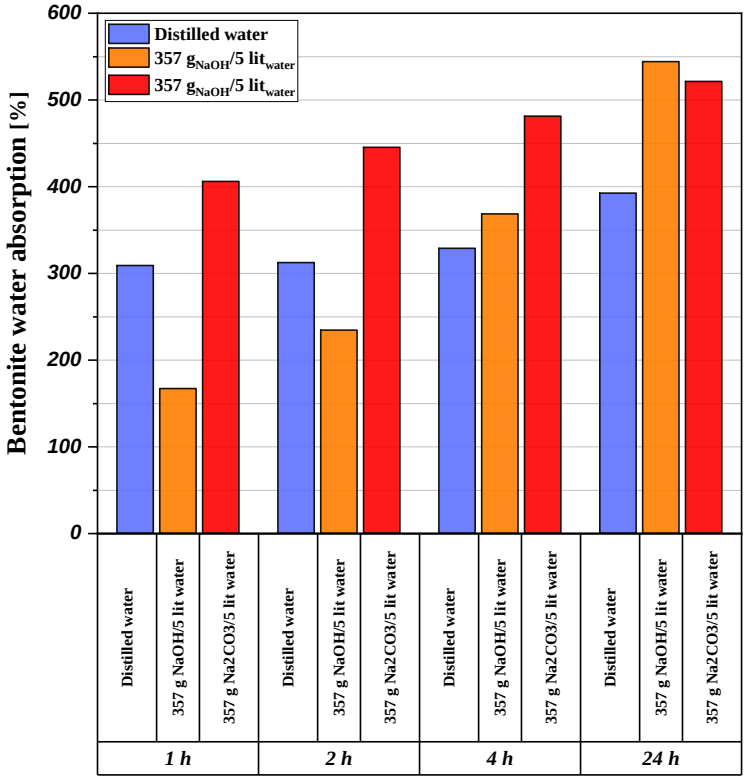
شکل ۱۲- مقایسه‌ای از تأثیر ۰/۲ گرم سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت.



شکل ۱۳- مقایسه‌ای از تأثیر ۱۰ گرم سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت.



شکل ۱۴- مقایسه‌ای از تأثیر ۲۰ گرم سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت.



شکل ۱۵- مقایسه‌ای از تأثیر ۳۵۷ گرم سدیم هیدروکسید و سدیم کربنات بر میزان جذب آب بنتونیت.

۶. مراجع

1. Fan, X. H., Gan, M., Jiang, T., Chen, X. L., & Yuan, L. S. (2011). Decreasing bentonite dosage during iron ore pelletising. *Ironmaking & Steelmaking*, *38*(8), 597-601.

2. Saidi, A., Shamanian, M., Barati, M., & Azari, K. (2004). Hyperactivation of bentonite in pelletizing process. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*, *1*(1), 38-41.

3. Gul, A., Sirkeci, A. A., Boylu, F., Guldan, G., & Burat, F. (2015). Improvement of mechanical strength of iron ore pellets using raw and activated bentonites as binders. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, *51*.

4. Kawatra, S. K., & Ripke, S. J. (2002). Effects of bentonite fiber formation in iron ore pelletization. *International journal of mineral processing*, *65*(3-4), 141-149.

5. Rosário, J. A., Silva, L. A., Moura, G. B. G., Gusatti, M., Lima, R. B., Brys, M. E., ... & Riella, H. G. (2010). Influence of Alkaline Activation Over Swelling and Cation Exchange Capacity on Bentonites. In *Materials Science Forum* (Vol. 660, pp. 1064-1069). Trans Tech Publications Ltd.

۶. اسماعیل‌زاده،محمد، موسی‌راد، مرتضی و ایران نژاد،احمد. "امکان سنجی استفاده از چسب های جایگزین بنتونیت به منظور افزایش خواص کیفی گندله"، ۱۳۹۳.