



Imam Khomeini International University
Vol. 10, No. 3, Autumn 2025



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Alkaline Roasting of a Red Mud–Sodium Carbonate Mixture After Milling

Niknezhad V.¹, Setoudeh N.^{2*}, Hayati R.², Pashangeh Sh.³

- 1- M.Sc Student, Dept. of Materials Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
2- Associate Professor, Dept. of Materials Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran
3- Assistant Professor, Dept. of Materials Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Received: 03 Jun. 2025

Accepted: 03 Sep. 2025

Abstract: After preparing a red mud sample from Iran Alumina Company (Jajarm) and determining its parameters, the chemical analysis and phase evaluations were undertaken using XRF and XRD methods. Mechanical milling of red mud-sodium carbonate mixtures was done for 15 minutes, 2 and 5 hours. STA analysis of the red mud sample and as-milled mixtures was undertaken under an air atmosphere up to 900 °C with a heating rate of 20 °C/min. The results showed the mass loss of red mud is about 13.25%, whilst it is in the range of 23-26% for milled mixtures. The alkaline roasting was done by heating the mixtures at the temperature range of 600-900 °C under an air atmosphere for one hour. The traces of NaAlO_2 , NaAlSiO_4 and NaFeO_2 phases were observed in the XRD patterns of the alkaline roasted samples. The signs of these phases were not observed in the milled mixtures of red mud-sodium carbonate; however the peak broadening and disappearing of the signs of sodium carbonate were the major events with increasing the milling time. Leaching of the alkaline roasted samples with water at 80 °C for 60 minutes resulted in the dissolution of NaAlO_2 phase, and the traces of this phase are not observed in the solid residues after leaching. The iron concentration was trace in the leached solutions by the AAS method. The results indicated that alkaline roasting of red mud with sodium carbonate, followed by dissolving the roasted solid products in water, makes it possible to separate the contained aluminium from iron and iron compounds.

Keywords: Bauxite, Bayer process, Mechanical milling, Red mud, Sodium Aluminate.

How to cite this article

Niknezhad, V., Setoudeh, N., Hayati, R., and Pashangeh, Sh. (2025). "Alkaline roasting of a red mud–sodium carbonate mixture after milling". Journal of Mineral Resources Engineering, 10(3): 93-112.

DOI: [10.30479/jmre.2025.22078.1737](https://doi.org/10.30479/jmre.2025.22078.1737)

*Corresponding Author Email: nsetoudeh@yu.ac.ir

COPYRIGHTS



©2025 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Red mud is the by-product of the Bayer process in the production of aluminium oxide (alumina) from bauxite resources. The red mud normally contains iron oxides, silicon oxide (silica), titanium dioxide, alkaline oxides such as Na_2O and CaO and rare earth compounds. The traces of radioactive elements and unreacted aluminium oxides with caustic soda during the Bayer process have been found in the red mud. The pH of red mud is in the range of 10-13, its colour is normally red, and the mean particle size of the dried red mud is less than $100\text{ }\mu\text{m}$ [1-4]. Based on the chemical composition of bauxite resources, nearly 1-2 metric tons of solid red mud are produced from the production of one ton of aluminium oxide [5]. Therefore, the recovery of valuable elements and compounds from red mud is important. Some processes, such as acid leaching (acid washing), solid-phase reduction magnetic separation, and calcification-carbonation methods, are proposed to recover iron and/or aluminium oxide (alumina) from red mud [3]. Some research articles have also recently been presented about the alkaline roasting process to recover alumina from bauxite residue or low-grade bauxite resources [6,7]. Sodium aluminate (NaAlO_2) is formed by reaction (1) with soda ash (sodium carbonate) in the alkaline roasting process [8]. The endothermic reaction (1) is thermodynamically feasible at temperatures above 800°C , and its theoretical mass loss due to the release of CO_2 gas is about 21.2% [8]. The produced phases, such as NaAlO_2 or $\text{Na}_{1.95}\text{Al}_{1.95}\text{Si}_{0.05}\text{O}_4$ from alkaline roasting of bauxite with Na_2CO_3 , can be dissolved in water [9,10].



It is very hard to find research articles about the alkaline roasting process in the milled mixtures of red mud with sodium carbonate (Na_2CO_3) as well as the phase changes in this process. The possibility to recover the contained aluminium oxide from red mud and convert it to a water-soluble phase such as sodium aluminate is also the main objective of this manuscript. The mechanically milled mixtures of red mud- Na_2CO_3 have been used for the alkaline roasting method, and the phase changes have been studied after heating the milled mixtures at different temperatures. The leaching of the roasted samples was performed in water, and the phase changes of the solid residues were also compared with roasted samples in this work.

METHODS

After preparing the red mud sample from Iran Alumina Company (Jajarm) and determining its pH, the sample was dried in an oven at 80°C for 96 h. The density, BET surface area, PSA (particle size analysis), and chemical analysis of the dried red mud were determined. Table 1 shows the chemical analysis of red mud using the XRF method. The total amount of iron in the red mud sample was determined to be 17.57% by the ICP-OES method. The mixtures of red mud-sodium carbonate (Na_2CO_3 , Merck grade) were prepared based on reaction 1 with the molar ratios of $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3 = 1:2$. The mechanical milling of the red mud- Na_2CO_3 mixtures was undertaken using a planetary ball mill (stainless steel cup/balls) with a BPR of 40:1 at different milling times (15 minutes, 2 and 5 hours). The STA analysis was done with a heating rate of $20^\circ\text{C}/\text{min}$ under an air atmosphere. The alkaline roasting process of the milled mixtures was undertaken at different temperatures ($600\text{--}900^\circ\text{C}$) for one hour under air atmosphere in a tube furnace. The solid products of the alkaline roasted samples were leached with hot water at 80°C for 60 minutes, then the solid residues of leaching were dried at 80°C in an oven for 2 hours. The concentrations of Fe and Al in the leached solutions were determined via the AAS method, and the XRD patterns of the solid products were prepared under Cu radiation. The thermodynamics assessments were undertaken using HSC software [8].

Table 1. The chemical analysis (in weight percent) of red mud using the XRF method

SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	MnO	P_2O_5	SO_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	SrO	ZrO_2	V_2O_5	L.O.I
15.15	18.14	17.84	1.16	4.61	0.08	0.72	< 0.01	22.38	5.52	0.79	0.05	0.1	0.09	13.37

FINDINGS AND ARGUMENT

The high pH of red mud in Table 2 is related to amounts of alkaline oxides such as Na_2O and CaO based on the XRF analysis in Table 1. The BET and PSA data in Table 2 indicate that the particle sizes of the red

mud are very fine. The signs of phases such as boehmite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), iron oxide (Fe_2O_3 , hematite), silica (SiO_2), Ca_2SiO_4 , CaCO_3 , Na_2O and TiO_2 have been detected in the XRD pattern of dried red mud.

Table 2. Data of pH, density, BET and PSA analysis of the red mud sample

D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	BET ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	pH
~1	4.25	12.54	7.5753	2.97	11.7

Figure 1 shows the XRD patterns of red mud- Na_2CO_3 mixtures after different milling times. The peaks of sodium carbonate (*JCPDS-84-0176*) are observed with high relative intensities in the 15-minutes milled mixtures; meanwhile, the signs of the boehmite phase (*JCPDS-21-1307*) at 14.5° , 28° and 45.8° , the hematite phase (*JCPDS-84-0311*) at $\sim 24^\circ$, 33.4° and 35.8° , and the traces of SiO_2 (*JCPDS-80-1288*) and CaCO_3 (*JCPDS-004-0637*) phases are also detected in this mixture. Most signs of Na_2CO_3 and boehmite phases disappear with increasing milling times to 2 and/or 5 hours, whilst the signs of the hematite phase (Fe_2O_3) at $\sim 24^\circ$, 33.4° and 35.8° are observed in the 2 h and 5 h milled mixtures. Peak broadening, decreasing in the relative intensities and disappearing of the softer phases are observed with increasing milling times in the milled samples. Figure 1 shows that these effects play significant roles in the softer phases (low Mohs hardness), such as boehmite and sodium carbonate (Na_2CO_3), compared to harder phases, such as hematite.

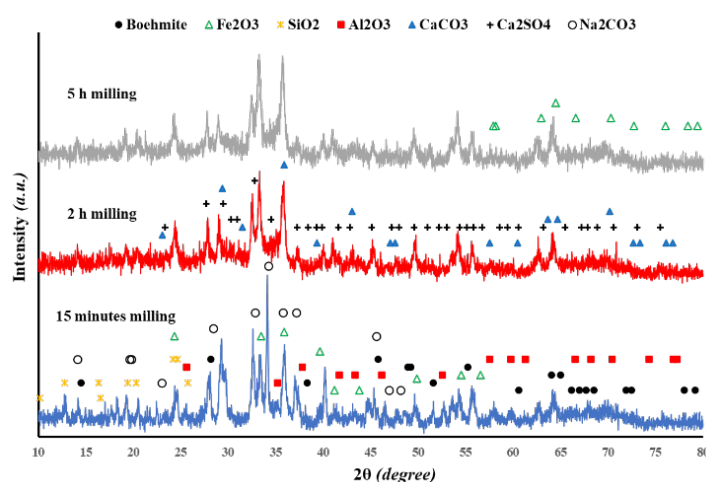


Figure 1. The XRD patterns of red mud- Na_2CO_3 mixtures after mechanical milling at different times

After roasting the milled mixtures of red mud- Na_2CO_3 at different temperatures (600 – 900°C) for 1 h under an air atmosphere, the roasted products were leached with hot water (80°C) for 60 minutes. Figure 2 shows the XRD graph of the alkaline roasted products in the 2 h milled mixture. The pattern of the dried solid residues after water leaching is also indicated in Figure 2. The signs of NaAlO_2 (*JCPDS-002-0999*), NaAlSiO_4 (*JCPDS-33-1203*) and NaFeO_2 (*JCPDS-30-1196*) phases are observed in the roasted sample at 800°C , and the signs of these phases are overlapped at $\sim 21^\circ$, 33° and 34° . The disappearance of the signs of NaAlO_2 phase and the phase changes in the ranges of 30 – 35° in the XRD graph of solid residues (Figure 2) indicate that the sodium aluminate phase (NaAlO_2) can be dissolved in hot water (80°C). The trace of the hematite phase at 33.5° and the signs of Ca_2SiO_4 and CaCO_3 phases indicate that these phases are not soluble in hot water. The previous research indicated that the acid washing (with HCl) process is not useful for separation of iron oxide from aluminum oxide (Al_2O_3) in the red mud sample [11]. The results of this work show that the water-soluble phase, such as NaAlO_2 , occurs in the alkaline roasting of red mud. This phase can be dissolved in hot water and separated from the iron oxide impurities of red mud.

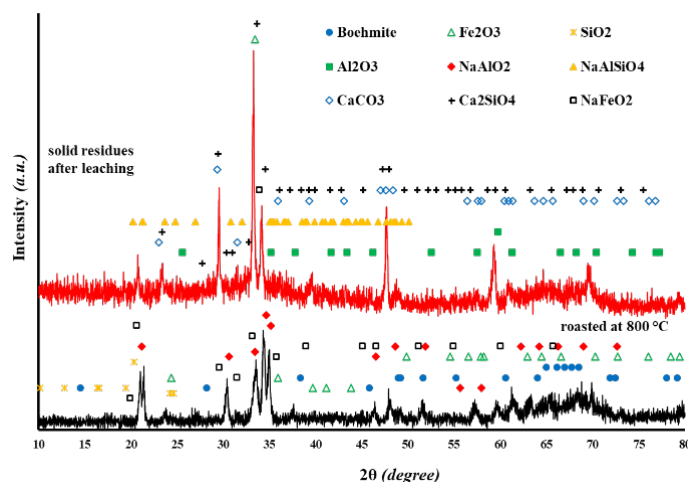


Figure 2. The XRD patterns of alkaline roasted products at 800 °C and solid residues after leaching in hot water (80 °C) in the 2 h milled mixture of red mud- Na_2CO_3

CONCLUSIONS

The chemical analysis using XRF and ICP-OES methods showed the high content of iron oxide (i.e., Fe) in the red mud sample. The high amount of pH in the red mud is related to the presence of high amounts of alkaline oxides such as Na_2O and CaO . The mass loss of red mud from STA analysis (TGA results) was about 13.25% at 900 °C whilst in the red mud- Na_2CO_3 mixtures, it was in the range of 23-26%. The peak broadening of the softer phases, such as boehmite, and the disappearance of the sodium carbonate (Na_2CO_3) were observed with increasing the milling time. The alkaline roasting process occurred after heating the milled mixtures, and the signs of NaAlO_2 , NaAlSiO_4 and NaFeO_2 phases were detected in the roasted samples. The leaching of the roasted samples with hot water (80 °C) for 60 minutes was useful to dissolve the sodium aluminate (NaAlO_2) phase, and the signs of this phase were not detected in the solid residues of the leached samples. The minor traces of iron concentration (Fe) in the leached solutions indicated that the alkaline roasting of red mud with Na_2CO_3 prevents iron compounds (such as iron oxide) from dissolving in hot water. Therefore, it is possible to separate the aluminium content of red mud from the other impurities (such as iron oxide) by the alkaline roasting process.

REFERENCES

- [1] Kumar, S., Kumar, R., and Bandopadhyay, A. (2006). "Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries". *Resources, Conservation and Recycling*, 48(4): 301-314.
- [2] Klauber, C., Gräfe, M., and Power, G. (2011). "Bauxite residue issues: II. options for residue utilization". *Hydrometallurgy*, 108: 11-32.
- [3] Li, X-F., Zhang, T-A., Lv, G-Z., Wang, K., and Wang, S. (2023). "Summary of research progress on metallurgical utilization technology of red mud". *Minerals*, 13(737): 1-31.
- [4] Al-Fakih, A., Mohamed Nor, Z., Inayath Basha, Sh., Nasiruzzaman Shaikh, M., Ahmad, Sh., Al-Osta, M. A., and AbdulAziz, Md. (2023). "Characterization and applications of red mud, an aluminum industry waste material, in the construction and building industries, as well as catalysis". *The Chemical Record*, 23: e202300039.
- [5] Mi, H., Yi, L., Wu, Q., Xia, J., and Zhang, B. (2022). "A review of comprehensive utilization of red mud". *Waste Management and Research*, 40(11): 1594-1607.
- [6] Tam, P. W. Y., Panyas, D., and Vassiliadou, V. (2019). "Sintering optimisation and recovery of aluminum and sodium from Greek bauxite residue". *Minerals*, 9(10): 571.
- [7] Khodadadi Bordboland, R., Azizi, A., and Khani, M. R. (2024). "Extracting alumina from a low-grade (Shale) bauxite ore using a sintering process with Lime-soda followed by alkali leaching". *Journal of Mining and Environment (JME)*,

15(3): 1131-1148.

- [8] HSC, Version 6.12, Outotec Research Oy, (2007).
- [9] Sun, Y., Pan, A., Ma, Y., Chang, J., Li, K., and Hu, S. (2022). “*Activation mechanism of diasporic bauxite calcined with sodium carbonate*”. *Minerals Engineering*, 187: 107782.
- [10] Sun, Y., Pan, A., Ma, Y., and Chang, J. (2023). “*Extraction of alumina and silica from high-silica bauxite by sintering with sodium carbonate followed by two-step leaching with water and sulfuric acid*”. *RSC Advances*, 13: 23254-23266.
- [11] Niknezhad, V., Setoudeh, N., Hayati, R., and Pashangeh, Sh. (2025). “*The phase changes in the red mud after heating and acid washing*”. 4th International Conference and 8th National Conference on Materials, Metallurgy, Mining, Feb. 5, 2025, Ahvaz, Iran. maei 2025-01450122.



دوره دهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۴، صفحه ۹۸ تا ۱۱۲

Vol. 10, No. 3, Autumn 2025, pp. 98-112



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

علمی-پژوهشی

تشویه قلیایی در مخلوط گل قرمز-سدیم کربنات پس از آسیاکاری

وحید نیک نژاد^۱، نادر ستوده^{۲*}، راضیه حیاتی^۲، شیما پشنه^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج

۳- استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۲

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

چکیده

در این پژوهش پس از تهیه نمونه گل قرمز از شرکت آلومینای ایران (جاجرم) و تعیین ویژگی‌های آن، آزمایش‌های شیمیایی و فیزیکی به روش‌های XRF و XRD انجام شد. سپس آسیاکاری مکانیکی مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم در زمان‌های ۱۵ دقیقه، ۲ ساعت و ۵ ساعت صورت پذیرفت. آزمون‌های گرماسنجی هم‌زمان بر روی نمونه گل قرمز و مخلوط‌های حاصل از آسیاکاری در اتمسفر هوا تا دمای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و با نرخ گرمایش ۲۰ درجه در دقیقه انجام شد. کاهش جرم نمونه گل قرمز حدود ۱۳/۲۵ درصد و برای مخلوط‌های آسیاکاری در بازه ۲۳ تا ۲۶ درصد قرار دارد. تشویه قلیایی مخلوط‌ها نیز با گرمایش در محدوده دمایی ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، تحت فشار یک اتمسفر و به مدت یک ساعت انجام شد. نشانه فازهای NaAlSiO_4 ، NaAlO_2 و NaFeO_2 در الگوهای XRD نمونه‌های حاصل از تشویه قلیایی مشاهده شد. در مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری، این فازها شناسایی نشدند و پهن‌شدگی نقاط اوج نمودار و از بین رفتن نشانه کربنات سدیم با افزایش زمان آسیاکاری، رویداد غالب بود. فروشویی نمونه‌های تشویه‌شده با آب در دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه منجر به انحلال فاز NaAlO_2 گردید و نشانه‌ای از این فاز در باقی‌مانده جامد پس از فروشویی مشاهده نشد. غلظت آهن در محلول‌های حاصل از فروشویی به روش آزمون جذب اتمی بسیار ناچیز بود. نتایج نشان داد در اثر تشویه قلیایی گل قرمز با کربنات سدیم و انحلال محصول جامد تشویه در آب، امکان جداسازی آلومینیوم از آهن و یا ترکیبات محتوی آهن فراهم می‌شود.

کلمات کلیدی

آسیاکاری مکانیکی، آلومینات سدیم، بوکسیت، فرآیند بایر، گل قرمز.

استناد به این مقاله

نیک نژاد، و، ستوده، ن، حیاتی، ر، پشنه، ش؛ ۱۴۰۴؛ "تشویه قلیایی در مخلوط گل قرمز-سدیم کربنات پس از آسیاکاری". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره دهم، شماره ۳، ص ۹۳-۱۱۲.

DOI: 10.30479/jmre.2025.22078.1737



حق مؤلف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: nsetoudeh@yu.ac.ir

۱- مقدمه

گل قرمز یک پسماند جامد و محصول جانبی تولید اکسید آلومینیوم (آلومینا) از منابع بوکسیتی در فرآیند بایر است. این پسماند در اثر واکنش بوکسیت با سود سوزآور (NaOH) در دما و فشار بالا تشکیل می‌شود. ترکیب شیمیایی گل قرمز بسته به نوع بوکسیت و ناخالصی‌های موجود در آن متفاوت است، اما عمدتاً شامل ترکیبات و اکسیدهای آهن، سیلیسیم، تیتانیم، اکسیدهای قلیایی مانند سدیم و کلسیم، مقادیر اندکی فلزات کمیاب و عناصر رادیواکتیو و همچنین بخشی از اکسیدهای آلومینیوم واکنش‌نداده با سود سوزآور است. رنگ قرمز مایل به قهوه‌ای گل قرمز ناشی از حضور اکسیدهای آهن است که بخش اصلی ترکیب شیمیایی آن را تشکیل می‌دهد و با افزایش محتوای اکسید آهن، شدت رنگ قرمز آن بیشتر می‌شود [۱-۳]. به دلیل حضور ترکیبات و اکسیدهای قلیایی مانند ترکیبات سدیم، pH گل قرمز بالا و در بازه ۱۰ تا ۱۳ قرار دارد. حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد سدیم موجود در گل قرمز به صورت اکسید سدیم و مابقی به صورت ترکیب کمپلکس سودالیت مشاهده می‌شود [۵،۴].

گل قرمز ترکیبی با متوسط ابعاد ذرات کمتر از ۱۰۰ میکرومتر است که این ابعاد بر اساس اندازه ذرات کانی اولیه و فرآیند مورد استفاده متغیر است. در واقع اندازه ذرات گل قرمز حاصل از فرآیند بایر به واسطه فرآیند آسیاکاری و فروشویی ممکن است ریزتر شود. محدوده اندازه ذرات گل قرمز خردشده در حدود ۱ تا ۸۰ میکرومتر و متوسط آن برابر با ۲۶۷ میکرومتر گزارش شده است. در پژوهشی نشان داده شده است که در دماهای بالاتر (حدود ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد) و به دلیل بهبود بلورینگی، متوسط اندازه ذرات به حدود ۳۸۲ افزایش می‌یابد [۶].

ریزساختار گل قرمز از آگلومرهایی با ذرات ریز تشکیل شده است که ساختاری متخلخل دارند و از این رو سطح ویژه آن در بازه ۶۴۱ تا ۱۸۶۹ مترمربع بر گرم و چگالی آن در محدوده ۲۷ تا ۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است [۸،۷،۳]. دمای ذوب گل قرمز به دلیل حضور ترکیبات و اکسیدهای سدیم در محدوده ۱۲۰۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. البته به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی گل قرمز، امکان مشاهده تغییراتی در دمای ذوب وجود دارد [۸،۳].

بر اساس ترکیب شیمیایی منابع بوکسیتی، تقریباً به ازای تولید یک تن اکسید آلومینیوم، حدود ۱ تا ۲ تن گل قرمز

تولید می‌شود. با توجه به حجم بالای تولید آلومینا در جهان، مقدار قابل توجهی پسماند گل قرمز تولید می‌شود و به دلیل وجود ترکیبات شیمیایی متنوع در این پسماند، بازیابی عناصر و ترکیبات با ارزش از آن، اهمیت ویژه‌ای دارد [۷].

به طور کلی بازیابی آهن، آلومینیوم، تیتانیم و یا ترکیبات و عناصر خاکی کمیاب از گل قرمز قابل توجهی است. در مرحله انحلال بوکسیت در فرآیند بایر، بخشی از آلومینیوم با سیلیس و اکسید سدیم واکنش داده و به صورت ترکیباتی مانند سدیم آلومینیوم سیلیکاته آبدار ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1.68\text{SiO}_2 \cdot 1.73\text{H}_2\text{O}$) وارد پسماند گل قرمز می‌شود. از سوی دیگر، در منابع بوکسیتی با عیار پایین اکسید آلومینیوم، میزان اتلاف آلومینیوم در پسماند گل قرمز بیشتر است [۹،۶]. به همین منظور روش‌های هیدرومتالورژی مانند فروشویی با اسید کلریدریک، روش‌های پیرومتالورژیکی نظیر احیا در حالت جامد و جدایش مغناطیسی و همچنین روش فروشویی با عوامل قلیایی برای بازیابی آهن و اکسید آلومینیوم از گل قرمز پیشنهاد شده‌اند [۱۴،۳-۱۰].

در روش فروشویی اسیدی از اسیدهای معدنی مانند اسید کلریدریک، اسید سولفوریک، اسید نیتریک و اسید اگزالیک برای بازیابی آهن از گل قرمز استفاده شده است [۳]. همچنین روش کلسیفیکاسیون-کربناسیون^۱ برای بازیابی اکسید آلومینیوم از منابع بوکسیتی کم‌عیار و یا بازیابی از گل قرمز ارائه شده‌اند. در این روش با استفاده از اکسید کلسیم می‌توان اکسید سدیم و اکسید آلومینیوم موجود در گل قرمز را بازیابی کرد [۱۵،۳].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های متعددی در زمینه بازیابی آلومینیوم از ترکیبات و منابع بوکسیتی به روش تشویه قلیایی و به دنبال آن فروشویی محصول جامد حاصل از فرآیند تشویه در آب یا محلول‌های قلیایی گزارش شده است. در این رابطه می‌توان به مطالعاتی پیرامون فرآیند تفجوشی با سودا^۲ برای بازیابی آلومینیوم از منابع بوکسیتی اشاره کرد [۱۷،۱۶]. همچنین مطالعاتی دیگر در خصوص استخراج آلومینیوم از منابع کم‌عیار بوکسیت (شیل) با استفاده از فرآیند تفجوشی سودا-آهک [۱۸] و نیز پژوهش‌هایی در زمینه استحصال آلومینا از خاک‌های کم‌عیار بوکسیتی منابع سمیرم با بهره‌گیری از روش تفجوشی آهک-سودا گزارش شده‌اند [۱۹].

استخراج آلومینا و سیلیس از منابع بوکسیتی با مقدار بالای سیلیس به روش تفجوشی با کربنات سدیم و به دنبال

۰/۵۵ و ۰/۸۵ در پژوهش دیگری شناسایی شدند و نتایج نشان داد که محلول جامدی با فرمول $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ از دو فاز NaAlSiO_4 و NaAlO_2 بر حسب مقدار x تشکیل می‌شود [۲۶]. در ترکیب شیمیایی مذکور، اگر مقدار x برابر با صفر باشد، فرمول شیمیایی $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ حاصل می‌شود که همان ترکیب آلومینات سدیم است. به طور کلی نتایج پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فازی با ترکیب شیمیایی $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ و $x \leq 0.25$ انحلال بسیار مطلوبی در شرایط فروشویی عادی و یا در شرایط انحلال در فرآیند بایر دارد [۲۷، ۲۴].

به دلیل مقدار زیاد اکسید آهن و ترکیبات محتوی آهن در پسماند گل قرمز و یا برخی از منابع بوکسیتی با عیار بالای آهن، مشکلاتی در بازیابی اکسید آلومینیوم به روش‌های فروشویی ایجاد می‌شود. در پژوهشی، تشویه قلیایی نمونه‌ای از بوکسیت با کربنات سدیم برای مخلوط‌های حاصل از آسیاکاری مکانیکی انجام و تغییرات فازها و امکان‌سنجی تشکیل آلومینات سدیم در این نمونه‌ها هنگام گرمایش در دماهای گوناگون ارزیابی شده است. نتایج نشان داد پس از فروشویی محصول تشویه قلیایی در محلول سود سوزآور و در اثر انحلال فاز آلومینات سدیم، ترکیبات و اکسیدهای آهن حل نمی‌شوند و جداسازی آلومینیوم موجود در بوکسیت از ناخالصی‌های آهن امکان پذیر است [۲۸].

از سوی دیگر، نتایج پژوهشی در زمینه فروشویی گل قرمز با اسیدکلریدریک به منظور حذف آهن از نمونه پسماند گل قرمز رضایت بخش نبود و در باقی‌مانده جامد پس از فروشویی، نشانه‌های فاز هماتیت (اکسید آهن) مشاهده شد [۲۹].

پژوهشی در زمینه استفاده از باطله‌های ارزان و کم عیار معدن بوکسیت تاش به عنوان جاذب برای حذف آلاینده‌های فلزی مس و منگنز از پساب معدن مس سرچشمه انجام شد و نتایج نشان داد که باطله بوکسیت پتانسیل بالایی در حذف فلزات سمی از پساب دارد [۳۰]. همچنین در پژوهشی دیگر، مطالعاتی در زمینه استفاده از گل قرمز به عنوان جاذب آلاینده‌های آبی انجام شده است [۳۱]. از سوی دیگر، استخراج آهن از پسماند گل قرمز به روش تشویه احیایی در مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم-گرافیت در حضور گاز آرگن و خلأ در محدوده دمایی ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به تشکیل فاز Fe_3O_4 شد [۳۲].

یافته‌های فراگیری در زمینه بازیابی مواد با ارزش از باطله‌های پسماند گل قرمز در ایران در دسترس نیست.

آن فروشویی با آب و اسید سولفوریک از دیگر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه است [۲۰].

همچنین مطالعه‌ای در زمینه تغییرات فاز و تجزیه حرارتی مخلوط کائولینیت-کربنات سدیم نشان داده است که واکنش‌های حالت جامد بین کائولینیت و کربنات سدیم در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۲۱]. از سوی دیگر، روش تشویه با سودا-آهک در شرایط احیایی برای بازیابی اجزای با ارزش نظیر آلومینیوم، سدیم و آهن از گل قرمز مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲].

در روش تشویه قلیایی اکسید آلومینیوم با کربنات سدیم، فاز آلومینات سدیم (NaAlO_2) بر اساس واکنش ارائه شده در رابطه ۱ تشکیل می‌شود [۲۳، ۱۸]. محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهد که این واکنش به شدت گرماگیر بوده و وقوع آن در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد امکان پذیر است. به دلیل آزاد شدن گاز دی‌اکسید کربن، کاهش جرم تئوری این واکنش در حدود ۲۱/۲ درصد برآورد می‌شود [۲۳]:



پژوهش‌هایی در زمینه تشویه قلیایی و واکنش‌های شیمیایی بوکسیت با کربنات سدیم انجام شده است. مطالعات در رابطه با تکلیس نمونه بوکسیت دیاسپوری با کربنات سدیم در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده‌اند که کانی‌های حاوی آلومینیوم در بوکسیت دیاسپوری پس از تکلیس در بازه ۷۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به فاز $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ تبدیل می‌شوند. همچنین با افزایش دمای تکلیس به ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و یا افزایش مقدار کربنات سدیم، تغییراتی در این فاز ایجاد و به فازهای Na_2SiO_3 و NaAlO_2 تبدیل می‌شود [۲۴].

نتایج نشان داده‌اند که فاز NaAlO_2 حاصل از تشویه با کربنات سدیم و یا فاز $\text{Na}_{1.95}\text{Al}_{1.95}\text{Si}_{0.05}\text{O}_4$ کاملاً در آب حل می‌شوند [۲۰، ۲۴]. رفتار فروشویی فاز $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ تابع مقدار x در ترکیب شیمیایی است و هنگامی که مقدار x کاهش یافته و به ۰/۰۵ برسد، انحلال بسیار مطلوبی دارد و رفتار آن مشابه فاز NaAlO_2 است [۲۴].

فاز $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ در فرآیند تفجوشی سودا-آهک و در پژوهشی‌هایی مرتبط به گل قرمز نیز شناسایی شده‌اند [۲۵]. ترکیبات آلومینوسیلیکات‌های سدیم با فرمول شیمیایی $\text{Na}_{2-x}\text{Al}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_4$ و مقادیر x برابر ۰/۰۵، ۰/۲۵، ۰/۳۵، ۰/۴۵،

مخلوط در آسیای سیاره‌ای مدل Narya-mpm-2*250H با محفظه فلزی و چهار گلوله فلزی (با قطر تقریبی ۲۰ میلی‌متر) با نسبت وزنی گلوله به پودر ۴۰ به ۱ در زمان‌های ۱۵ دقیقه، ۲ ساعت و ۵ ساعت انجام شد. پس از پایان هر مرحله، مخلوط از درون محفظه آسیا جمع‌آوری و برای آزمون‌های تکمیلی در ظروف مشخص نگهداری شده است.

آزمون گرماسنجی هم‌زمان (STA^۶) با دستگاه PerkinElmer STA6000 در اتمسفر هوا تا دمای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و با نرخ گرمایش ۲۰ درجه در دقیقه برای نمونه گل قرمز و مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری انجام شد. برای ارزیابی تغییرات فازها و واکنش‌های مربوط به تشویه قلیایی، آزمون‌های تشویه در دماهای ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در اتمسفر هوا و به مدت یک ساعت درون کوره لوله‌ای (تیوبی) انجام شد. پس از پایان هر آزمون تشویه قلیایی و سرد شدن نمونه، باقی‌مانده جامد از بوته زیرکونیایی جمع‌آوری و برای فازبندی به روش XRD (Rigaku Ultima IV) با تابش اشعه مس نگهداری شد.

آزمون فروشویی با آب داغ برای باقی‌مانده جامد پس از تشویه قلیایی در دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۶۰ دقیقه انجام شد. تغییرات دما در حین فروشویی در بازه ۷۵ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشت. پس از پایان فرآیند فروشویی، جامد باقی‌مانده روی کاغذ صافی با آب مقطر شستشو داده شد و سپس کاغذ صافی محتوی باقی‌مانده نمونه در آون آزمایشگاهی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت خشک شد. با اندازه‌گیری وزن باقی‌مانده خشک پس از هر آزمون فروشویی، آزمون XRD برای ارزیابی فازها انجام شد. همچنین برای تعیین مقدار آهن و آلومینیوم موجود در محلول فروشویی از روش آزمون جذب اتمی (AAS, Thermo Scientific, iCE 3500) استفاده شد.

کلیه واکنش‌های شیمیایی مرتبط و امکان‌پذیری رخداد آن‌ها از دیدگاه ترمودینامیکی با استفاده از داده‌های نرم‌افزار ترمودینامیکی HSC بررسی شده است [۲۳].

همچنین داده‌های محدودی در زمینه روش تشویه قلیایی گل قرمز با کربنات سدیم و ارزیابی تغییرات فازها در محصولات حاصل از این فرآیند گزارش شده است. بر اساس یافته‌های گزارش شده در منابع بین‌المللی که به برخی از آن‌ها اشاره شد، اطلاعاتی در رابطه با تغییرات فازها در فرآیند تشویه قلیایی مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری در دسترس نیست. با توجه به محتوی بالای آهن در پسماند گل قرمز، امکان‌سنجی بازیابی آلومینیوم به روش تشویه قلیایی با کربنات سدیم و تبدیل اکسید آلومینیوم موجود در گل قرمز به فاز قابل حل آلومینات سدیم از جمله اهداف این پژوهش است. ارزیابی تغییرات فازها در فرآیند تشویه قلیایی برای مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری مکانیکی، از جمله نکات نوآوری‌های این پژوهش است. همچنین، مقایسه تغییرات فازها در محصولات حاصل از تشویه قلیایی و باقی‌مانده‌های جامد پس از انحلال در آب، از جمله نتایج مهم این پژوهش است.

۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش نمونه گل قرمز از شرکت آلومینای ایران (جاجرم) تهیه شده است. ابتدا pH نمونه اندازه‌گیری و سپس به مدت ۹۶ ساعت درون آون آزمایشگاهی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده است. پس از آن، چگالی گل قرمز، مساحت سطح ویژه به روش BET^۳ و آزمون PSA^۴ برای تعیین توزیع اندازه ذرات انجام شد. آزمون شیمیایی نمونه به روش XRF در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار آهن کل نمونه به روش ICP-OES در حدود ۱۷/۵۷ درصد و بر اساس روش Auto titration در حدود ۱۶/۹۲ گزارش شده است.

نمونه کربنات سدیم (Na₂CO₃) محصول شرکت مرک^۵ و مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم بر اساس مقدار اکسید آلومینیوم موجود در گل قرمز و مطابق با واکنش ارائه شده در رابطه ۱، به گونه‌ای که نسبت مولی کربنات سدیم دو برابر مقدار اکسید آلومینیوم باشد، تهیه شده است. آسیاکاری مکانیکی این

جدول ۱: آزمون شیمیایی نمونه گل قرمز به روش XRF (داده‌ها بر حسب درصد وزنی)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SrO	ZrO ₂	V ₂ O ₅	L.O.I
۱۵/۱۵	۱۸/۱۴	۱۷/۸۴	۱/۱۶	۴/۶۱	۰/۰۸	۰/۷۲	<۰/۱	۲۲/۳۸	۵/۵۲	۰/۷۹	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۹	۱۳/۳۷

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی نمونه گل قرمز و مخلوط حاصل از آسیاکاری

نتایج مرتبط با چگالی، مساحت سطح ویژه و توزیع اندازه ذرات گل قرمز در جدول ۲ ارائه شده و بیانگر اندازه بسیار ریز ذرات نمونه گل قرمز است. همچنین بر اساس آزمون شیمیایی نمونه (جدول ۱) و مقدار بالای اکسید آهن، دلیل رنگ قرمز نمونه مشخص می‌شود. مقدار زیاد اکسید سدیم و اکسید کلسیم گل قرمز (جدول ۲) نیز بیانگر خاصیت قلیایی گل قرمز بوده و تأیید کننده مقدار بالای pH آن بر اساس داده‌های جدول ۱ است.

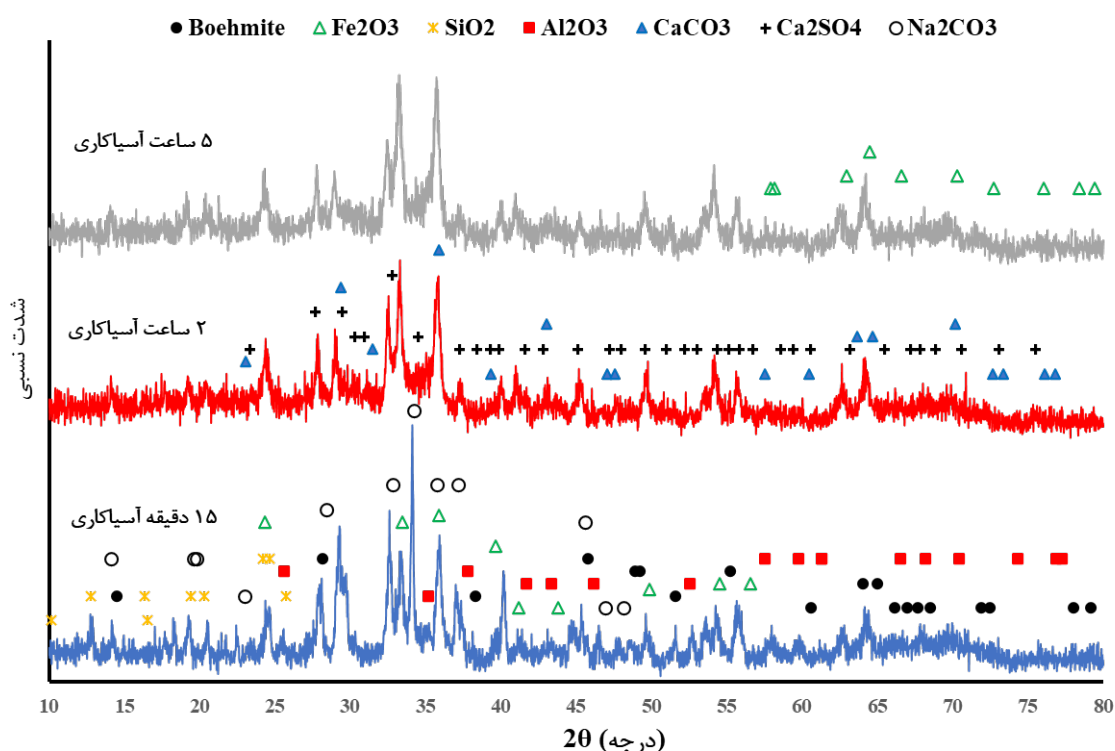
نتایج فازبندی به روش XRD برای نمونه گل قرمز، حضور فازهایی مانند بوهمیت ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)، هماتیت (Fe_2O_3)، اکسید سیلیسیم (SiO_2)، سیلیکات کلسیم (Ca_2SiO_4).

کربنات کلسیم (CaCO_3)، اکسید سدیم (Na_2O) و دی‌اکسید تیتانیم (TiO_2) را نشان می‌دهد. وجود این فازها با توجه به آزمون شیمیایی ارائه شده در جدول ۲ قابل انتظار است [۲۹]. بر اساس نتایج، شدت نسبی فازهایی مانند هماتیت و ترکیبات محتوی کلسیم (کربنات کلسیم و یا سیلیکات کلسیم) در مقایسه با فازهای بوهمیت و یا اکسید آلومینیوم بیشتر است. این موضوع با توجه به واکنش‌های شیمیایی و انحلال ترکیبات محتوی آلومینیوم در نمونه‌های بوکسیت طی فرآیند بایر قابل توجیه است [۲۹].

بر اساس مقدار اکسید آلومینیوم موجود در گل قرمز (جدول ۱)، مخلوط‌سازی گل قرمز-کربنات سدیم مطابق واکنش ارائه شده در رابطه ۱ و به‌گونه‌ای انجام شد که در تمامی مخلوط‌ها، نسبت مولی کربنات سدیم دو برابر مقدار اکسید آلومینیوم باشد. شکل ۱ الگوهای XRD مخلوط‌های

جدول ۲: چگالی، pH و آزمون‌های BET و PSA نمونه گل قرمز

pH	چگالی (g.cm^{-3})	مساحت سطح ویژه $\text{BET}(\text{m}^2 \text{g}^{-1})$	$D_{90}(\mu\text{m})$	$D_{50}(\mu\text{m})$	$D_{10}(\mu\text{m})$
۱۱٫۷	۲٫۹۷	۷٫۵۷۵۳	۱۲٫۵۴	۴٫۲۵	~ ۱



شکل ۱: الگوهای XRD مرتبط با مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری مکانیکی در زمان‌های مختلف

گزارش شده‌اند که این مورد به تفاوت در سختی موس فازها ارتباط دارد [۳۳، ۲۸].

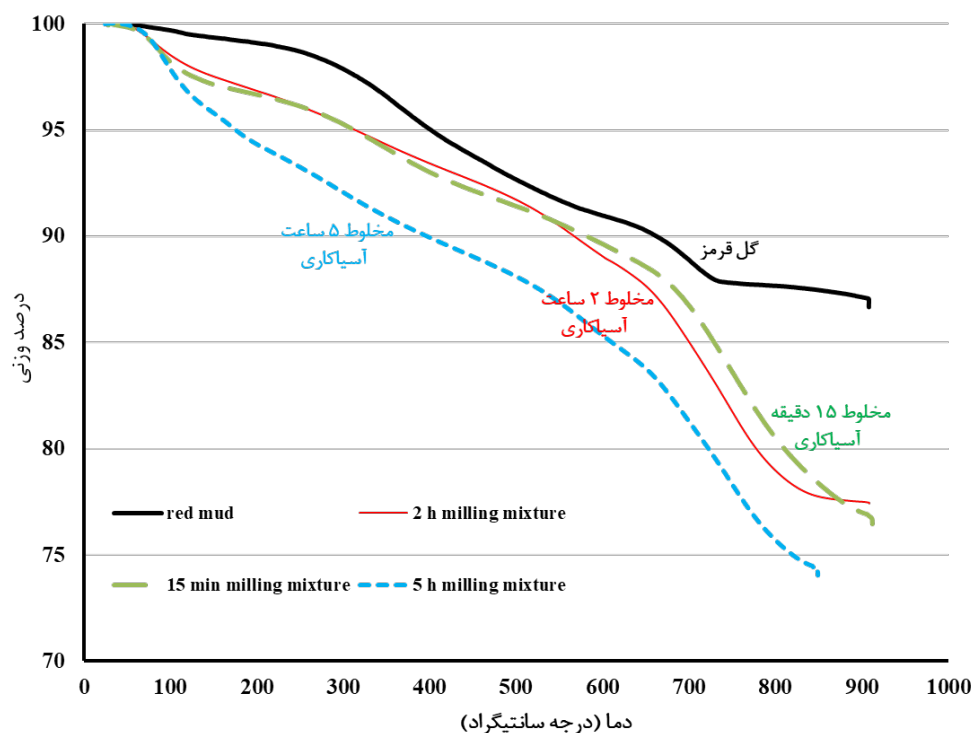
پهن شدگی نقاط اوج و کاهش شدت نسبی آن‌ها ناشی از افزایش چگالی عیوب بلوری و کرنش‌های شبکه‌ای است که از پدیده‌های مرسوم در الگوهای XRD فازهای حاصلی از آسیاکاری محسوب می‌شوند [۳۴]. مطابق نمودار شکل ۱، کاهش شدت نسبی نشانه فازهایی با سختی موس کمتر (نرم‌تر) در ضربات مکانیکی گلوله‌ها و تنش‌های ناشی از آسیاکاری به مراتب بیشتر از فازهای سخت‌تر است.

شکل ۲ نمودارهای TGA^۷ حاصل از آزمون STA برای گل قرمز و مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری مکانیکی را نشان می‌دهد. در نمونه گل قرمز چندین مرحله کاهش جرم با شیب‌های متفاوت مشاهده می‌شود و مقدار کاهش جرم در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۱۳/۲۵ درصد است که تطابق مطلوبی با درصد اتلاف حرارتی (L.O.I^۸) در جدول دارد.

روند کاهش جرم در مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از ۱۵ دقیقه و ۲ ساعت آسیاکاری تقریباً مشابه بوده

گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری مکانیکی را نشان می‌دهد. در مخلوط پس از ۱۵ دقیقه آسیاکاری، نشانه‌های کربنات سدیم (Na₂CO₃, JCPDS-84-0176) با شدت نسبی قابل‌توجه مشاهده شد. همچنین نشانه‌های اصلی فاز بوهمیت (Al₂O₃.H₂O, JCPDS-21-1307) در زوایای حدود ۱۴/۵، ۲۸ و ۴۵/۸ درجه و نشانه‌های فاز هماتیت (Fe₂O₃, JCPDS-84-0311) در زوایای حدود ۲۴، ۳۳/۴ و ۳۵/۸ درجه قابل مشاهده‌اند. علاوه بر این، حضور فازهایی مانند سیلیس (SiO₂, JCPDS-80-1288) و کربنات کلسیم (CaCO₃, JCPDS-04-0637) نیز در مخلوط پس از ۱۵ دقیقه آسیاکاری ثبت شده‌اند.

با افزایش زمان آسیاکاری به ۲ و ۵ ساعت، علاوه بر پهن‌شدگی نقاط اوج نمودار و کاهش شدت نسبی آن‌ها، بیشتر نشانه‌های مربوط به فازهای کربنات سدیم و بوهمیت از بین رفتند. در مقابل، نشانه‌های مرتبط با فاز هماتیت در زوایای حدود ۲۴، ۳۳/۴ و ۳۵/۸ درجه همچنان باقی مانده‌اند. روند مشابهی در نمونه‌های بوکسیت و یا مخلوط بوکسیت-کربنات سدیم پس از آسیاکاری مکانیکی در پژوهش‌های دیگری



شکل ۲: نمودارهای TGA حاصل از آزمون STA برای نمونه گل قرمز و مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری مکانیکی در زمان‌های مختلف

بهتر، الگوی XRD مربوط به مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری نیز در شکل ۳ ارائه شده است تا تغییرات فازها در محصولات حاصل از تشویه قلیایی نیز بررسی شوند.

پس از گرمایش مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، نشانه‌های جدیدی در زوایای حدود ۲۱، ۳۰، ۳۴٫۵ و ۳۵ درجه ظاهر شدند. علاوه بر این، تغییراتی در نشانه‌های فاز کربنات سدیم به‌ویژه در زاویه حدود ۳۴ درجه مشاهده می‌شود.

تغییرات نشانه فازها در محدوده زوایای ۳۰ تا ۳۵ درجه برای مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری و محصول حاصل از تشویه در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد نشان‌دهنده وقوع واکنش‌های شیمیایی و تشکیل فازهای جدید است.

با توجه به شکل ۳، شدت نسبی نشانه‌های جدید در زاویه حدود ۲۱ درجه و همچنین در محدوده زوایای ۳۰ تا ۳۵ درجه با افزایش دما به ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد افزایش یافته است.

با نتایج فازبندی می‌توان نتیجه گرفت که نشانه‌های جدید مربوط به تشکیل فازهایی مانند آلومینات سدیم (NaAlO_2) (JCPDS-002-0999)، سیلیکات سدیم آلومینیوم

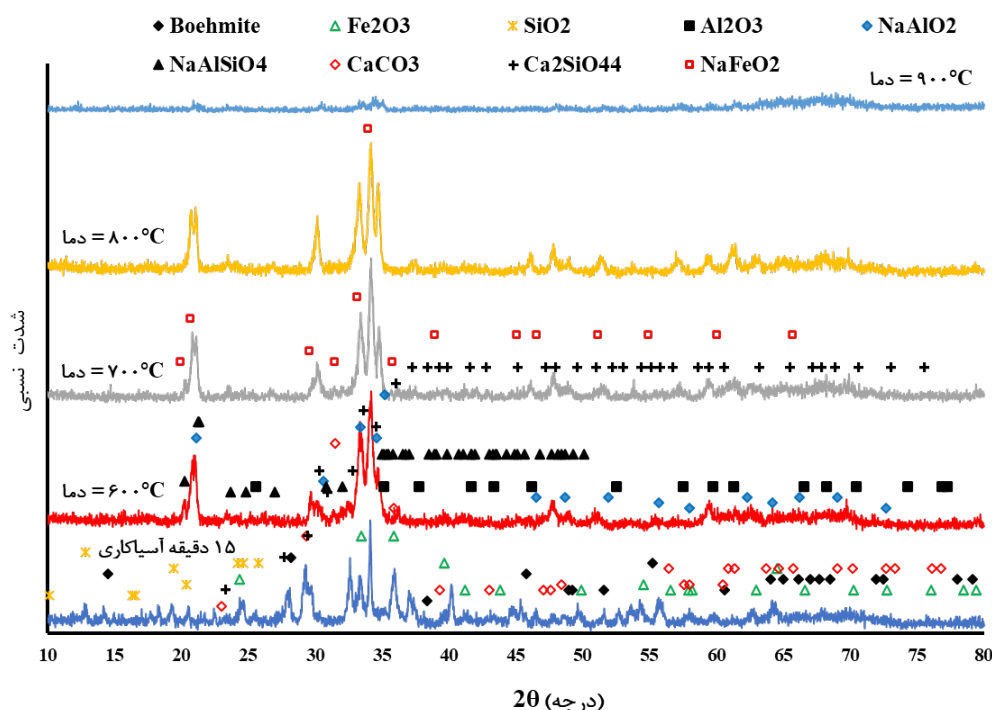
و مقدار کاهش جرم هر دو مخلوط در حدود ۲۳ درصد است. در مقابل، مخلوط حاصل از ۵ ساعت آسیاکاری رفتار متفاوتی نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که مقدار کاهش جرم آن از دمای حدود ۸۵۰ درجه سانتی گراد به حدود ۲۶ درصد می‌رسد.

نتایج شکل ۲ بیانگر وقوع واکنش‌های شیمیایی متعدد در مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم با افزایش دما است. ارزیابی واکنش‌های شیمیایی و تغییرات فازها در نمونه گل قرمز در بازه دمایی ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در پژوهش دیگری گزارش شده است [۲۹].

با این حال، برای بررسی تغییرات فازها در فرآیند تشویه قلیایی مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری، آزمون‌های تشویه قلیایی مطابق با نتایج شکل ۲ در بازه دمایی ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد در اتمسفر هوا انجام شد.

۳-۲- ارزیابی فازها پس از تشویه قلیایی

شکل ۳ الگوهای XRD محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی در مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم پس از ۱۵ دقیقه آسیاکاری در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. برای مقایسه



شکل ۳: الگوهای XRD مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری گل قرمز-کربنات سدیم و محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی در دماهای مختلف (اتمسفر هوا و زمان نگهداری ۱ ساعت)

است [۳۵].

فاز سدیم فریت (α -NaFeO₂) ساختار لایه‌ای با گروه فضایی ($R-3m$) دارد که به‌سادگی در آب حل می‌شود و محصول حاصل از انحلال سدیم فریت در آب به‌دلیل pH بالا، قابلیت جذب دی‌اکسید کربن از هوا را دارد [۳۶].

با افزایش دما به ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و بر اساس نتایج شکل ۳، شدت نسبی فازهایی مانند NaAlSiO₄، NaAlO₂ و NaFeO₂ در زاویه حدود ۲۱ درجه و همچنین در محدوده زوایای ۳۰ تا ۳۵ درجه به‌شدت کاهش یافته و نشانه‌های فازهای بلوری در الگوی XRD محصول حاصل از تشویه در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً از بین رفته است. محصول جامد این نمونه پس از تشویه در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به سطح بوته سرامیکی چسبیده بود که جداسازی آن با دشواری انجام شد.

شکل‌های ۴ و ۵ به‌ترتیب الگوهای XRD محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی برای مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از ۲ و ۵ ساعت آسیاکاری در دماهای مختلف را نشان می‌دهند.

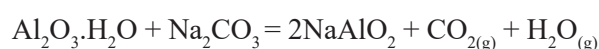
در مخلوط حاصل از ۲ ساعت آسیاکاری، نشانه‌ای از فاز کربنات سدیم مشاهده نمی‌شود و تنها نشانه‌های بسیار ضعیفی از فاز بوهمیت در زوایای حدود ۱۴، ۲۷، ۳۸ و ۴۶ درجه وجود دارد. در محصول حاصل از گرمایش در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، نشانه‌های فاز اکسید آهن (هماتیت) در زوایای حدود ۳۳/۵ و ۳۵ درجه مشاهده نمی‌شوند، در عوض فازهای جدیدی در زوایای حدود ۲۱، ۳۱، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ درجه پدیدار می‌شوند که با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، شدت نسبی آن‌ها کاهش می‌یابد. محصول حاصل از گرمایش در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۴ تقریباً به‌صورت آمورف قابل مشاهده است.

در مخلوط حاصل از ۵ ساعت آسیاکاری و محصولات پس از تشویه قلیایی در دماهای مختلف، نشانه‌هایی مربوط به فازهای NaAlSiO₄، NaAlO₂ و NaFeO₂ مشاهده می‌شود (شکل ۵). به‌دلیل بروز مشکلات ناشی از چسبندگی محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی به جداره بوته سرامیکی، آزمون گرمایش در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط حاصل از ۵ ساعت آسیاکاری شده صورت نپذیرفت.

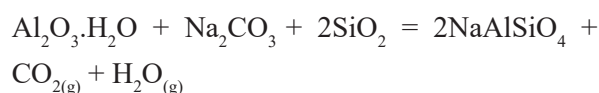
(NaAlSiO₄, JCPDS-33-1203) و یا اکسید سدیم آهن (Na₂O.Fe₂O₃, JCPDS-30-1196) با فرمول شیمیایی NaFeO₂ است. این سه فاز در برخی زوایا مانند حدود ۲۱، ۳۳ و ۳۴ درجه همپوشانی دارند که تشخیص دقیق آن‌ها را دشوار می‌سازد.

با توجه به ترکیب شیمیایی نمونه گل قرمز (جدول ۱) و حضور اکسید آلومینیوم و سیلیس، همچنین شناسایی فاز بوهمیت در نمونه، تشکیل فازهایی مانند آلومینات سدیم و یا سیلیکات سدیم آلومینیوم در اثر تشویه قلیایی از واکنش‌های ارائه شده در روابط ۱ تا ۳ تبعیت می‌کند [۲۳]:

(۲)



(۳)



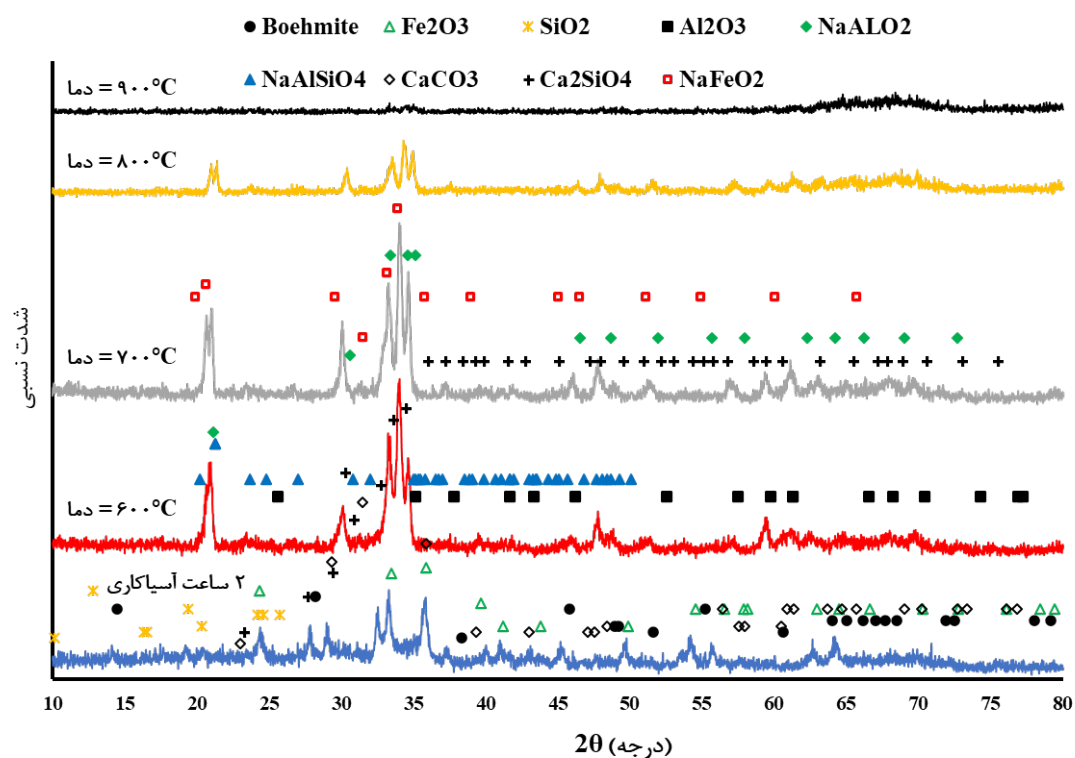
بر اساس محاسبات ترمودینامیکی، وقوع واکنش ارائه شده در رابطه ۲ در دماهای بالاتر از ۴۲۵ درجه سانتی‌گراد و رابطه ۳ در دماهای بالاتر از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد امکان‌پذیر است [۲۳]. تشکیل فاز اکسید سدیم آهن یا سدیم فریت با فرمول شیمیایی Na₂O.Fe₂O₃ مطابق با واکنش ارائه شده در رابطه ۴ و در دماهای بالاتر از ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد امکان‌پذیر است [۲۳]، همچنین این موضوع در پژوهشی دیگر نیز گزارش شده است [۱۸]:

(۴)

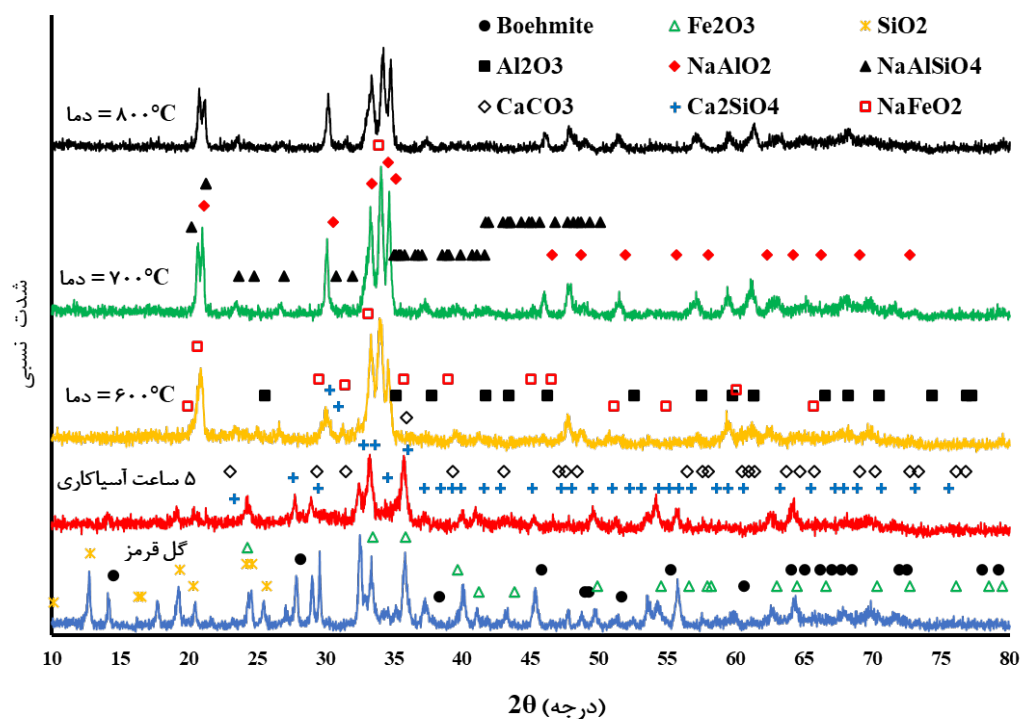


کاهش شدت نسبی نقاط اوج نمودار در فاز اکسید آهن (هماتیت) موجود در نمونه گل قرمز، به‌ویژه در زوایای حدود ۳۳/۵ و ۳۵ درجه در شکل ۳، بیانگر مشارکت این فاز در واکنش‌های شیمیایی با افزایش دما است.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اکسید سدیم آهن با فرمول شیمیایی NaFeO₂ سه ساختار بلوری متفاوت به‌نام‌های آلفا (α)، بتا (β) و گاما (γ) دارد. در پژوهشی با استفاده از مواد اولیه مانند کربنات سدیم و α -Fe₂O₃ و پس از گرمایش در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، محصول β -NaFeO₂ به‌دست آمد. نتایج نشان داده‌اند که ساختار بلوری و نوع آلوتروپ این فاز به‌شدت وابسته به ساختار مواد اولیه از جمله اکسید آهن



شکل ۴: الگوهای XRD مخلوط حاصل از ۲ ساعت آسیاکاری گل قرمز-کربنات سدیم و محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی در دماهای مختلف (اتمسفر هوا و زمان نگهداری ۱ ساعت)



شکل ۵: الگوهای XRD مخلوط حاصل از ۵ ساعت آسیاکاری گل قرمز-کربنات سدیم و محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی در دماهای مختلف (اتمسفر هوا و زمان نگهداری ۱ ساعت)

۳-۳- نتایج فروشویی در آب

نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که فاز آلومینات سدیم در آب و یا در محلول‌های قلیایی قابل حل است [۲۷،۲۴،۲۰]. همچنین یافته‌ها مربوط به تشویه قلیایی بوکسیت با کربنات سدیم بیانگر انحلال این فاز در محلول سود سوزآور است [۲۸].

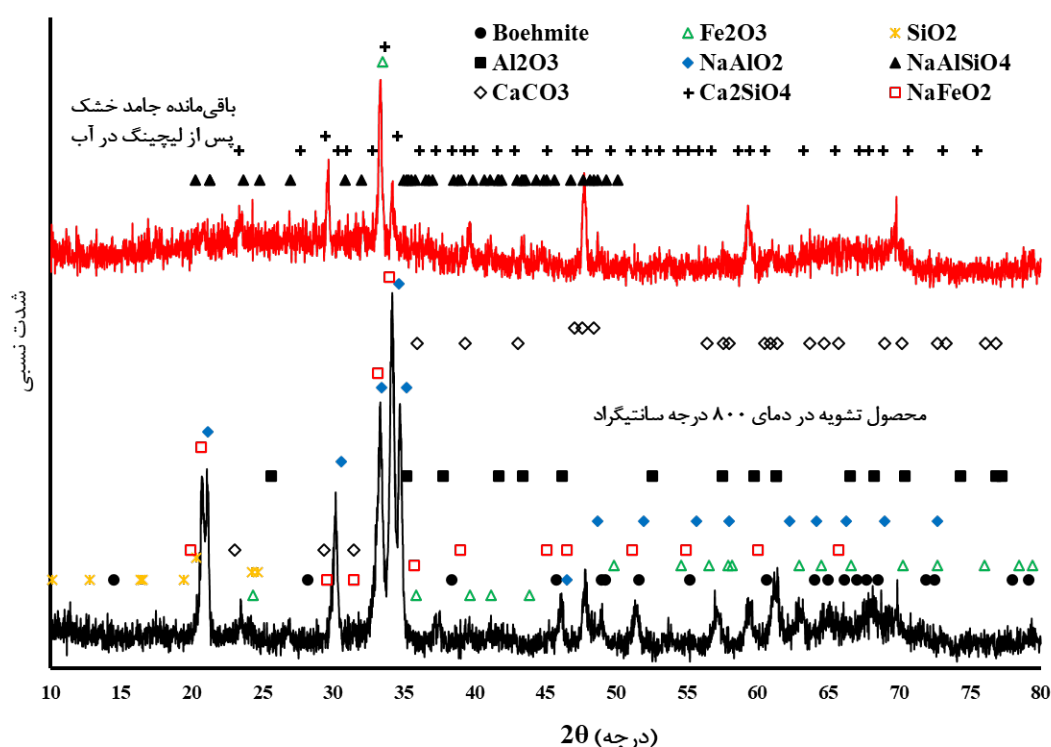
با توجه به هم‌پوشانی نشانه‌های آلومینات سدیم در زوایای حدود ۲۱، ۳۱، ۳۳، ۳۴ و ۳۵ درجه (شکل‌های ۳ تا ۵) با فازهایی نظیر سیلیکات سدیم آلومینیوم و یا اکسیدسدیم آهن و با در نظر گرفتن قابلیت انحلال این فاز در آب و محلول‌های قلیایی، برای ارزیابی تشکیل فاز آلومینات سدیم می‌توان از آزمون فروشویی استفاده نمود.

شکل ۶، الگوهای XRD باقی‌مانده جامد پس از فروشویی در آب برای نمونه حاصل از تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر مقایسه محصول جامد پس از تشویه قلیایی در همین دما است.

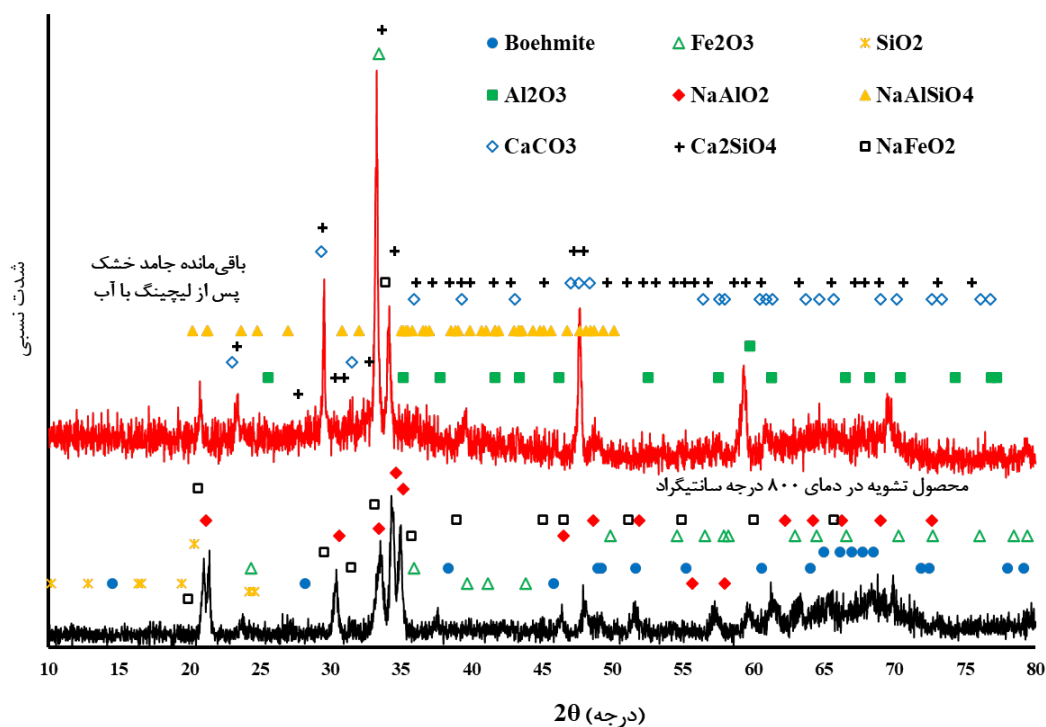
نشانه اصلی فاز اکسیدآهن (هماتیت) در زوایه حدود ۳۳/۵

درجه در باقی‌مانده جامد پس از فروشویی مشاهده می‌شود. با این حال تغییراتی در شدت نسبی نشانه‌های موجود در محدوده زوایای حدود ۳۰ تا ۳۵ رخ داده‌اند که برخی از آن‌ها حذف شده‌اند. رنگ قرمز باقی‌مانده حاصل از فروشویی در آب وجود نشانه اصلی فاز اکسیدآهن در زاویه حدود ۳۳/۵ درجه بیانگر عدم انحلال این فاز و یا ترکیبات محتوی آهن در مرحله فروشویی است. بنابراین، نشانه‌های موجود در باقی‌مانده جامد پس از فروشویی مربوط به فازهای نامحلول در آب‌اند.

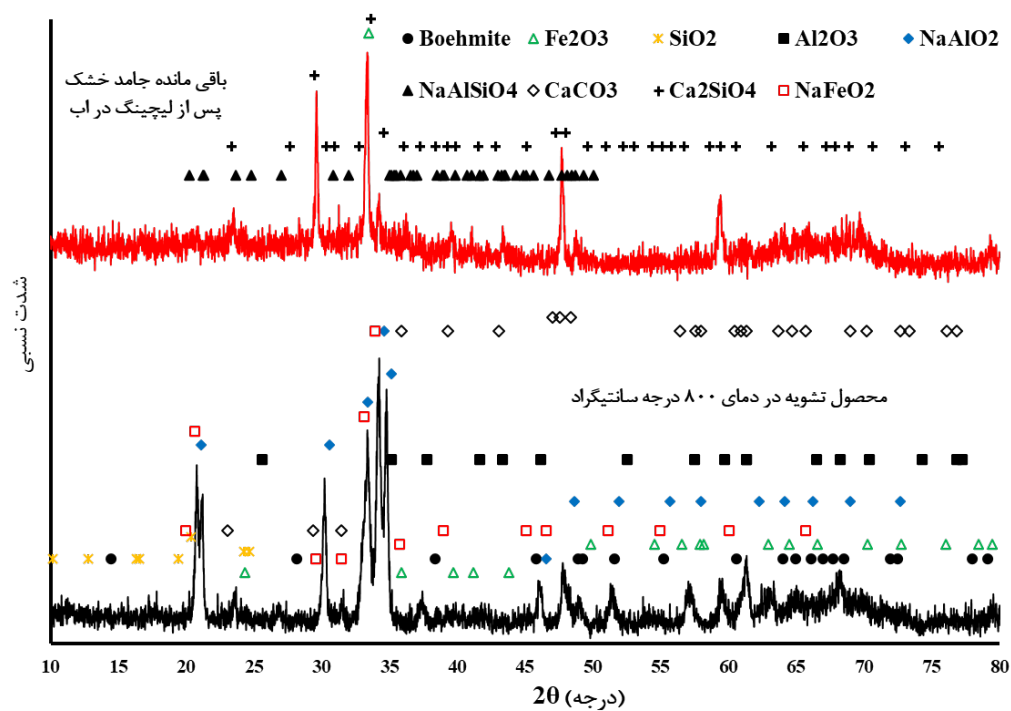
شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب الگوهای XRD باقی‌مانده جامد پس از فروشویی در آب و محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برای مخلوط‌های ۲ و ۵ ساعت آسیاکاری شده را نشان می‌دهند. مشابه مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری (شکل ۶)، در این دو مخلوط نیز تغییراتی در نشانه فازها در محدوده زوایای حدود ۳۰ تا ۳۵ درجه مشاهده می‌شود. علاوه بر وجود نشانه اصلی فاز اکسید آهن (هماتیت) در زاویه حدود ۳۳/۵ درجه، نشانه‌هایی از فازهایی مانند CaCO_3 و Ca_2SiO_4 در باقی‌مانده جامد حاصل از فروشویی مشاهده می‌شود که بیانگر نامحلول بودن این فازها در آب است.



شکل ۶: الگوهای XRD محصول جامد حاصل از تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و باقی‌مانده جامد آن پس از فروشویی با آب برای مخلوط حاصل از ۱۵ دقیقه آسیاکاری



شکل ۷: الگوهای XRD محصول جامد حاصل از تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و باقی مانده جامد آن پس از فروشویی با آب برای مخلوط حاصل از ۲ ساعت آسیاکاری



شکل ۸: الگوهای XRD محصول جامد حاصل از تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد و باقی مانده جامد آن پس از فروشویی با آب برای مخلوط حاصل از ۵ ساعت آسیاکاری

جدول ۳: نتایج AAS آلومینیوم و آهن در محلول باقی‌مانده حاصل از فروشویی با آب برای مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم پس از تشویه قلیایی در اثر گرمایش در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (مدت زمان گرمایش یک ساعت؛ زمان آسیاکاری مکانیکی مخلوط‌ها در جدول گزارش شده است)

زمان آسیاکاری مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم	مخلوط ۱۵ دقیقه	مخلوط ۲ ساعت	مخلوط ۵ ساعت
غلظت آلومینیوم (ppm) mg. L^{-1}	۶۴,۹۸۳۰	۵۸۱,۸۸۴۸	۴۹۵,۸۸۷۶
غلظت آهن (ppm) mg. L^{-1}	<۱	<۱	<۱

آهن و مشاهده نشانه‌های فاز اکسید آهن (هماتیت) در الگوهای XRD برای باقی‌مانده جامد پس از فروشویی، تأیید کننده عدم انحلال ترکیبات محتوی آهن در هنگام فروشویی با آب است.

از سوی دیگر، غلظت آلومینیوم موجود در محلول (جدول ۳) و مقایسه نشانه‌های فازها در باقی‌مانده جامد پس از فروشویی با محصولات حاصل از تشویه قلیایی در اثر گرمایش در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (شکل‌های ۶ تا ۸) نشان می‌دهد که نشانه‌های ناپدید شده در باقی‌مانده جامد پس از فروشویی مرتبط به فاز آلومینات سدیم بوده که این فاز قابل حل در آب است. بنابراین تشکیل فاز آلومینات سدیم در اثر تشویه قلیایی مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم و پس از گرمایش در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد تأیید می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:
(الف) آزمون شیمیایی نمونه گل قرمز به روش XRF نشان‌دهنده مقدار قابل توجه اکسید آهن است که توسط نتایج آزمون ICP-OES نیز تأیید می‌شد. بنابراین، رنگ قرمز گل قرمز ناشی از غلظت بالای آهن است. مقادیر زیاد اکسیدهای قلیایی مانند CaO و Na_2O نیز علت اصلی pH قلیایی این ماده محسوب می‌شود.

(ب) نتایج آزمون TGA حاصل از آزمون STA نشان‌دهنده کاهش جرم نمونه گل قرمز در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به میزان ۱۳/۲۵ درصد است که تطابق خوبی با درصد اتلاف حرارتی (L.O.I) در آزمون XRF دارد. با این حال، میزان کاهش جرم در مخلوط‌های گل قرمز-کربنات سدیم بسته به زمان آسیاکاری متغیر بوده و در محدوده ۲۳ تا ۲۶ درصد حاصل شده است.

(ج) در الگوهای XRD مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری، نشانه‌هایی از پهن‌شدگی نقاط اوج نمودار

با مقایسه شکل‌های ۶ تا ۸، تفاوت‌هایی در شدت نسبی نقاط اوج نمودار در اکسید آهن در زاویه حدود ۳۳/۵ درجه و یا کربنات کلسیم در زاویه حدود ۲۹/۴ درجه وجود دارد. لازم به ذکر است رنگ باقی‌مانده‌های جامد حاصل از فروشویی در آب برای هر سه دسته مخلوط قرمز بوده، در حالی که رنگ محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد سبز زیتونی است. رنگ قرمز در باقی‌مانده جامد و وجود نشانه‌های اکسید آهن (هماتیت) در الگوهای XRD، تأیید کننده ترکیبات محتوی آهن در باقی‌مانده جامد حاصل از فروشویی با آب است.

جدول ۳ داده‌های حاصل از آزمون جذب اتمی (AAS^9) آهن و آلومینیوم موجود در محلول را پس از فروشویی محصولات جامد حاصل از فرآیند تشویه قلیایی در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد. غلظت آلومینیوم و آهن محتوی محلول بر حسب ppm یا میلی‌گرم در لیتر گزارش شده است. بر اساس نتایج این جدول، افزایش زمان آسیاکاری مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم از ۱۵ دقیقه به ۲ ساعت، منجر به افزایش غلظت آلومینیوم در محلول باقی‌مانده پس از فروشویی شده است. با این حال، افزایش زمان آسیاکاری از ۲ به ۵ ساعت، تغییری در غلظت آلومینیوم مشاهده می‌شود که مقدار آن به حدود ۴۹۶ میلی‌گرم در لیتر کاهش یافته است. نتایج حاصل از آزمون جذب اتمی نشان می‌دهد که آسیاکاری مکانیکی مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم تا حدی مؤثر است اما پس از ۲ ساعت آسیاکاری مکانیکی، اثر آن ممکن است چندان مطلوب نباشد.

غلظت بسیار کم آهن در محلول‌های حاصل از فروشویی در جدول ۳ برای هر سه مخلوط پس از ۱۵ دقیقه، ۲ ساعت و ۵ ساعت آسیاکاری به‌روشنی نشان می‌دهد که ترکیبات محتوی آهن در مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم پس از وقوع واکنش‌های تشویه قلیایی در اثر گرمایش، تحت شرایط این پژوهش قابلیت انحلال در آب را ندارند. غلظت بسیار اندک

- "Innovative methodologies for the utilisation of wastes from metallurgical and allied industries". Resources, Conservation and Recycling, 48(1): 301-314.
- [3] Li, X-F., Zhang, T-A., Lv, G-Z., Wang, K., and Wang, S. (2023). "Summary of research progress on metallurgical utilization technology of red mud". Minerals, 13(6): 737. DOI: <https://doi.org/10.3390/min13060737>.
- [4] Sutar, H., Mishra, S. C., Sahoo, S. K., Chakraverty, A. P., and Maharana, H. S. (2014). "Progress of red mud utilization: An overview". American Chemical Science Journal, 49(3): 255-279.
- [5] Wang, S., Ang, H. M., and Tadé, M. O. (2008). "Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes". Chemosphere, 72(11): 1621-1635.
- [6] Al-Fakih, A., Mohamed Nor, Z., Inayath Basha, Sh., Nasiruzzaman Shaikh, M., Ahmad, Sh., Al-Osta, M. A., and Abdul Aziz, M. D. (2023). "Characterization and applications of red mud, an aluminum industry waste material, in the construction and building industries, as well as catalysis". The Chemical Record, 23: e202300039 (1 of 32).
- [7] Mi, H., Yi, L., Wu, Q., Xia, J., and Zhang, B. (2022). "A review of comprehensive utilization of red mud". Waste Management and Research, 40(11): 1594-1607.
- [8] Lingxiang, H., Chunlei, L. I., Haibin, W., Xingxing, L. I., Yongrong, Q. I., and Xuechen, Z. H. U. (2021). "Research progress on comprehensive utilization of red mud". Journal of Physics: Conference Series, vol. 2009, 3rd International Conference on Polymer Synthesis and Application (ICPSA 2021), 23-25 July 2021, Nanjing, China, 01202.
- [9] Gräfe, M., Power, G., and Klauber, C. (2011). "Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry". Hydrometallurgy, 108(1-2): 60-79.
- [10] Xie, W., Zhang, N., Li, J., Zhou, F., Ma, X., Gu, G., and Zhang, W. (2017). "Optimization of condition for extraction of aluminum and iron from red mud by hydrochloric acid leaching". Chinese Journal of Environmental Engineering, 11(10): 5677-5682.
- [11] Wei, D., Jun-Hui, X., Yang, P., Si-Yue, S., and Tao, C. (2021). "Iron Extraction from Red Mud using Roasting with Sodium Salt". Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 42(3): 153-161.
- [12] Grudinsky, P., Zinoveev, D., Yurtaeva, A., Kondratiev, A., Dyubnov, V., and Petelin, A. (2021). "Iron recovery from red mud using carbothermic roasting with addition of alkaline salts". Journal of Sustainable Metallurgy, 7: 858-873.
- [13] Liu, Z., and Li, H. (2015). "Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud—A review". Hydrometallurgy, 155: 29-43.
- [14] Safarian J., and Kolbeinsen L. (2016). "Smelting-reduction of bauxite for sustainable alumina
- در فازهای نرم‌تر مانند بوهمیت و نیز حذف نشانه‌های کربنات سدیم با افزایش زمان آسیاکاری مشاهده می‌شود.
- د) در محصولات جامد حاصل از تشویه قلیایی، نشانه فازهایی مانند NaAlSiO_4 ، NaAlO_2 و NaFeO_2 مشاهده شد که بیانگر وقوع واکنش‌های شیمیایی مربوط به فرآیند تشویه قلیایی در مخلوط‌های حاصل از آسیاکاری مکانیکی در اثر گرمایش است.
- ه) فرآیند فروشویی در آب داغ (دمای حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۶۰ دقیقه) برای انحلال فاز آلومینات سدیم (NaAlO_2) مؤثر بود. همچنین عدم مشاهده نشانه‌ای از این فاز در باقی‌مانده جامد حاصل از فروشویی، تأیید‌کننده تشکیل آن در اثر فرآیند تشویه قلیایی در مخلوط گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری است.
- و) نتایج آزمون شیمیایی به روش جذب اتمی، بیانگر ناچیز بودن مقدار آهن موجود در محلول فروشویی است. این امر نشان‌دهنده آن است که در فرآیند فروشویی محصول جامد حاصل از تشویه قلیایی در آب، آهن و ترکیبات محتوی آهن (اکسیدهای آهن) موجود، در گل قرمز حل نمی‌شوند.
- در نتیجه با استفاده از روش تشویه قلیایی گل قرمز-کربنات سدیم حاصل از آسیاکاری مکانیکی، می‌توان آلومینیوم موجود در گل قرمز را به فاز محلول در آب (آلومینات سدیم) تبدیل کرد. بنابراین با بهره‌گیری از این روش و سپس فروشویی محصول پس از گرمایش در آب داغ، امکان بازیابی آلومینیوم موجود در گل قرمز و جداسازی آن از سایر ناخالصی‌های گل قرمز، به‌ویژه اکسید آهن فراهم می‌شود.

۵- سپاس‌گزاری

این مقاله، بخشی از پایان‌نامه وحید نیک‌نژاد دانشجوی کارشناسی ارشد بوده و پژوهش مذکور در راستای برنامه جامع تحقیقاتی نویسنده مسئول مقاله است. نویسندگان مقاله از حمایت مالی و معنوی دانشگاه یاسوج و همکاری آزمایشگاه مرکزی دانشگاه یاسوج برای انجام این کار پژوهشی تشکر می‌کنند.

۶- مراجع

- [1] Klauber, C., Gräfe, M., and Power, G. (2011). "Bauxite residue issues: II. options for residue utilization". Hydrometallurgy, 108: 11-32.
- [2] Kumar, S., Kumar, R., and Bandopadhyay, A. (2006).

- R., and Withers, R. L. (1997). "An XRD and Electron Diffraction Study of Cristobalite-Related Phases in the $\text{NaAlO}_2\text{-NaAlSiO}_4$ System". Journal of Solid State Chemistry, 131(1997): 24-37.
- [27] Li, X-B., Liu, J. H., Wang, Y-L., Zeng, L., Peng, Z. H., Liu, G. H., Zhou, Q., and Qi, T. G. (2018). "Phase transformation of sodium hydrate alumino-silicate in alumina sintering process". Zhongguo Youse Jinshu Xuebao/Chinese Journal of Nonferrous Metals, 28(6): 1225-1232.
- [28] Nouri Kohan, O., Setoudeh, N., and Hayati, R. (2025). "Study the phase changes and formation conditions of the sodium aluminate phase in the alkaline roasting process of the bauxite under mechanical milling and heating conditions". Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 36(1): 29-48.
- [29] Niknezhad, V., Setoudeh, N., Hayati, R., and Pashangeh, Sh. (2025). "The phase changes in the red mud after heating and acid washing". 4th International Conference and 8th National Conference on Materials, Metallurgy, Mining, Feb. 5, 2025, Ahvaz, Iran. maei 2025-01450122.
- [30] Seifpanahi-Shabani, K., Abedi, A., and Tabari, M. (2019). "Application of bauxite waste as a nano-absorbent mineral to removal of copper and manganese metallic contaminants from the acid mine drainage". Journal of Mineral Resources Engineering, 4(3): 105-115.
- [31] Rahimi, S., and Irannajad, M. (2024). "Review on using red mud (waste of aluminum production process from bauxite) as an absorbent of various environmental contaminants". Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, 43(3): 25-50.
- [32] Navi, N., Karamoozian, M., and Khani, M. R. (2023). "Recovery of Iron from bauxite red mud by reduction roasting method". Journal of Mining and Environment, 14(4): 1295-1305.
- [33] Haddady, H., Setoudeh, N., Mohassel, A., and Hayati, R. (2024). "Investigating the effect of ball milling and heating processes on the phase changes of an Iranian type of bauxite". Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal), 42(4): 61-76.
- [34] Suryanarayana, C. (2004). "Mechanical Alloying and Milling". CRC Press, Marcel Dekker, 270 Madison Avenue, New York, NY 10016, USA.
- [35] Takeda, Y., Akagi, J., Edagawa, A., Inagaki, M., and Naka, S. (1980). "A preparation and polymorphic relations of sodium iron oxide (NaFeO_2)". Materials Research Bulletin, 15: 1167-1172.
- [36] Yanase, I., Onozawa, S., Ogasawara, K., and Kobayashi, H. (2018). "A novel application of α - and β -sodium ferrite as a CO_2 -capturing solid in air with water vapor". Journal of CO_2 Utilization, 24: 200-209.
- production". Smelting- In: Kongoli, F., Senchenko, A., Klein, B., Silva, A. C., Sun, C., Mingan, W., (Eds.), Sustainable Industrial Processing Summit SIPS 2016 Volume 5: Starkey Intl. Symp. / Mineral Processing, Volume 5, Montreal (Canada): FLOGEN Star Outreach, 149-158.
- [15] Zhu, X-F., Zhang, T-A., Wang, Y-X., Lü, G-Z., and Zhang, W-G. (2016). "Recovery of alkali and alumina from Bayer red mud by the calcification-carbonation method". International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 23(3): 257-268.
- [16] Cardenia, C., Balomenos, E., Wai, P., Tam, Y., and Panias, D. (2021). "A Combined soda sintering and microwave reductive roasting process of bauxite residue for iron recovery". Minerals, 11(2): 222.
- [17] Tam, P. W. Y., Panias, D., and Vassiliadou, V. (2019). "Sintering optimisation and recovery of aluminum and sodium from Greek bauxite residue". Minerals, 9(10): 571.
- [18] Khodadadi Bordboland, R., Azizi, A., and Khani, M. R. (2024). "Extracting alumina from a low-grade (Shale) bauxite ore using a sintering process with Lime-soda followed by alkali leaching". Journal of Mining and Environment (JME), 15(3): 1131-1148.
- [19] Ghaemmaghami, E., Samadzadeh Yazdi, M. R., Darvishi, M. A., Sadati, A. A., and Najafi, A. (2022). "Alumina extraction by lime-soda sinter process from low-grade bauxite soil of Semirom Mine". Journal of Mining and Environment (JME), 13(4): 1159-1169.
- [20] Sun, Y., Pan, A., Ma, Y., and Chang, J. (2023). "Extraction of alumina and silica from high-silica bauxite by sintering with sodium carbonate followed by two-step leaching with water and sulfuric acid". RSC Advances, 13: 23254-23266.
- [21] Yan, K., Guo, Y., Fang, L., Cui, L., F. Cheng, F., and Li, T. (2017). "Decomposition and phase transformation mechanism of kaolinite calcined with sodium carbonate". Applied Clay Science, 147: 90-96.
- [22] Liu, W., Sun, S., Zhang, L., Jahanshahi, S., and Yang, J. (2012). "Experimental and simulative study on phase transformation in Bayer red mud soda-lime roasting system and recovery of Al, Na and Fe". Minerals Engineering, 39: 213-218.
- [23] HSC, Version 6.12, Outotec Research Oy, (2007).
- [24] Sun, Y., Pan, A., Ma, Y., Chang, J., Li, K., and Hu, S. (2022). "Activation mechanism of diasporic bauxite calcined with sodium carbonate". Minerals Engineering, 187: 107782.
- [25] Pei, J., Pan, X., Zhang, Y., Yu, H., and Tu, G. (2021). "A novel process to fully utilize red mud based on low-calcium sintering". Journal of Environmental Chemical Engineering, 9: 106754.
- [26] Thompson, J. G., Melnitchenko, A., Palethorpe, S.

-
- ¹ Calcification–Carbonation
 - ² Soda sintering process
 - ³ Brunauer–Emmett–Teller
 - ⁴ Particle size analysis
 - ⁵ MERCK
 - ⁶ Simultaneous thermal analysis
 - ⁷ Thermogravimetric analysis
 - ⁸ Loss on ignition
 - ⁹ Atomic Absorption Spectroscopy