

Original Research Paper

Study of mineralogical and physicochemical properties of raw materials in brick production and their changes through final product: A case study of Nasrabad, Gorgan

Milad Rajabi¹, Fatemeh Asadi-Kord¹, Fariborz Masoudi^{1*}, Bahman Rahimzadeh¹, and Hamidreza Azadi²

¹Department of Mineral and Ground Water Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

²Marjan-Kar Production and Trading Company, Golestan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 February 16

Accepted: 2025 November 29

Available online: 2026 March 21

Keywords:

Mineralogy

Physicochemical properties

Brick

Loess

Clay

Gorgan

ABSTRACT

This research was conducted at Marjan-Kar Company to investigate the characteristics of raw materials used in brick production and their transformations during firing. The company's raw materials are sourced from Caspian Alluvial deposits, consisting of clay playa and loess in a 30:70 ratio. Mineralogical studies revealed that the main phases in both clay playa and loess units were similar, with differences in minor phases including hematite in clay playa and dolomite in loess. The clay playa unit was classified as Silty clay, while the loess unit fell into the Silty clay loam category. Higher concentrations of SiO₂, Al₂O₃, and Fe₂O₃ were observed in the clay playa, whereas greater amounts of CaO and LOI were found in the loess, with elevated Na₂O concentrations present in both units. During firing at 950°C, complete calcite decomposition occurred, leading to the formation of new phases such as anorthite, augite, and gehlenite, accompanied by an amorphous phase that plays a crucial role in the mechanical strength of the final product. Results indicated that the 70% loess and 30% clay playa composition is suitable for brick production. However, grain size optimization is essential: adding 7.8 to 14.1 kg of sand per 100 kg raw material brings sand content to the optimal 10-15% range while reducing plasticity index to 16-19%, thereby enhancing product quality without requiring fundamental process changes.

1. Introduction

Non-metallic minerals and mineral soils play a fundamental role in manufacturing industries, with their replacement being unfeasible even long-term. The brick industry, as a major consumer of clay minerals, annually uses 3.13 billion cubic meters of clay to produce 1,500 billion bricks globally (Wang et al., 2023), leading to various

environmental challenges (Madavi, 2022). Optimized exploitation of these resources is essential, focusing on producing higher quality products while adhering to sustainable development principles to minimize damage to natural reserves.


The quality of bricks depends primarily on their raw materials

* Corresponding author: Fariborz Masoudi; E-mail: F_masoudi@sbu.ac.ir

Citation:

Rajabi, M., Asadi-Kord, F., Masoudi, F., Rahimzadeh, B., and Azadi, H.R., 2026. Study of mineralogical and physicochemical properties of raw materials in brick production and their changes through final product: A case study of Nasrabad, Gorgan. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 36(1), 139, 39-56. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.506659.2181>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.506659.2181

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.3.1



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

and firing process. The raw material must contain specific proportions of clay and silt, sourced from shale, marl, or various clay types. While complete purity isn't necessary, the absence of harmful impurities is crucial (Karimpour, 1999). The mineralogical composition significantly influences final properties, with minerals like Kaolinite, Illite, and Montmorillonite contributing different characteristics Wang et al. (2023). Studies show that excess magnesium and calcium can cause defects like efflorescence and hairline cracks (Wang et al., 2023), while temperature variations between 800-1100°C create distinct structural changes in clay minerals (Wang et al., 2023).

In Iran's Golestan Province, Young Caspian deposits can be used as primary raw materials for brick production. At Nasrabad village in Gorgan, manufacturers use an empirical composition of 70% loess and 30% clay playa. Marjan-Kar Production and Trading Company employs tunnel kiln technology and automated production, though challenges like hairline cracks and efflorescence persist. This research concentrated on examine the physicochemical characteristics of raw materials and their transformations during firing to enhance product quality.

2. Research methodology

To investigate the mineralogical, chemical, and physical properties of mineral materials and examine the transformations after firing, a total of nine samples were collected from raw materials and products, with their specifications presented in Table 1.

Five soil samples were collected from different points of the mine and raw materials. To analyze the physical properties and grain size distribution of raw materials, three samples were sent to the Technical and Soil Mechanics Laboratory of Tehran Municipality. Mineralogical studies were conducted on five samples using semi-quantitative X-ray diffraction specifically for clay minerals (XRD clay Q), thin section preparation, and scanning electron microscopy (SEM). For chemical analysis of raw materials, five samples were examined using X-ray fluorescence (XRF) technique. To study the changes during the firing process, two samples were collected from the top and bottom of the tunnel kiln, along with one overburned brick sample and one efflorescent brick sample. Mineralogical studies were performed on four product samples using XRD, thin section preparation, and scanning electron microscopy (SEM). Chemical composition of products was studied on four samples using XRF. The XRD Clay Q, XRD, and XRF analyses were conducted at Kansaran Binaloud Company, while SEM analysis was performed at Shahid Beheshti University Science and Technology Park, and thin sections were prepared at Shahid Beheshti University.

The results from raw material analyses were compared and evaluated against relevant standards to present a complete and

valid characterization of raw material properties. These results were then compared with the factory product analyses to determine the changes occurring after the firing process.

3. Results

3.1. Raw Materials Analysis

This section presents the results obtained from raw material analyses, encompassing three main aspects: grain size distribution, mineralogy, and geochemistry.

- **Grain Size Distribution Analysis:** Grain size analysis was conducted according to ASTM D6913 (Standard Test Methods for Particle-Size Distribution of Soils Using Sieve Analysis) standard. The red clay unit contains 38 to 45% clay particles, 50-59% silt particles, and 1-7% sand particles. The yellow loess unit shows 30% clay particles, 67% silt particles, and 3% sand particles. Based on standard soil classification and particle size distribution plotted on the USDA (United States Department of Agriculture Soil Texture Classification System) Soil Texture diagram, the red clay unit falls into the Silty clay category, while the yellow loess unit is classified as Silty clay loam (Figure 3).

- **Mineralogy of Raw Materials:** Due to the powdery nature of raw materials and presence of clay minerals, thin sections were prepared using resin, and XRD Clay Q analysis method was employed. Due to the powdery nature of raw materials and presence of clay minerals, thin sections were prepared using resin, and XRD Clay Q analysis method was employed.

- **Petrography:** The yellow loess samples showed microcrystalline to cryptocrystalline texture, containing approximately 25% quartz ($\leq 40\mu\text{m}$), 15% calcite ($< 1\text{mm}$), 20% muscovite-sericite ($\leq 50\mu\text{m}$), and $< 5\%$ biotite. The red clay samples exhibited higher ratio of microcrystalline to cryptocrystalline matrix, with 20-30% iron oxide staining, 30% quartz ($\leq 40\mu\text{m}$), 25% muscovite-sericite, $< 5\%$ calcite, and minor amounts of biotite and chlorite (Figure 4).

- **Scanning Electron Microscopy (SEM):** SEM analysis revealed predominantly sheet-like and layered structures. Red clay samples showed more uniform particle sizes with distinct edges, while yellow soil samples exhibited coarser particles with greater void spaces, characteristic of porosity that directly correlates with reactivity (Figure 5).

- **Semi-Quantitative X-Ray Diffraction for Clay Minerals (XRD Clay Q):** XRD analysis identified main phases in both units: quartz (35% in red clay, 28% in yellow loess), albite (12% in red clay, 8% in yellow loess), calcite (5% in red clay, 15% in yellow loess), and orthoclase. Secondary phases varied between units, with red clay

containing muscovite-illite, chlorite, and hematite, while yellow loess included additional dolomite and hornblende.

- Raw Materials Geochemistry Using X-Ray Fluorescence

(XRF): The red clay samples contained average values of 64.6% SiO₂, 12.65% Al₂O₃, 6.5% Fe₂O₃, 2.79% CaO, and 6.31% L.O.I. The yellow loess averaged 51.38% SiO₂, 9.8% Al₂O₃, 4.87% Fe₂O₃, 13.76% CaO, and 13.635% L.O.I. Na₂O content exceeded standard limits in most samples, except one (0.09%).

3.2. Product Analysis Results

This section presents the results obtained from product analyses, which includes two parts: mineralogy and geochemistry.

- **Mineralogy:** Products were heated to 950°C during firing, causing clay minerals to collapse through structural water loss. Phase percentages were qualitatively assessed.

- **Petrography:** Thin section examination revealed approximately 70% amorphous matrix, with 12-15% quartz, 5% plagioclase, and 2-3% alkali feldspar. Sample M.F-17 (overburned brick) showed distinctive bubbles up to 500 microns and increased amorphous content (Figure 6).

- **Scanning Electron Microscopy (SEM):** Tunnel kiln samples showed uniform porous textures with fine pores and strong particle connections. The efflorescent brick exhibited spongy structure with irregular voids, while the overburned brick displayed melted, glassy structure with reduced porosity (Figure 7).

- **X-Ray Diffraction (XRD):** Analysis showed quartz remaining as the main phase, with formation of Anorthite, Gehlenite, and Augite (Figure 8). Clay minerals disappeared in samples M.F17 and M.F18, while amorphous phase appeared in all fired samples. Goethite emerged in samples M.F15 and M.F18, with hematite present only in M.F17.

- Product Geochemistry Using X-Ray Fluorescence (XRF):

Analysis showed increased SiO₂ (59.33% to 62.29%) and CaO (6.51% to 11.90%) content, with significant LOI reduction (9.65% to 0.67%). Changes in Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, and MgO indicated structural modifications and new phase formation during firing.

4. Discussions

Based on grain size analysis, sand content can be increased by 10 to 15%. Wang et al. (2023) demonstrated that samples with less than 5% sand exhibit lower compressive strength (15-18 MPa) compared to samples containing 15-20% sand (25-30 MPa). Guzlena et al. (2019) found that 15% sand reduces cracking and

water absorption. Petrographic results showed the yellow loess unit has microcrystalline to cryptocrystalline texture, while the red clay unit shows higher microcrystalline to cryptocrystalline matrix ratio. Cheng et al. (2024) reported that increased crystallinity improves flexural strength after firing, while cryptocrystalline matrix increases reactivity during firing, potentially leading to hairline cracks. XRD analysis revealed quartz (35% in red clay, 28% in yellow loess), albite (12% in red clay, 8% in yellow loess), calcite (5% in red clay, 15% in yellow loess), and orthoclase (8% in red clay, 6% in yellow loess). Shrigire et al. (2024) showed optimal quartz ratio (30-35%) reduces porosity. Ma et al. (2018) reported feldspars reduce firing temperature by 80-100 degrees. These minerals act as natural fluxes, improving sintering and reducing porosity, thus enhancing strength and reducing water absorption. However, excessive amounts can cause expansion and deformation during firing. XRF analysis indicated silica content in some red clay samples exceeds the standard range (40-60%). While high silica increases hardness, it can lead to brittleness and reduced flexibility. Zhang et al. (2023) showed excessive silica causes unbalanced thermal expansion and hairline cracks. High CaO (12.8%) and LOI (15.6%) in yellow loess were reported. Sokolar (2010) showed samples with CaO above 10% exhibit greater post-firing expansion, increased cracking, and reduced compressive strength. Iron oxides affect color and melting point, while high alkalis can cause premature melting, deformation, and efflorescence. Petrographic studies on products show significant changes compared to raw materials. An amorphous matrix constitutes approximately 70% of sample volume. Sample M.F-17 shows distinctive bubbles up to 400 microns, occupying 30% of sample volume. Elert et al. (2003) reported irregular bubbles larger than 100 microns can reduce compressive strength. The presence of scattered micas and feldspars indicates incomplete decomposition during firing. XRD analysis of products revealed complete calcite decomposition and formation of new phases including anorthite, gehlenite, and augite. Cheng et al. (2012) showed anorthite formation increases compressive strength. Jordan et al. (2001) reported gehlenite presence improves frost resistance. Dondi et al. (1999) indicated the amorphous phase formed above 900°C plays a key role in reducing water absorption and increasing chemical resistance. SEM studies showed significant morphological changes after firing. Dondi et al. (1999) reported spherical and connected pores (1-5 microns) improve frost resistance. Yang et al. (2021) demonstrated particle bridges through partial melting enhance final strength. Sample M.F-17 (overburned brick) shows severe melting and glassy structure formation, leading to complete porosity loss and deep cracking. XRF analysis of products shows significant compositional changes after firing. Tite and Maniatis (1975) reported LOI reduction indicates complete carbonate decomposition and structural water release. Peters and Iberg (1978)

found relative SiO_2 and Al_2O_3 increases result from weight loss due to volatile material release. Trindade et al. (2009) showed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratio of 5-5.5 contributes to optimal aluminosilicate phase formation. Based on grain size analysis, clay and loess contents are within standard range, but sand content (3%) is below the optimal range (10-15%). From a chemical perspective, the 70:30 ratio is approximately within Iranian National Standard 1162 range, except Na_2O content exceeds the standard limit. Therefore, adding 10-15% sand with controlled chemical composition can optimize both sand percentage and Na_2O content, simultaneously bringing grain size distribution and plasticity index into optimal ranges. Phase transformation mechanisms during firing occur in three stages: 100-200°C (removal of surface water), 400-650°C (structural water loss and primary mineral collapse), and 700-950°C (carbonate decomposition and new phase formation). New gehlenite phase improves compressive strength and thermal resistance. Anorthite formation creates strong bonds improving flexural and tensile strength. Amorphous phase formation creates uniform structure reducing porosity and permeability. Temperatures exceeding 950°C or accumulation of flux elements causes excessive amorphous phase formation, eliminating standard brick properties.

5. Conclusion

This research evaluated the physicochemical and mineralogical characteristics of raw materials and their transformations during firing at Marjankar Company. Results demonstrated that the 70% loess and 30% clay playa composition is fundamentally suitable from mineralogical and chemical perspectives but requires grain size optimization.

Mineralogical studies revealed similar main phases in both units, with differences in minor phases including hematite in clay

playa and dolomite in loess. Geochemically, higher SiO_2 , Al_2O_3 , and Fe_2O_3 concentrations were observed in clay playa, while greater CaO and LOI amounts were found in loess. Elevated Na_2O concentration in both units exceeds standard limits and can cause efflorescence.

During firing at 950°C, complete calcite decomposition occurred, forming new phases including anorthite, gehlenite, and augite with an amorphous phase that play fundamental roles in mechanical strength, thermal resistance, and reduced water absorption.

The most important finding relates to grain size optimization. Current sand content (3%) is significantly below the standard range (10-15%). By adding 7.8 to 14.1 kg of sand per 100 kg raw material, sand content reaches the optimal 10-15% range, adjusting clay ratio to 30-35% and loess to 50-55%, which fall within national standards. This modification reduces plasticity index from 22% to the optimal 16-19% range.

Sand addition in these amounts provides several advantages: reduced stickiness and improved workability during forming, decreased shrinkage during drying and firing leading to fewer hairline cracks, increased compressive strength through balanced structure, and reduced water absorption. Using sand with controlled chemical composition (low Na_2O) can reduce total sodium concentration below 1%, eliminating efflorescence.

This study demonstrated that through a simple and cost-effective modification—adding 10-15% quality-controlled sand to the existing 70% loess and 30% clay composition—product quality can be significantly enhanced without requiring fundamental changes to the production process or raw material sources. This optimization produces bricks with higher strength, lower water absorption, free from hairline cracks and efflorescence, while utilizing soil resources more efficiently and adhering to sustainable development principles.

مطالعه ویژگی‌های کانی‌شناسی و فیزیکوشیمیایی مواد اولیه تولید آجر و تغییرات آن در طول تهیه محصول نهایی: مطالعه موردی نصر آباد، گرگان

میلاذ رجبی^۱، فاطمه اسدی‌گردد^۱، فریبرز مسعودی^{۱*}، بهمن رحیم‌زاده^۱، حمیدرضا آزادی^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ شرکت تولیدی و بازرگانی مرجان‌کار، گلستان، ایران

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی ویژگی‌های مواد اولیه تولید آجر و تغییرات آن طی فرایند پخت، در شرکت مرجان‌کار انجام گردید. مواد اولیه شرکت از نهشته‌های کواترنری دشت گرگان، شامل کفه رسی و لس با ترکیب ۳۰ به ۷۰ تامین می‌گردد. مطالعات کانی‌شناسی نشان داد فازهای اصلی در واحدهای کفه رسی و لس مشابه بوده، با تفاوت‌هایی در فازهای فرعی شامل حضور هماتیت در کفه رسی و دولومیت در لس. واحد کفه رسی در دسته Silty clay loam و لس در دسته Silty clay قرار گرفت. غلظت بالاتر Fe_2O_3 ، SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 در کفه رسی و مقادیر بیشتر CaO و LOI در لس و غلظت بالای Na_2O در هر دو واحد مشاهده گردید. طی فرایند پخت در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، تجزیه کامل کلسیت و تشکیل فازهای جدید آنورتیت، اوژیت و ژلنیت به همراه فاز بی‌شکل (آمورف) مشاهده شد که نقش اساسی در استحکام مکانیکی محصول نهایی دارند. نتایج نشان داد ترکیب ۷۰ درصد لس و ۳۰ درصد کفه رسی برای تولید آجر مناسب است، اما افزودن ۱۰ الی ۱۵ درصد ماسه با ترکیب شیمیایی کنترل شده، برای بهبود خواص محصول نهایی پیشنهاد می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

کانی‌شناسی

ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی

آجر

لس

رسی

گرگان

۱- پیش‌نوشتار

صحت و علمی منابع خاک در صنعت آجر، نه تنها ضامن تداوم این صنعت کهن است، بلکه گامی اساسی در جهت حفظ محیط زیست و توسعه پایدار کشور به‌شمار می‌رود (رجبی، ۱۴۰۳).

کیفیت و مرغوبیت آجر به مواد اولیه و شیوه پخت آن بستگی دارد. ماده اولیه در فرایند تولید آجر باید حاوی نسبت‌های معینی از رس و لس باشد؛ این ماده می‌تواند از منابع گوناگونی چون شیل، مارن و انواع رس‌ها استحصال گردد. نکته شایان توجه آن است که خاک مورد استفاده در صنعت آجر لزوماً نیاز به خلوص کامل ندارد، اما باید عاری از ناخالصی‌های مضر باشد (کریم‌پور، ۱۳۷۸). ترکیب کانی‌شناسی خاک‌های رسی نقش تعیین‌کننده‌ای در خواص نهایی آجر دارد. حضور کانی‌های رسی مختلف مانند کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت، هر کدام ویژگی‌های متفاوتی به محصول

کانی‌های غیرفلزی و خاک‌های معدنی نقشی بنیادین در صنایع تولیدی ایفا می‌کنند، به گونه‌ای که جایگزینی کامل آن‌ها حتی در افق زمانی بلندمدت امکان‌پذیر نمی‌باشد. صنعت آجر به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده کانی‌های رسی، سالانه حدود ۳/۱۳ میلیارد مترمکعب خاک رس برای تولید ۱۵۰۰ میلیارد آجر در سطح جهان مصرف می‌کند (Wang et al, 2023). این میزان مصرف، چالش‌های زیست‌محیطی متعددی را در پی داشته است (Madavi, 2022). ضروری است که بهره‌برداری از این منابع ارزشمند با رویکردی بهینه و هدفمند صورت پذیرد. این امر مستلزم تمرکز بر تولید محصولاتی با کیفیت برتر است، به گونه‌ای که صنعت آجر همگام با اصول توسعه پایدار کشور پیش رود و برداشت و مصرف خاک در طول سالیان متمادی، کمترین آسیب را به ذخایر طبیعی کشور وارد سازد. مدیریت

* نویسنده مسئول: فریبرز مسعودی؛ E-mail: F_masoudi@sbu.ac.ir

ماخذنگاری:

رجبی، م.، اسدی‌گردد، ف.، مسعودی، ف.، رحیم‌زاده، ب.، آزادی، ح.ر.، ۱۴۰۵، مطالعه ویژگی‌های کانی‌شناسی و فیزیکوشیمیایی مواد اولیه تولید آجر و تغییرات آن در طول تهیه محصول نهایی: مطالعه موردی نصرآباد، گرگان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶(۱)، ۳۹-۵۶. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.506659.2181>

doi: 10.22071/gsj.2025.506659.2181



doi: 20.1001.1.10237429.1405.36.1.3.1

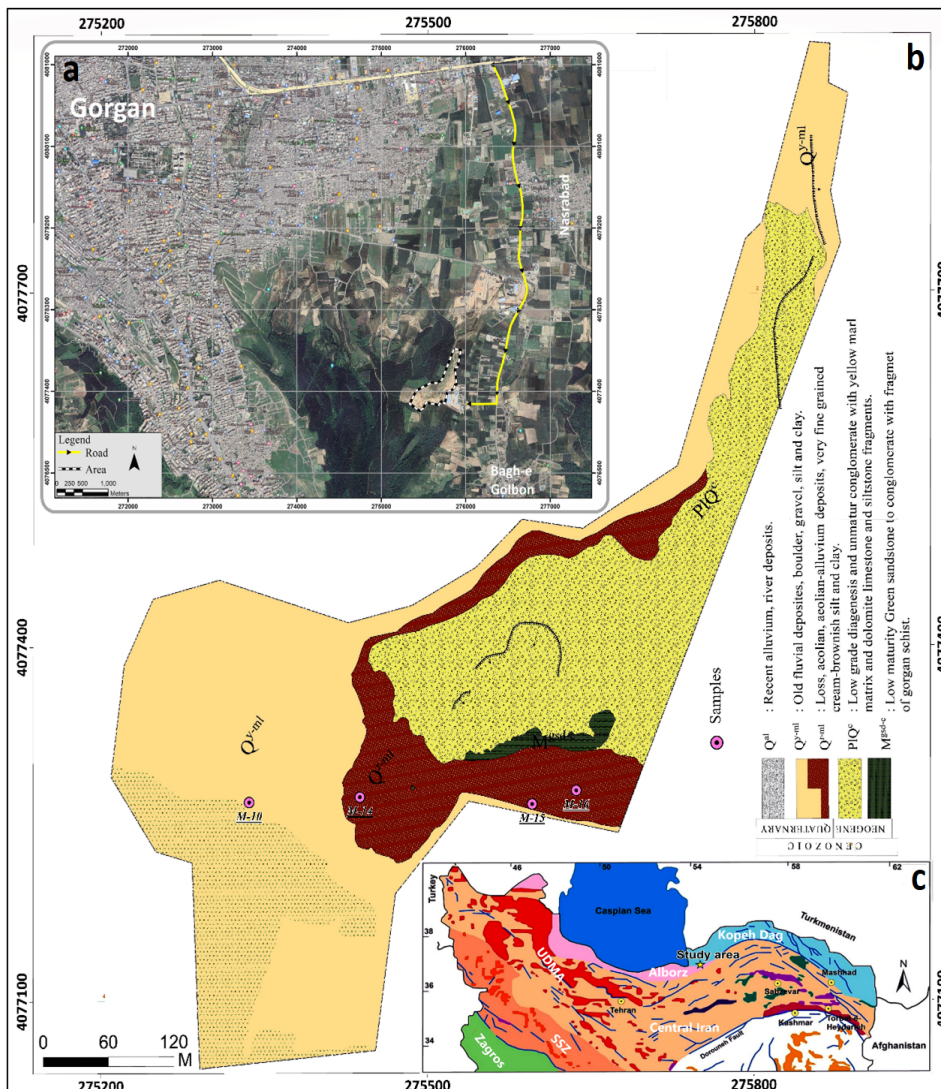
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

(شکل ۱-ا)، با مختصات "۵۸/۱۸' ۴۸° ۳۶' عرض جغرافیایی و "۷/۳۱' ۲۹° ۵۴' طول جغرافیایی در دامنه شمالی پهنه البرز خاوری واقع شده است (شکل ۱-ب) که از دیدگاه تاریخیچه زمین‌شناسی و ژئودینامیکی، دو فاز کوهزایی سیمیرین و آلی را تجربه کرده است (درویش‌زاده، ۱۳۸۹). تنوع زمین‌شناسی در بخش شمالی محدوده که به دشت گرگان منتهی می‌شود، شامل نهشته‌های کواترنری می‌باشد. در بخش جنوبی، کهن‌ترین سنگ‌ها مربوط به شیست‌های گرگان با سن اردووسین تا سیلورین بوده و جوان‌ترین آن‌ها رسوبات بستر رودخانه‌های کنونی است (صبوری، ۱۳۷۸). شیست‌های گرگان از درجات متفاوت دگرگونی برخوردارند و همراه با توده‌های آذرین دگرگون شده مشاهده می‌شوند. سازند شمشک، متعلق به تریاس پسین - ژوراسیک پیشین، به‌طور عمده از شیل و ماسه‌سنگ تشکیل شده است. لس‌ها بخش عمده‌ای از سنگ‌ها و سازندهای قدیمی‌تر را پوشانده‌اند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که با بالآمدگی البرز و دگرشکلی پوسته طی دو فاز کوهزایی بیان شده، فرسایش پس از کوهزایی رخ داده و مواد تخریبی با رخساره کنگلومرایی در پای دامنه‌ها انباشته شده‌اند. این رسوبات، به‌احتمال، معادل سازند هزار دره با سن پلیوسن-پلیستوسن هستند. پوشش لسی روی این رخساره مولاسی، سن پلیستوسن و جوان‌تر را برای لس‌ها پیشنهاد می‌کند (سعیدی و فراهانی، ۱۳۹۶). براساس مشاهدات صحرائی در محدوده مورد نظر ۴ واحد مجزا وجود دارد که شامل کنگلومرایی سبز رنگ تشکیل شده از شیست‌های گرگان، واحد کنگلومرایی زرد رنگ با سنگ شدگی درجه پایین، واحدهای لس زرد و واحد رس قرمز می‌باشد (شکل ۱-ب).

نهایی می‌بخشد (Yuan et al., 2022). به عنوان مثال، کانولینیت سبب افزایش مقاومت حرارتی و ایلیت موجب بهبود استحکام مکانیکی آجر می‌شود. آنالیز دقیق ترکیب شیمیایی و توزیع دانه‌بندی مواد اولیه، پیش‌نیاز اساسی برای تولید آجر با کیفیت است. مطالعات نشان داده که حضور بیش از حد مجاز برخی عناصر مانند منیزیم و کلسیم می‌تواند به بروز عیوبی مانند سفیدک و ترک‌های مویی بیانجامد (Wang et al, 2023). فرایند پخت و دمای آن تاثیر مستقیمی بر تشکیل فازهای جدید و در نتیجه خواص فیزیکی-مکانیکی آجر دارد. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات دمایی در محدوده ۸۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات ساختاری متفاوتی در کانی‌های رسی ایجاد می‌کند (Wang et al, 2023). سابقه صنعت آجر در ایران به بیش از ۷۰۰۰ سال پیش باز می‌گردد و می‌توان ایران را جزو اولین‌های صنعت آجر دانست (اسدی، ۱۴۰۳). در استان گلستان، نهشته‌های خزر جوان به‌عنوان منبع اصلی مواد اولیه صنعت آجر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. روستای نصرآباد گرگان، یکی از قطب‌های تولید آجر در این منطقه به‌شمار می‌رود که در آن، ترکیب تجربی ۷۰ درصد لس و ۳۰ درصد کفه رسی به‌عنوان ماده اولیه استفاده می‌شود. شرکت تولیدی و بازرگانی مرجان‌کار با بهره‌گیری از فناوری کوره تونلی و خط تولید تمام اتوماتیک، محصولاتی با کیفیت برتر تولید می‌کند، هرچند چالش‌هایی مانند ترک‌های مویی و سفیدک‌های پراکنده همچنان وجود دارد. این پژوهش با هدف بررسی جامع خصوصیات فیزیکوشیمیایی مواد اولیه و تغییرات آن طی فرایند پخت، به منظور ارتقای کیفیت محصول نهایی انجام شده است. محدوده مورد بررسی در استان گلستان و ۳ کیلومتری جنوب خاور شهر گرگان

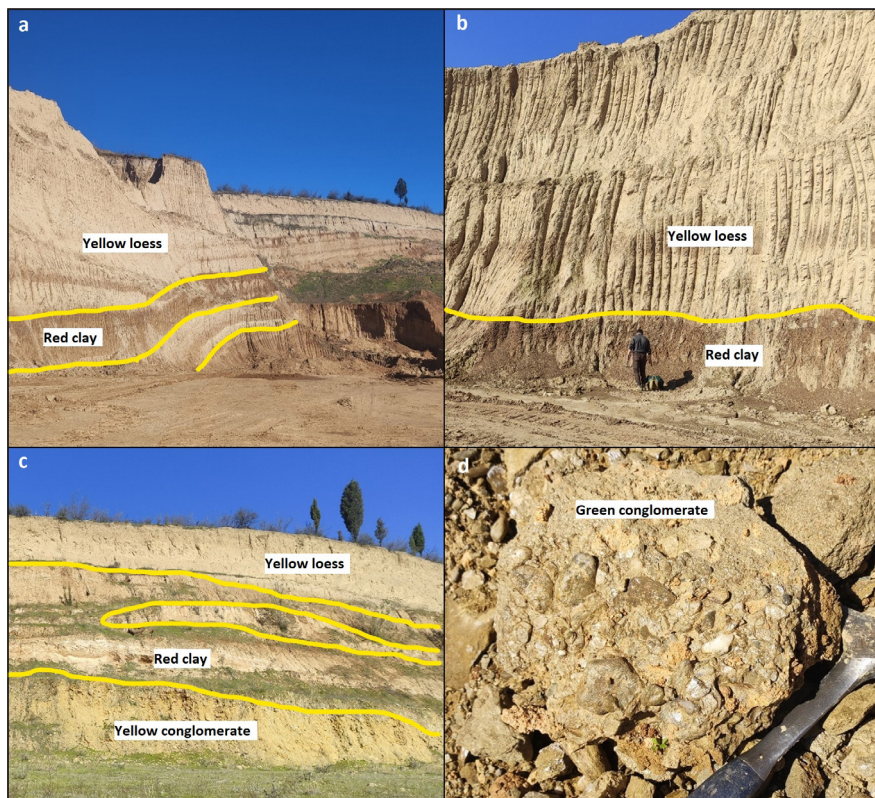


شکل ۱-ا) مسیر دسترسی به محدوده (b) نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه با مقیاس ۱:۱۰۰۰ به همراه نقاط نمونه‌برداری؛ (c) موقعیت محدوده در پهنه‌های ساختاری ایران (Stocklin, 1968).

Figure 1. a) Access road to the study area; b) Geological map of the studied area with a scale of 1:1000; c) location of study area in structural zone of Iran (Stocklin, 1968).

واحدهای تامین کننده مواد اولیه آجرسازی رسوبات کواترنری شامل واحد کفه رسی قرمز رنگ و واحد لس زرد رنگ هستند. واحد کفه رسی قرمز بر روی واحد کنگلومرای زرد قرار گرفته و به تدریج به واحد لس زرد تبدیل می‌شود. ستبرای واحد رسی قرمز بین ۱ تا ۱۰ متر متغیر است، در حالی که واحد لس زرد ستبرایی بین ۴ تا ۱۲ متر دارد (شکل ۲-ا). هر دو واحد رس قرمز و لس زرد فاقد کانی‌های قابل مشاهده در نمونه دستی هستند. رنگ قرمز کم‌رنگ واحد رسی می‌تواند نشان‌دهنده محیط اکسیدان قاره‌ای و غنی از آهن باشد. شیب هر دو واحد از توپوگرافی قدیمی پیروی می‌کند (شکل ۲-ب) و در نمونه دستی ذرات بسیار ریز و غیر قابل تشخیص هستند. واحد کنگلومرای زرد رنگ عمدتاً شامل آهک-دولومیت و ماسه سنگ‌های مزوزوییک است و عموماً رنگ روشنی دارد که معادل سازند هزار دره می‌باشد (سعیدی و فراهانی، ۱۳۹۶) که در زیر لس‌ها آشکار می‌گردند (شکل ۲-د). بی‌نظمی رسوبات و عدم گردشگی و جورشدگی، تا حدودی رسوبات دوران یخبندان و یخچالی را تداعی می‌کند. واحد کنگلومرای سبز رنگ، محصول حمل مواد از بخش‌های شمالی البرز است. جورشدگی و گردشگی ضعیف و فلسی شدن زیادی در قطعات دیده می‌شود که مرتبط به سنگ مادر دگرگونی است (شکل ۲-ج). تغییرات سنگ‌شناختی و رنگی بین واحدها می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات در شرایط محیطی و اقلیمی طی دوره رسوب‌گذاری باشد. بر پایه بررسی‌های انجام شده نهشته‌های لس و رس این منطقه را می‌توان معادل و هم‌ارز نهشته‌های خزر جدید دانست. بر پایه وجود دو کفه‌ای‌ها و شکم‌پایان و تطبیق ناحیه‌ای آن جانوران در خزر میانی و شمالی (نرم‌تن آب شور) سن این نهشته‌ها عهد حاضر می‌باشد (سعیدی و فراهانی، ۱۳۹۶).

واحدهای تامین کننده مواد اولیه آجرسازی رسوبات کواترنری شامل واحد کفه رسی قرمز رنگ و واحد لس زرد رنگ هستند. واحد کفه رسی قرمز بر روی واحد کنگلومرای زرد قرار گرفته و به تدریج به واحد لس زرد تبدیل می‌شود. ستبرای واحد رسی قرمز بین ۱ تا ۱۰ متر متغیر است، در حالی که واحد لس زرد ستبرایی بین ۴ تا ۱۲ متر دارد (شکل ۲-ا). هر دو واحد رس قرمز و لس زرد فاقد کانی‌های قابل مشاهده در نمونه دستی هستند. رنگ قرمز کم‌رنگ واحد رسی می‌تواند نشان‌دهنده محیط اکسیدان قاره‌ای و غنی از آهن باشد. شیب هر دو واحد از توپوگرافی قدیمی پیروی می‌کند (شکل ۲-ب) و در نمونه دستی ذرات بسیار ریز و غیر قابل تشخیص هستند. واحد کنگلومرای زرد رنگ عمدتاً شامل آهک-دولومیت و ماسه سنگ‌های مزوزوییک است و عموماً رنگ روشنی دارد که معادل سازند هزار دره می‌باشد (سعیدی و فراهانی، ۱۳۹۶) که در زیر لس‌ها آشکار می‌گردند (شکل ۲-د). بی‌نظمی رسوبات و عدم گردشگی و جورشدگی، تا حدودی رسوبات دوران یخبندان و یخچالی را تداعی می‌کند. واحد کنگلومرای سبز رنگ، محصول حمل مواد از بخش‌های شمالی البرز است. جورشدگی و گردشگی ضعیف و فلسی شدن زیادی در قطعات دیده می‌شود که مرتبط به سنگ مادر دگرگونی است (شکل ۲-ج). تغییرات سنگ‌شناختی و رنگی بین واحدها می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات در شرایط محیطی و اقلیمی طی دوره رسوب‌گذاری باشد. بر پایه بررسی‌های انجام شده نهشته‌های لس و رس این منطقه را می‌توان معادل و هم‌ارز نهشته‌های خزر جدید دانست. بر پایه وجود دو کفه‌ای‌ها و شکم‌پایان و تطبیق ناحیه‌ای آن جانوران در خزر میانی و شمالی (نرم‌تن آب شور) سن این نهشته‌ها عهد حاضر می‌باشد (سعیدی و فراهانی، ۱۳۹۶).



شکل ۲- (a) ستبرای و رسوب‌گذاری بین‌انگشتی دو واحد لس زرد و رس قرمز. (b) شیب رسوب‌گذاری واحدهای لس زرد و رس قرمز. (c) رخمون واحد کنگلومرای زرد در زیر رسوبات. (d) نمای نزدیک واحد کنگلومرای سبز.

Figure 2. a) Thickness and interfingering depositional of the yellow loess and red clay units. b) Depositional slope of yellow loess and red clay units. c) Outcrop of the yellow conglomerate unit beneath the red deposits. d) Close-up view of green conglomerate unit.

۲- روش پژوهش

کانی‌شناسی با روش‌های پرتو ایکس نیمه کمی مخصوص کانی‌های رسی (XRD clay Q)، تهیه مقطع نازک و میکروسکوپ الکترونی (SEM) بر روی ۵ نمونه انجام گردید. به دلیل پودری بودن مواد اولیه، تهیه مقاطع با استفاده از رزین انجام شد؛ همچنین به دلیل وجود کانی‌های رسی در نمونه‌ها برای آنالیز پراش پرتو ایکس از روش XRD Clay Q استفاده شد، زیرا کانی‌های رسی در طول فرایند آنالیز XRD با از دست دادن آب بافتی، فروپاشیده و قابل تشخیص نیستند.

برای تحلیل شیمیایی مواد اولیه ۵ نمونه با استفاده از روش فلورسانس پرتو ایکس

به منظور بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی، شیمیایی و فیزیکی مواد معدنی و همچنین بررسی تغییرات ایجاد شده پس از پخت در محصولات، در مجموع، تعداد ۹ نمونه از مواد اولیه و محصولات برداشت گردید که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

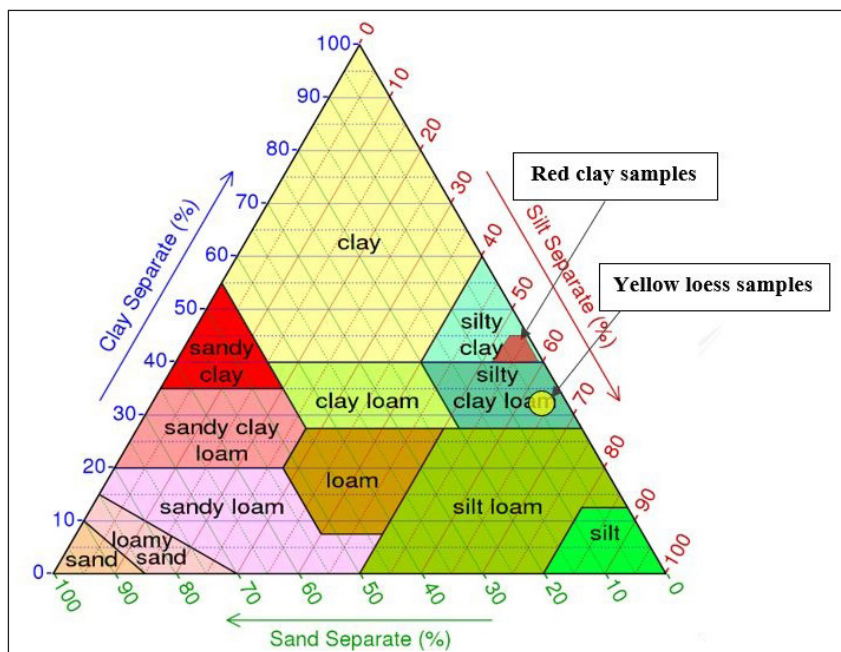
تعداد ۵ نمونه رسوب از نقاط مختلف معدن و مواد اولیه تهیه شد که ۴ نمونه از معدن برداشت شده (شکل ۱-ب) و یک نمونه (M-18) از خط تولید برداشت گردید. جهت بررسی ویژگی‌های فیزیکی و دانه‌بندی مواد اولیه، ۳ نمونه به آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک شهرداری تهران ارسال گردید. مطالعات

در بازه ۱۰ الی ۱۵ درصد قرار گیرد. افزودن ماسه به ترکیب مواد اولیه نه تنها دانه‌بندی را به محدوده استاندارد می‌رساند، بلکه سبب کاهش شاخص خمیری نیز می‌گردد. در مورد نمونه M-18 با ترکیب اولیه ۳۸ درصد رس، ۵۹ درصد لس و ۳ درصد ماسه و شاخص خمیری ۲۲ درصد، با افزودن ۷/۸ کیلوگرم ماسه به هر ۱۰۰ کیلوگرم ماده اولیه برای رسیدن به ۱۰ درصد ماسه، میزان رس به ۳۵/۳ درصد و لس به ۵۴/۷ درصد کاهش می‌یابد و شاخص خمیری به حدود ۱۸ تا ۱۹ درصد می‌رسد. همچنین با افزودن ۱۴/۱ کیلوگرم ماسه به هر ۱۰۰ کیلوگرم ماده اولیه برای رسیدن به ۱۵ درصد ماسه، میزان رس به ۳۳/۳ درصد و لس به ۵۱/۷ درصد کاهش یافته و شاخص خمیری به محدوده ۱۶ تا ۱۷ درصد نزدیک می‌شود که در مرز بالایی محدوده بهینه قرار می‌گیرد (Agbede and Joel, 2011). این بهینه‌سازی ترکیب مواد اولیه به طور همزمان هم دانه‌بندی و هم خواص خمیری خاک را به محدوده‌های استاندارد می‌رساند که به بهبود استحکام فشاری، کاهش جذب آب و افزایش پایداری ابعادی آجر تولیدی خواهد انجامید.

بر اساس طبقه‌بندی استاندارد خاک‌ها و با توجه به توزیع اندازه ذرات و قرار دادن آن در نمودار (United States Department of Agriculture) USDA Soil Texture Classification System) واحد خاک رس قرمز در دسته Silty clay و واحد لس زرد در دسته Silty clay loam قرار می‌گیرند (شکل ۳). این طبقه‌بندی نشان‌دهنده چیره بودن ذرات ریزدانه در هر دو واحد است که می‌تواند بر خواص پلاستیسته و شکل‌پذیری مواد اولیه کارخانه تاثیرگذار باشد.

درصد) حاصل می‌شود (Agbede and Joel, 2011). شاخص خمیری تاثیر مستقیم بر استحکام فشاری، جذب آب، انقباض خطی و پایداری ابعادی آجرهای رسی دارد (Akintola et al., 2024). نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش دارای حد روانی بین ۳۴ تا ۴۲ درصد، حد خمیری بین ۱۳ تا ۱۸ درصد و شاخص خمیری بین ۲۱ تا ۲۴ درصد بودند که محدوده حد روانی در بازه توصیه‌شده ۲۵ تا ۴۷/۷ درصد قرار می‌گیرد اما شاخص خمیری تمام نمونه‌ها بالاتر از محدوده بهینه است. شاخص خمیری بالاتر از حد مطلوب می‌تواند به انقباض بیش از حد در مراحل خشک‌شدن و پخت، نیاز به کنترل دقیق‌تر رطوبت در فرایند تولید و کاهش استحکام فشاری نهایی بیانجامد.

در نتایج به‌دست آمده میزان رس در بازه استاندارد قرار داشته و میزان لس با ترکیب کردن این دو خاک با درصد ۷۰ به ۳۰ از لس زرد و رس قرمز نیز در بازه استاندارد قرار گرفت. میزان ماسه می‌تواند متناسب با استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۶۲ «خاک - خاک رس جهت ساخت آجر رسی - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون» (بین ۱۰ تا ۱۵ درصد) افزایش یابد که با افزایش ماسه به میزان ۱۰ درصد، میزان رس باید بین ۳۰ تا ۴۵ و لس بین ۴۵ تا ۶۰ درصد تغییر یابد تا حد مطلوب به‌دست آید؛ این نسبت برای افزودن ۱۵ درصد ماسه برابر با ۳۰ تا ۴۵ درصد رس و ۴۰ تا ۵۵ درصد لس می‌باشد (استاندارد ملی ایران، ۱۳۸۴). همچنین برای استاندارد سازی ترکیب مورد استفاده در خط تولید (نمونه M-18) می‌توان بدون تغییر درصدهای ماده اولیه، بین ۷/۸ تا ۱۴/۱ کیلوگرم ماسه را با ۱۰۰ کیلوگرم ماده اولیه ترکیب کرد تا میزان ماسه



شکل ۳- محل قرارگیری نمونه رس قرمز و لس زرد در نمودار USDA Soil Texture براساس آزمون دانه‌بندی مصالح.

Figure 3. Location of red clay and yellow loess samples in the USDA Soil Texture chart based on the results of particle size distribution of soils analysis.

کانی‌های قابل مشاهده را کوارتز به صورت بی‌شکل تشکیل می‌دهد که با خاموشی موجی قابل تشخیص است. اندازه دانه‌های کوارتز بیشینه ۴۰ میکرون می‌باشد. کلسیت در بخش‌هایی از نمونه‌ها به صورت تجمعی و بی‌شکل مشاهده می‌گردد و در نقاط محدودی رخ‌های آن به سختی قابل تشخیص است. این کانی حدود ۱۵ درصد از کانی‌های قابل تشخیص را تشکیل داده است و اندازه بلورهای آن کوچک‌تر از

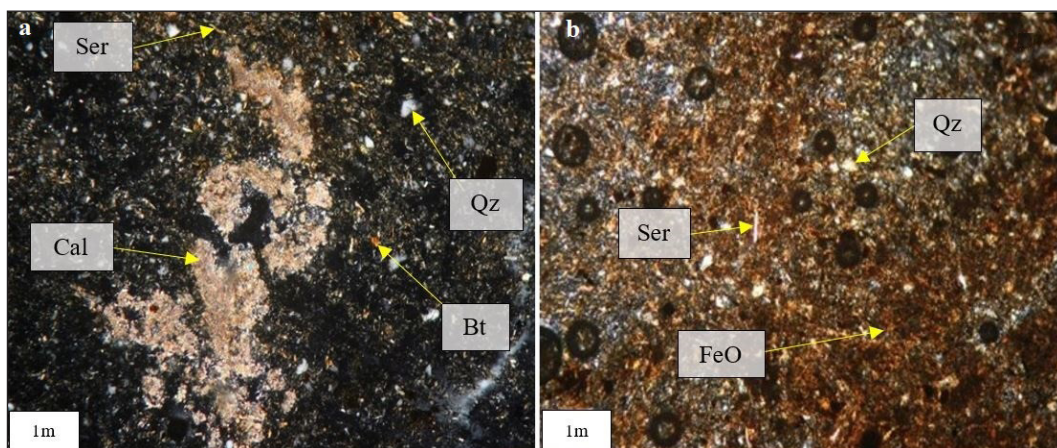
۳-۱-۲- کانی‌شناسی مواد اولیه

— سنگ‌نگاری: در مطالعات میکروسکوپ نوری که بر روی نمونه‌های لس زرد انجام گردید، مشخص شد بافت این واحد عموماً میکروکریستالین تا کریستوکریستالین است. کانی‌های قابل تفکیک در زیر میکروسکوپ شامل کوارتز، کلسیت، مسکوویت-سرسیت و بیوتیت می‌باشند. به صورت میانگین حدود ۲۵ درصد از

مسکوویت-سرسیت، کلسیت، بیوتیت و در بخش‌های محدودی کلریت است. کوارتز در این نمونه‌ها به صورت بی‌شکل و در اندازه‌های کوچک‌تر از ۴۰ میکرون مشاهده می‌گردد که در نور پلاریزه با خاموشی موجی قابل تشخیص است و حدود ۳۰ درصد از کانی‌های قابل مشاهده را این کانی تشکیل داده است. بلورهای مسکوویت و سرسیت در مقاطع به شکل سوزنی قابل مشاهده‌اند و ابعاد بیشینه آن‌ها به حدود ۴۰ میکرون می‌رسد که تقریباً ۲۵ درصد از مقطع را شامل می‌شوند. کلسیت به مقدار کمتر از ۵ درصد به صورت بی‌شکل مشاهده گردید که به شکل تجمعی از بلورهای ریز همراه با سرسیت و بیوتیت است. بیوتیت با بلورهای نیمه‌شکل‌دار در برخی نمونه‌ها به مقدار کمتر از یک درصد قابل تشخیص است. کلریت به مقدار بسیار کم (در یک نمونه) به صورت بی‌شکل مشاهده گردید (شکل ۴).

۱ میلی‌متر می‌باشد. کانی‌های مسکوویت و سرسیت حدود ۲۰ درصد از مقطع را به صورت موجود در خمیره و بخش بلورین پوشانده‌اند. این کانی به صورت سوزنی شکل و دارای بیرفرئانس بالا در نور پلاریزه قابل تشخیص است، اندازه بلورهای این کانی در بیشترین حالت به ۵۰ میکرون می‌رسد. بیوتیت در بخش‌هایی از نمونه‌ها به مقدار کمتر از ۵ درصد مشاهده می‌شوند. اندازه این بلورها به ندرت به حد ۱۰ میکرون می‌رسد (شکل ۴).

مشاهدات میکروسکوپی بر روی نمونه‌های رس قرمز رنگ نشان داد در این واحد نسبت میکروکریستال به کریستوکریستال بیشتر است و کانی‌ها با وضوح بیشتری قابل تشخیص‌اند. همچنین در بین نمونه‌ها ۲۰ تا ۳۰ درصد آغشتگی به اکسید آهن مشاهده گردید. کانی‌های قابل تشخیص در این واحد شامل کوارتز،



شکل ۴- (a) تصویر میکروسکوپی از نمونه لس زرد در نور پلاریزه که کانی‌های قابل تفکیک آن مشخص شده‌اند؛ (b) تصویر میکروسکوپی از نمونه رس قرمز در نور پلاریزه که کانی‌های قابل تفکیک آن مشخص شده‌اند. علائم اختصاری بر اساس ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010).

Figure 4. a) Microscopic image of yellow loess sample in polarized light with identifiable minerals marked; b) Microscopic image of red clay sample in polarized light with identifiable minerals marked. The abbreviations are based on (Whitney and Evans, 2010).

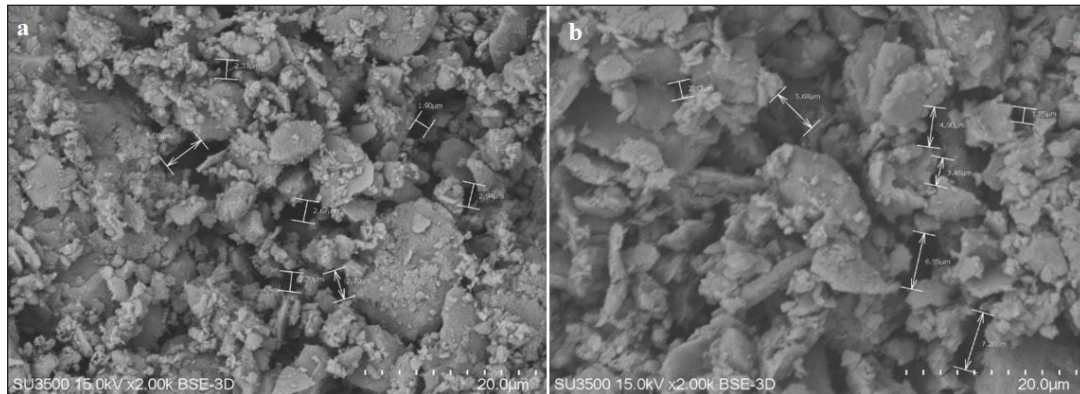
سبب می‌شود پس از پخت این نمونه در واکنش با آب شکفته شود، در نمونه شماره M-18 مقدار کلسیت ۱۲ درصد بوده دولومیت نیز گزارش نشده است.

۳-۱-۳- ژئوشیمی مواد اولیه با روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

نتایج حاصل از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای مواد اولیه در جدول ۴ ارائه شده است. نمونه‌های تجزیه شده رس قرمز برای عناصر مهم شامل میانگین SiO_2 (64.6 %)، Al_2O_3 (12.65 %)، Fe_2O_3 (6.5 %)، CaO (2.79 %)، TiO_2 (0.75 %)، MgO (2.27 %)، K_2O (2.3 %)، Na_2O (0.99 %)، LOI (6.31 %) است؛ مقادیر عناصر برای لس زرد برابر است با SiO_2 (51.8 %)، Al_2O_3 (10.0 %)، Fe_2O_3 (4.97 %)، CaO (13.4 %)، Na_2O (1.2 %)، K_2O (2.1%)، LOI (13.2%)، MgO (2.2 %)، TiO_2 (0.54 %). مقادیر بیان شده نشان می‌دهند میزان SiO_2 (2.65%)، Al_2O_3 (12.6 %) و Fe_2O_3 (1.53 %) در واحد رس قرمز بیشتر از لس زرد بوده و از طرفی نیز مقادیر CaO و LOI در لس زرد با تفاوت آشکاری بیشتر است (CaO بیش از ۴ برابر و LOI بیش از ۲ برابر شده است). در نمونه رس قرمز میزان SiO_2 بالاتر از بازه استاندارد بوده که این مشکل در ترکیب دو خاک با درصد ۷۰ به ۳۰ (نمونه M-18) برطرف شده است. مقدار Na_2O در تمام نمونه‌ها به جز یک نمونه (0.09%) بالاتر از حد استاندارد می‌باشد که می‌تواند سبب تجمع نمک‌های محلول در اثر تبخیر آب در سطح آجر (شوره زدن) گردد.

— میکروسکوپ الکترونی (SEM): تحلیل ریخت‌شناسی (مورفولوژی) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مواد اولیه نشان می‌دهد که این مواد به طور عمده دارای ساختار ورقه‌ای و لایه‌لایه هستند و ساختار ورقه‌ای کانی‌های رسی آشکارا در تصاویر مشخص است. نمونه‌های خاک قرمز دارای ذرات با اندازه یکنواخت‌تر، لبه‌های مشخص و چیدمان موازی صفحات رسی هستند، در حالی که نمونه خاک زرد ذرات درشت‌تر با سطوح شکسته و ناهموارتر و فضاهای خالی بیشتر را نشان می‌دهد که ویژگی تخلخل بوده و با واکنش پذیری رابطه مستقیم دارد (شکل ۵).

— پراش پرتو ایکس نیمه کمی مخصوص کانی‌های رسی (XRD Clay): ساختار بلورین و فازهای موجود در مواد اولیه توسط پراش پرتو ایکس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل (جدول ۳) مشخص کرد فازهای اصلی در نمونه‌ها یکسان بوده و شامل: کوارتز، آلپیت، کلسیت و ارتوکلاز می‌باشد. البته مقادیر این کانی‌ها برای دو واحد یکسان نیست؛ در فازهای اصلی واحد رس قرمز، کوارتز تفاوت فاحشی با لس زرد دارد؛ مقدار کلسیت نیز در فازهای اصلی لس زرد بسیار بالاتر از رس قرمز می‌باشد. تفاوت دو واحد در فازهای فرعی گسترده‌تر شده و فازهای فرعی برای رس قرمز شامل مسکوویت-آلیت، کلریت و همتایت است. فازهای فرعی لس زرد شامل مسکوویت-آلیت، کلریت و دولومیت است، همتایت که در واحد رس حضور داشت، در واحد لس وجود ندارد. بالا بودن مقدار کلسیت و دولومیت در نمونه لس



شکل ۵- تصاویر SEM که ساختار ورقه‌ای کانی‌های رسی و ابعاد آن‌ها، و ابعاد فضاهای خالی میان ذرات را با فلش‌های سفید نمایش می‌دهد. (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه رس قرمز؛ (b) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه لس زرد.

Figure 5. SEM images showing the sheet-like structure of clay minerals and their dimensions, as well as the dimensions of void spaces between particles indicated by white arrows. a) Scanning Electron Microscope image of red clay sample; b) Scanning Electron Microscope image of yellow loess sample.

جدول ۳- نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس برای مواد اولیه.

Table 3. The results of X-ray diffraction analysis for row material.

Sample	Quartz %	Albite %	Calcite %	Orthoclase %	Muscovite-Illite %	Chlorite %	Dolomite %	Hematite %
M-10	30	12	23	7	10	12	3	-
M-14	50	13	2	8	11	12	-	2
M-15	50	13	2	7	12	13	-	-
M-16	48	10	9	8	11	9	-	2
M-18	40	11	12	7	12	13	-	2

جدول ۴- نتایج حاصل از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای مواد اولیه.

Table 4. The results of X-ray fluorescence analysis for row material

Sample	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	MgO %	TiO ₂ %	MnO %	P ₂ O ₅ %	LOI %	S (ppm)
M-10	51.8	10.0	4.97	13.4	1.2	2.1	2.2	0.54	0.10	0.113	13.2	203
M-14	65.9	13.0	6.51	1.8	0.85	2.6	2.51	0.77	0.15	0.12	5.48	23
M-15	66.2	12.3	6.97	1.67	1.11	2.6	2.45	0.74	0.05	0.115	5.48	92
M-16	61.6	12.5	6.04	4.91	1.02	2.6	1.87	0.72	0.16	0.114	7.99	182
M-18	59.3	11.6	5.9	6.51	1.2	2.5	2.29	0.69	0.03	0.121	9.65	129
Estandard 1162 (Max)	60	21	12	17	1	3	4	1	-	-	15	-
Estandard 1162 (Min)	40	9	3	0	0	0	0	0	-	-	0	-

۲-۳- نتایج آنالیز محصولات

در این بخش به ارائه نتایج بدست آمده از آنالیزهای محصولات (نمونه‌های M.F14، M.F15، M.F17، M.F18) پرداخته می‌شود که شامل دو بخش کانی‌شناسی و ژئوشیمی است.

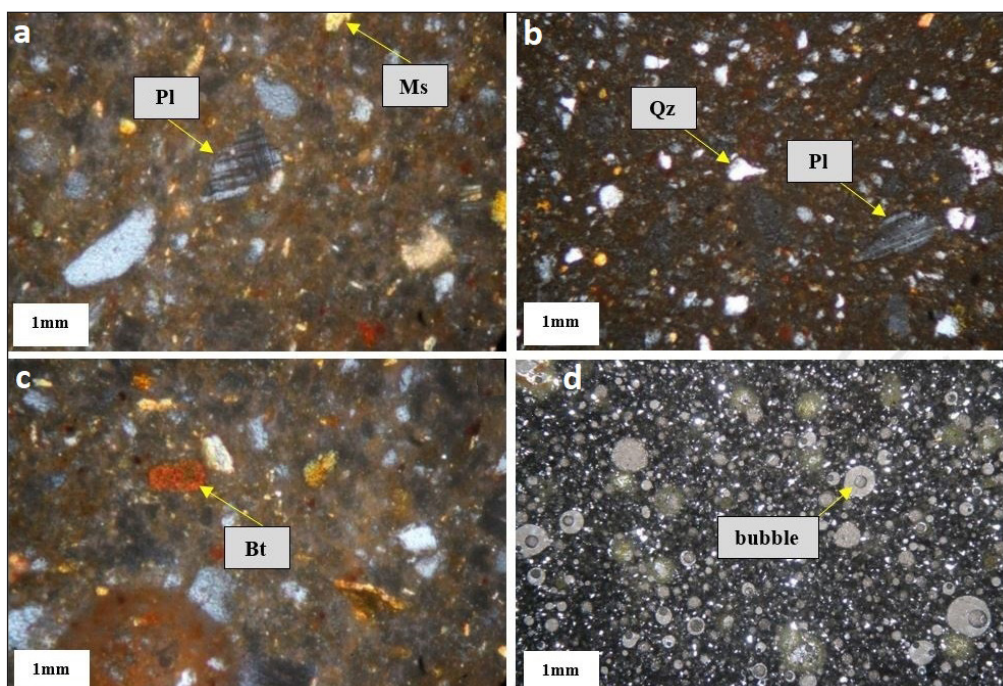
۱-۲-۳- کانی‌شناسی

محصولات در طول فرایند پخت تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت دیده و کانی‌های رسی با دست دادن آب ساختاری فروپاشیده‌اند، از این رو، درصد فازها در آنالیز XRD به صورت کمی مشخص نبوده و مقادیر هر فاز به صورت کیفی قابل بررسی می‌باشد.

سنگ‌نگاری: بررسی مقاطع نازک نمونه‌های آجر نشان می‌دهد که ساختار اصلی آن‌ها از زمینه بی‌شکل تشکیل شده که در بیشتر نمونه‌ها حجم شایان توجهی (حدود ۷۰ درصد) را به خود اختصاص داده است. در این زمینه، کانی‌ها با درصد‌های متفاوت پراکنده شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها کوارتز است که به عنوان فراوان‌ترین فاز کانیایی با درصد‌های متفاوت (۱۲-۱۵ درصد) حضور دارد. این کانی عموماً

به صورت بی‌شکل با اندازه‌های متغیر از ۲۰ تا ۵۰۰ میکرون مشاهده می‌شود و با خاموشی موجهی در نور پلاریزه قابل تشخیص است؛ پس از کوارتز، پلاژیوکلاز با حدود ۵ درصد حجمی، فراوان‌ترین کانی در نمونه‌هاست که با بافت پلی‌سنتتیک در برخی نمونه‌ها نمایان است. حضور میکاها (بیوتیت و مسکوویت) در نمونه‌ها با بیرفرژانس بالا و در برخی موارد به صورت سریستی مشاهده می‌شوند. فلدسپات آلکالن نیز با درصد کمتر (حدود ۲-۳ درصد) در نمونه‌ها حضور دارد. در برخی نمونه‌ها افزون بر کانی‌های اصلی، اکسیدهای آهن (حدود ۸ درصد) نیز مشاهده می‌شود و زمینه آن ترکیبی از فاز کریستوکریستالی متشکل از کانی‌های رسی و کربناتی است (شکل‌های ۶-a، b، c).

نمونه M.F-17 (آجر جوش) ویژگی منحصر به فردی نسبت به سایر نمونه‌ها دارد و آن حضور حباب‌هایی با اندازه‌های متفاوت و حجم فراوان فاز بی‌شکل است؛ در این نمونه تقریباً تنها در بخش‌های کوچکی کانی کوارتز قابل مشاهده است. دامنه تغییرات ابعاد دانه‌های کوارتز از ۲۰-۳۰ میکرون تا بیشینه ۵۰۰ میکرون متغیر است، اما به طور عموم در محدوده ۱۰۰ میکرون قرار دارند. حباب‌ها حدود ۳۰ درصد از کل مقطع را با ابعاد بیشینه ۴۰۰ میکرون شامل می‌شوند (شکل ۶-d).

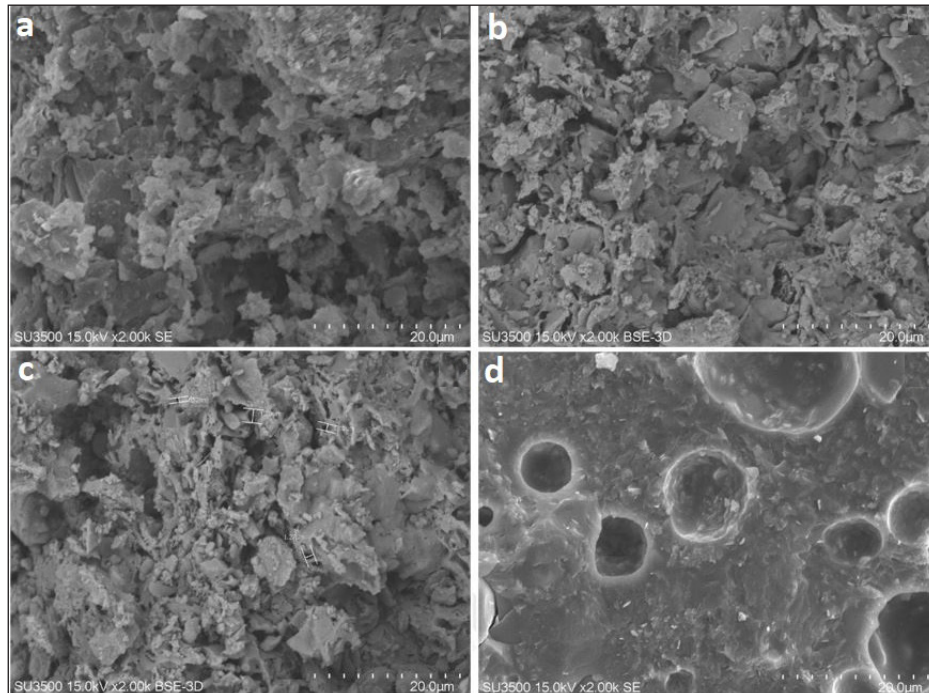


شکل ۶- a) تصویر میکروسکوپی از نمونه آجر در نور پلاریزه که کانی‌های مسکوویت با بیرفرژانس بالا در آن مشخص شده‌اند؛ b) تصویر میکروسکوپی از نمونه آجر در نور پلاریزه که کانی‌های کوارتز و پلاژیوکلاز با بافت پلی‌سنتتیک در آن مشخص شده‌اند؛ c) تصویر میکروسکوپی از نمونه آجر در نور پلاریزه که کانی بیوتیت در آن مشخص است؛ d) تصویر میکروسکوپی از نمونه آجر جوش در نور پلاریزه که حباب‌ها در فاز بی‌شکل (آمورف) قابل تشخیص هستند. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و واتز (Whitney and Evans, 2010).

Figure 6. a) Microscopic image of brick sample in polarized light showing muscovite minerals with high birefringence; b) Microscopic image of brick sample in polarized light showing quartz and plagioclase minerals with polysynthetic texture; c) Microscopic image of brick sample in polarized light showing biotite mineral; d) Microscopic image of vitrified brick sample in polarized light showing bubbles distinguishable in amorphous phase. (Mineral abbreviations from Whitney and Evans, 2010).

ریخت‌شناسی نهایی محصول است (شکل‌های a، b و c). نمونه آجر جوش (M.F17) یک ساختار ذوب شده و شیشه‌ای با تخلخل کمتر و سطوح صاف و صیقلی را نشان می‌دهد، این ساختار به دلیل ذوب بخشی در اثر افزایش بیش از حد درجه حرارت یا تجمع عناصر کمک ذوب مانند اکسید آهن اتفاق افتاده است که فاز بی‌شکل را به شدت افزایش داده و تخلخل مفید و لازم برای آجر را به کلی از بین برده است (شکل d-۷).

— **میکروسکوپ الکترونی (SEM):** بررسی تصاویر SEM محصولات نهایی (آجرها) تغییرات چشمگیری را در ریخت‌شناسی نشان می‌دهد. نمونه‌های کوره تونلی (M.F14 و M.F15) دارای بافت متخلخل یکنواخت و لایه‌لایه با حفرات ریز و متعدد و اتصالات قوی بین ذرات هستند. در حالی که نمونه آجر سفیدک‌دار (M.F18) دارای ساختار اسفنجی و کمتر لایه‌لایه با حفرات کروی و نامنظم فراوان و پل‌های ارتباطی بین ذرات است که نشان‌دهنده تاثیر شرایط متفاوت پخت بر



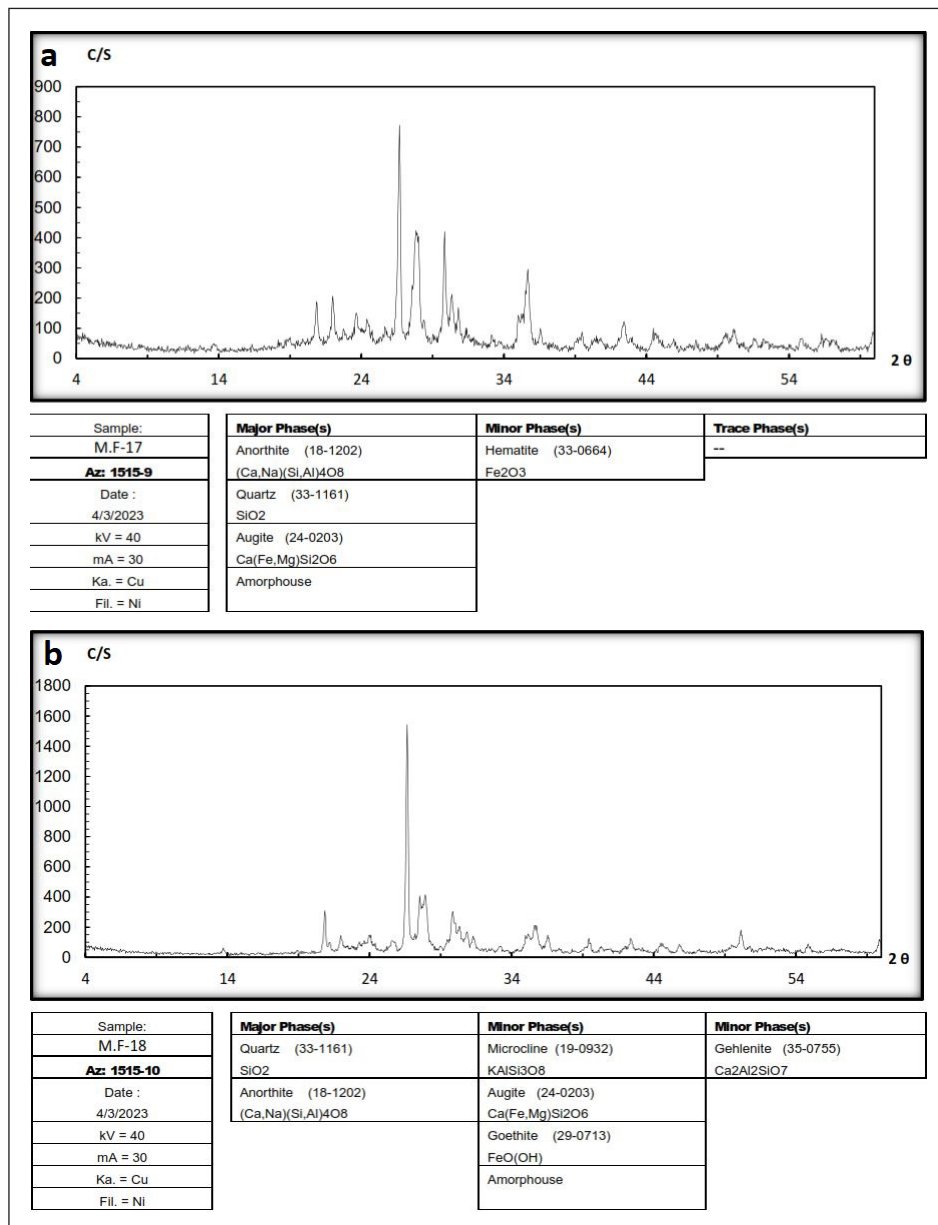
شکل ۷- a و b) نمونه M.F14 و M.F15 دارای بافت نسبتاً متخلخل، یکنواخت و لایه‌لایه؛ c) نمونه M.F18 که بافت آن نسبت به سایر نمونه‌ها اسفنجی‌تر بوده و دانه‌ها از نظر ابعاد ناهمگن‌تر هستند؛ d) نمونه M.F17 که نشان‌دهنده افزایش فاز بی‌شکل (آمورف) و از بین رفتن تخلخل می‌باشد.

Figure 7. a, b) Samples M.F14 and M.F15 showing relatively porous, uniform and laminated texture; c) Sample M.F18 exhibiting more spongy texture compared to other samples with dimensionally more heterogeneous grains; d) Sample M.F17 demonstrating increased amorphous phase and porosity reduction.

۳-۲-۲-۲- ژئوشیمی محصولات با روش فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

نتایج حاصل از آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای محصولات در جدول ۵ ارائه شده است؛ این نتایج تغییرات شایان توجهی در ترکیب شیمیایی محصولات نسبت به مواد اولیه را نشان می‌دهد. میزان SiO_2 از ۵۹/۳۳٪ به ۶۲/۲۹٪ افزایش یافته است که می‌تواند ناشی از تمرکز نسبی این اکسید پس از کاهش LOI باشد. افزایش چشمگیر CaO از ۶/۵۱٪ به ۱۱/۹۰٪ نشان‌دهنده تجزیه کربنات‌ها و تشکیل فازهای جدید کلسیم‌دار است. این افزایش با تشکیل کانی‌های جدید مانند آنورتیت و ژلینت مطابقت دارد. کاهش شایان توجه LOI از ۹/۶۵٪ به ۰/۶۷٪ تایید کننده خروج آب ساختاری و تجزیه کربنات‌ها در حین پخت است. تغییرات در سایر اکسیدها نیز قابل توجه است. افزایش جزئی در میزان Al_2O_3 (از ۱۱/۵۹٪ به ۱۱/۸۶٪) و کاهش Fe_2O_3 (از ۵/۹٪ به ۵/۵۲٪) نشان‌دهنده تغییرات ساختاری در کانی‌های حاوی این عناصر است. افزایش Na_2O و MgO نیز می‌تواند به دلیل تشکیل فازهای جدید و تغییرات ساختاری در سیلیکات‌ها باشد.

— **پراش پرتو ایکس (XRD):** نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که در محصولات نهایی (آجرها)، تغییرات شایان توجهی در فازها مشاهده می‌شود. کوارتز همچنان به عنوان فاز اصلی در تمامی نمونه‌ها حضور دارد. مهم‌ترین تغییر، تشکیل فاز آنورتیت است که در نمونه M.F17 به صورت فاز اصلی و بیشترین فاز موجود در نمونه حضور دارد (شکل ۸-a). دلیل این تغییر افزایش دما به صورت بخشی (در اثر وجود مقادیر بیشتر Fe_2O_3 به عنوان کمک ذوب) می‌باشد. کانی‌های رسی اولیه (مسکویت-ایلیت) در نمونه‌های M.F17 و M.F18 از بین رفته‌اند. فازهای جدید مانند ژلینت در نمونه‌های M.F15 و M.F18 تشکیل شده‌اند. همچنین حضور فاز بی‌شکل در تمامی نمونه‌های پخته شده نشان‌دهنده ذوب بخشی و تشکیل فاز شیشه‌ای در طی فرایند پخت است. گوئیت به عنوان یک فاز ثانویه در نمونه‌های M.F15 و M.F18 مشاهده می‌شود (شکل ۸-b)، در حالی که هماتیت تنها در نمونه M.F17 حضور دارد.



شکل ۸- (a) نتیجه آنالیز XRD بر روی نمونه M.F.17؛ (b) نتیجه آنالیز XRD بر روی نمونه M.F.18

Figure 8. a) XRD analysis result for sample M.F.17; b) XRD analysis result for sample M.F.18.

جدول ۵- نتایج حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس برای محصولات.

Table 5. X-ray diffraction (XRD) analysis results for the products.

Sample	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	MgO %	TiO ₂ %	MnO %	P ₂ O ₅ %	LOI %
M.F-14	61.65	11.45	5.43	11.69	1.41	2.46	2.7	0.591	0.15	0.126	2.19
M.F-15	62.29	11.86	5.52	11.9	1.64	2.42	2.71	0.598	0.147	0.133	0.67
M.F-17	64.42	11.8	5.87	10.07	1.59	2.54	2.18	0.65	0.061	0.123	0.52
M.F-18	61.53	12.04	5.62	11.78	1.73	2.5	2.36	0.627	0.167	0.137	1.36

۴- بحث

هستند، به تشکیل یک زمینه عمدتاً بی‌شکل انجامیده‌اند که حدود ۷۰ درصد حجم نمونه‌ها را تشکیل می‌دهد.

یکی از ویژگی‌های شایان توجه در نمونه M.F-17، حضور حباب‌هایی با اندازه متغیر تا ۴۰۰ میکرون است که ۳۰ درصد حجم نمونه را تشکیل می‌دهند. الرت و همکاران (Elert et al., 2003) گزارش کردند که توزیع و اندازه تخلخل‌ها تأثیر مستقیمی بر خواص فیزیکی و مکانیکی آجر دارد. به ویژه، حضور حباب‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون با شکل نامنظم، می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری شود. حضور میکاها و فلدسپارها در نمونه‌ها، به صورت پراکنده می‌تواند نشان‌دهنده تجزیه ناقص این کانی‌ها در طی فرایند پخت باشد. این موضوع در مطالعه پیترز و ایبرگ (Peters and Iberg, 1978) مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها نشان دادند که درجه تجزیه این کانی‌ها می‌تواند شاخص مناسبی برای تعیین دمای پخت و شرایط عملیاتی کوره باشد.

آنالیز XRD محصولات نشان داد که در طی فرایند پخت، تغییرات شایان توجهی در فازهای بلورین رخ می‌دهد. مهم‌ترین تغییر، تجزیه کامل کلسیت و تشکیل فازهای جدید آئوریت، ژلنیت و اوژیت است. چنگ و همکاران (Cheng et al., 2012) نشان دادند که تشکیل آئوریت می‌تواند مقاومت فشاری را افزایش دهد. جردن و همکاران (Jordan et al., 2001) گزارش کردند که حضور ژلنیت با کاهش تخلخل و بهبود مقاومت به یخ‌زدگی همراه است. مطالعات دوندی و همکاران (Dondi et al., 1999) نشان داد که فاز بی‌شکل تشکیل شده در دمای بالای ۹۰۰ درجه، نقش کلیدی در کاهش جذب آب و افزایش مقاومت شیمیایی دارد.

مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) تغییرات چشمگیری را در ریخت‌شناسی نمونه‌ها پس از پخت نشان می‌دهد. دوندی و همکاران (Dondi et al., 1999) گزارش کردند که توزیع و اندازه تخلخل‌ها در محصول نهایی، تأثیر مستقیمی بر خواص فیزیکی-مکانیکی آجر دارد. به طوری که تخلخل‌های کروی و متصل با قطر ۱-۵ میکرون می‌تواند مقاومت به یخ‌زدگی را افزایش دهند. مطالعات یانگ و همکاران (Yang et al., 2021) نشان داد که تشکیل پل‌های ارتباطی بین ذرات در اثر ذوب بخشی، نقش کلیدی در استحکام نهایی محصول دارد. نمونه M.F17 (آجر جوش) ساختار کاملاً متفاوتی نسبت به سایر نمونه‌های آجر نشان می‌دهد، ذوب شدید و تشکیل ساختار شیشه‌ای به از بین رفتن کامل تخلخل‌ها و ایجاد ترک‌های ژرف انجامیده است. دوندی و همکاران (Dondi et al., 1999) گزارش کردند که افزایش بیش از حد دمای پخت می‌تواند به ذوب گسترده و تشکیل فاز شیشه‌ای یکپارچه بیانجامد که این تغییر ساختار شدید سبب از دست رفتن خواص مکانیکی و فیزیکی مطلوب آجر می‌شود و محصول را از نظر کاربردی غیرقابل استفاده می‌کند. نتایج آنالیز XRF محصولات نشان‌دهنده تغییرات شایان توجه در ترکیب شیمیایی پس از پخت است. تیت و مانیاتیس (Tite and Maniatis, 1975) گزارش کردند که کاهش محسوس LOI نشان‌دهنده تجزیه کامل کربنات‌ها و خروج آب ساختاری است. پیترز و ایبرگ (Peters and Iberg, 1978) دریافتند که افزایش نسبی SiO_2 و Al_2O_3 در محصولات نهایی، ناشی از کاهش وزنی نمونه‌ها در اثر خروج مواد فرار است. همچنین، تریند و همکاران (Trindade et al., 2009) نشان دادند که نسبت SiO_2/Al_2O_3 در محدوده ۵ تا ۵/۵ می‌تواند به تشکیل بهینه فازهای آلومینوسیلیکاتی و بهبود خواص مکانیکی کمک کند.

مواد اولیه شامل واحد رس قرمز و لس زرد از نظر ترکیب کانی‌شناسی متفاوت هستند. واحد رس قرمز با آغشتگی به اکسیدهای آهن و درصد بیشتر کوارتز و کانی‌های رسی مشخص می‌شود. این ویژگی‌ها سبب افزایش واکنش‌پذیری و کاهش دمای ذوب می‌گردد. در مقابل، واحد لس زرد با مقدار بیشتر کلسیت و تخلخل بالاتر، رفتار متفاوتی در فرایند پخت نشان می‌دهد. براساس آزمون دانه‌بندی مقادیر رس و لس در مواد اولیه استاندارد بوده اما خاک رس قرمز دارای

بر اساس آزمون دانه‌بندی مواد اولیه، مقدار ماسه می‌تواند بین ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش یابد. وانگ و همکاران (Wang et al, 2023) نشان دادند نمونه‌های با درصد ماسه کمتر از ۵ درصد، مقاومت فشاری پایین‌تری (15-18MPa) نسبت به نمونه‌های حاوی ۱۵-۲۰ درصد ماسه (25-30MPa) دارند. گوزلنا و همکاران (Guzlena et al, 2019) در مطالعات خود دریافتند که ۱۵ درصد ماسه، میزان ترک خوردگی و جذب آب را کاهش می‌دهد.

بر اساس نتایج سنگ‌نگاری واحد لس زرد دارای بافت میکروکریستالین تا کریستوکریستالین است، در حالی که در واحد رس قرمز نسبت زمینه میکروکریستال به کریستوکریستال بیشتر است. چنگ و همکاران (Cheng et al., 2024) گزارش کردند که افزایش درجه کریستالینیتی می‌تواند مقاومت خمشی را پس از پخت بهبود بخشد. همچنین زمینه کریستوکریستال سبب افزایش واکنش‌پذیری در طول فرایند پخت شده و در نتیجه سبب ایجاد ترک‌های مویی در سطح آجر می‌گردد.

آنالیز XRD بر روی مواد اولیه حضور کوارتز (۳۵٪ در رس قرمز، ۲۸٪ در لس زرد)، آلپیت (۱۲٪ در رس قرمز، ۸٪ در لس زرد)، کلسیت (۵٪ در رس قرمز، ۱۵٪ در لس زرد) و ارتوکلاز (۸٪ در رس قرمز، ۶٪ در لس زرد) را نشان داد. شرگایر و همکاران (Shirgire et al., 2024) در مطالعات خود دریافتند که نسبت بهینه کوارتز (۳۰-۳۵٪) می‌تواند تخلخل را کاهش دهد. ما و همکاران (Ma et al., 2018) گزارش کردند که حضور فلدسپار در ترکیب اولیه، افزون بر کاهش ۸۰-۱۰۰ درجه‌ای دمای پخت، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. آلپیت و ارتوکلاز به عنوان یک فلاکس طبیعی عمل می‌کنند و با کاهش دمای ذوب، به تشکیل فاز مایع در طی پخت کمک می‌نمایند (Celik, 2010). حضور این کانی‌ها می‌تواند به بهبود زینترینگ (Sintering) و کاهش تخلخل در محصول نهایی بیانجامد، که به نوبه خود سبب افزایش استحکام و کاهش جذب آب می‌گردد (Jordan et al., 2001). آلپیت و ارتوکلاز با تجزیه در دماهای بالا و آزادسازی سدیم و پتاسیم، می‌توانند در تشکیل فازهای جدید مانند مولیت نقش داشته باشد که خواص مکانیکی و حرارتی آجر را بهبود می‌بخشد (Pedro et al., 2022). مقدار بیش از حد کوارتز و فلدسپار می‌تواند به انبساط بیش از حد و تغییر شکل آجر در طی پخت بیانجامد (Karaman et al., 2006).

آنالیز XRF مواد اولیه نشان داد که میزان سیلیس در برخی نمونه‌های رس قرمز بالاتر از محدوده استاندارد (۴۰-۶۰ درصد) است. مقادیر بالای سیلیس (بیش از ۶۰ درصد) اگرچه به افزایش سختی آجر می‌انجامد، اما می‌تواند سبب افزایش شکنندگی و کاهش انعطاف‌پذیری محصول نهایی گردد (Gado et al., 2020). بر اساس نتایج ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) افزایش بیش از حد سیلیس می‌تواند به انبساط حرارتی نامتعادل و ایجاد ترک‌های مویی در ساختار آجر بیانجامد، در حالی که حفظ میزان سیلیس در محدوده استاندارد، استحکام و مقاومت حرارتی مطلوبی را در محصول نهایی ایجاد می‌کند (Wang et al., 2023). مقادیر بالای CaO (۱۲/۸٪) و LOI (۱۵/۶٪) در لس زرد گزارش شده است. سوکولار (Sokolar, 2010) نشان داد که نمونه‌های با CaO بالاتر از ۱۰ درصد، انبساط بیشتر پس از پخت، افزایش در ترک‌های مویی و کاهش در مقاومت فشاری نشان می‌دهند. اکسیدهای آهن (Fe_2O_3) به‌طور عمده بر رنگ آجر تأثیر می‌گذارند و می‌توانند نقطه ذوب را کاهش دهند و مقادیر بیش از حد آن می‌تواند سبب تغییرات رنگی شدید و کاهش نقطه ذوب شوند (Jordan et al., 2001). قلیایی‌ها مانند سدیم (Na_2O) و پتاسیم (K_2O) می‌توانند به عنوان فلاکس عمل کرده و دمای پخت را کاهش دهند و مقادیر بالای قلیایی‌ها سبب ذوب زودرس، بی‌شکل شدن آجر و سفیدک زدن روی آجر گردند (Martinez et al., 2023).

مطالعات سنگ‌نگاری بر روی محصولات نهایی (آجر) تغییرات شایان توجهی را در مقایسه با مواد اولیه نشان می‌دهد. این تغییرات که نتیجه فرایند پخت در دمای بالا

اصلی در فازهای فرعی است که شامل حضور هماتیت در کفه رسی و دولومیت در لس می‌باشد. از نظر ژئوشیمیایی، غلظت بالاتر Al_2O_3 ، SiO_2 و Fe_2O_3 در کفه رسی و مقادیر بیشتر CaO و LOI در لس مشاهده گردید. یک چالش مهم، غلظت بالای Na_2O در هر دو واحد است که فراتر از حد استاندارد بوده و می‌تواند سبب شوره‌زدگی محصول شود. طی فرایند پخت در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، تجزیه کامل کلسیت رخ داده و فازهای جدید آنورتیت، ژلنیت و اوژیت به همراه فاز بی‌شکل تشکیل می‌گردد. این فازهای جدید نقش اساسی در استحکام مکانیکی، مقاومت حرارتی و کاهش جذب آب محصول نهایی دارند.

آزمون‌های دانه‌بندی نشان دادند که میزان ماسه در ترکیب فعلی (۳ درصد) به طور شایان توجهی پایین‌تر از محدوده استاندارد (۱۰ تا ۱۵ درصد) است. براساس محاسبات انجام شده، با افزودن $1/8$ تا $1/14$ کیلوگرم ماسه به هر ۱۰۰ کیلوگرم ماده اولیه، می‌توان میزان ماسه را به محدوده استاندارد ۱۰ الی ۱۵ درصد رساند. این کار سبب می‌شود که نسبت رس به ۳۰ تا ۳۵ درصد و لس به ۵۰ تا ۵۵ درصد تنظیم شود، که در محدوده بهینه استاندارد ملی قرار می‌گیرد. همچنین، این افزودن ماسه شاخص خمیری را از ۲۲ درصد به محدوده بهینه ۱۶ تا ۱۹ درصد کاهش می‌دهد.

افزودن ماسه با این مقادیر چندین برتری عملی برای محصول نهایی دارد: کاهش چسبندگی بیش از حد و بهبود قابلیت کارایی خاک در مرحله شکل‌دهی، کاهش انقباض در مراحل خشک‌شدن و پخت که به کاهش ترک‌های مویی می‌انجامد، افزایش مقاومت فشاری به دلیل ایجاد ساختار متعادل‌تر، و کاهش جذب آب در محصول نهایی. افزون بر این، استفاده از ماسه با ترکیب شیمیایی کنترل شده (با غلظت پایین Na_2O) می‌تواند غلظت سدیم کل مواد اولیه را به زیر ۱ درصد کاهش دهد که مشکل شوره‌زدگی را برطرف می‌نماید.

در نهایت، این مطالعه نشان داد که با یک تغییر ساده و کم‌هزینه یعنی افزودن ۱۰ الی ۱۵ درصد ماسه با کیفیت مناسب به ترکیب موجود ۷۰ درصد لس و ۳۰ درصد رس، می‌توان بدون نیاز به تغییر اساسی در فرایند تولید یا منابع تامین مواد اولیه، کیفیت محصول نهایی را به طور شایان توجهی بالا برد. این بهینه‌سازی ساده به تولید آجری با استحکام بالاتر، جذب آب کمتر، عاری از ترک‌های مویی و سفیدک می‌انجامد که در عین حال از منابع خاک به صورت بهینه‌تر استفاده می‌کند و اصول توسعه پایدار را رعایت می‌نماید.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت تولیدی و بازرگانی مرجان‌کار انجام شده است. بدین وسیله از کارکنان شرکت که در نمونه‌برداری و برداشت‌های صحرائی همکاری داشتند، قدردانی می‌گردد.

۱ تا ۷ درصد ماسه است، در حالی که لس زرد دارای ۳ درصد ماسه به صورت میانگین می‌باشد؛ این مقدار می‌تواند تا ۱۵ درصد وزنی در مواد اولیه افزایش یابد. از نظر ترکیب شیمیایی، ترکیب ۷۰ به ۳۰ از رس قرمز و لس زرد تقریباً در محدوده استاندارد ملی ۱۱۶۲ ایران قرار دارند (استاندارد ملی ایران، ۱۳۸۴)، با این تفاوت که مقدار Na_2O در هر دو خاک بالاتر از حد استاندارد بوده و با تغییر درصد اختلاط مواد برطرف نمی‌شود. بنابر موارد بیان شده، افزودن ماسه به مقدار ۱۵ درصد با ترکیب شیمیایی کنترل شده می‌تواند درصد ماسه و مقدار Na_2O را در حالت بهینه قرار دهد.

سازوکارهای تغییر فازی در طول فرایند پخت را می‌توان در ۳ مرحله خلاصه کرد: مرحله اول (۱۰۰-۲۰۰ درجه): حذف آب سطحی و بین لایه‌ای و شروع تغییرات ساختار مولکولی، مرحله دوم (۴۰۰-۶۵۰ درجه): از دست دادن آب ساختاری و فروپاشی کانی‌های اولیه و شروع تغییرات دگرگونی و همچنین تغییر در ساختار کوارتز اولیه و تبدیل شدن آن به بتاکوارتز، مرحله سوم (۷۰۰-۹۵۰ درجه): تجزیه کربنات‌ها، تشکیل فازهای جدید مانند آنورتیت و ژلنیت، تبدیل بتاکوارتز به کریستالوبالیت و ذوب بخشی. تشکیل فاز جدید ژلنیت با شبکه کریستالی پیچیده سبب بهبود مقاومت فشاری شده و با جذب تنش‌های حرارتی، مقاومت حرارتی را بهبود می‌بخشد همچنین با کاهش ضریب انبساط حرارتی، از ترک خوردگی محصول در تغییرات دمایی جلوگیری می‌کند. تشکیل آنورتیت با ایجاد پیوندهای مستحکم مقاومت خمشی و کششی را بهبود بخشیده و به دلیل شبکه بلوری مترکم مقاومت در برابر سایش را افزایش می‌دهد. تشکیل فاز بی‌شکل با ایجاد پیوندهای غیربلوری در فضاهای خالی، مقاومت کششی را افزایش داده و سبب ایجاد ساختار یکنواخت و کاهش تخلخل و نفوذ پذیری می‌شود. افزایش درجه حرارت بیش از ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و یا تجمع عناصر کاهش دهنده نقطه ذوب مانند اکسید آهن سبب تشکیل بیش از حد فاز بی‌شکل شده و ویژگی‌های استاندارد آجر را از بین برده و محصول نهایی را خراب می‌نماید.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش به ارزیابی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و کانی‌شناسی مواد اولیه تولید آجر در شرکت مرجان‌کار و تحولات آن‌ها طی فرایند پخت پرداخت. نتایج نشان داد که ترکیب ۷۰ درصد لس زرد و ۳۰ درصد کفه رسی قرمز که به صورت تجربی استفاده می‌شود، از نظر کانی‌شناسی و شیمیایی مناسب است، اما نیازمند بهینه‌سازی در دانه‌بندی می‌باشد.

مطالعات کانی‌شناسی نشان داد فازهای اصلی در هر دو واحد مشابه بوده و شامل کوارتز، آلپیت، کلسیت، ارتوکلاز، مسکوویت-آلیت و کلریت هستند. تفاوت‌های

کتابکاری

- استاندارد ملی ایران، ۱۱۶۲، ۱۳۸۴، خاک - خاک رس جهت ساخت آجر رسی - ویژگی‌ها و روش‌های آزمون، سازمان ملی استاندارد ایران (مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران). اسدی‌کرد، ف.، ۱۴۰۳، ویژگی‌های بافتی، فیزیکی و شیمیایی آجرهای تولیدی شرکت مرجان‌کار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۱۶ ص.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۸۹، زمین‌شناسی ایران. چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران، ۵۴۰ ص.
- رحیمی، م.، ۱۴۰۳، کانی‌شناسی، بافت و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه مورد استفاده در ساخت آجر شرکت مرجان‌کار. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۴۸ ص.
- سعیدی، ع. و فراهانی، م.، ۱۳۹۶، گزارش نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ گرگان، سازمان زمین‌شناسی کشور، ۷۹ ص.
- صوری، ح.، ۱۳۷۸، مطالعه پالینومورف‌های شیبست‌های گرگان در نقشه زمین‌شناسی گرگان به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- کریم‌پور، م.، ح.، ۱۳۷۸، کانی‌ها و سنگ‌های صنعتی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۳۹۸ ص.

References

- Agbede, I.O., and Joel, M., 2011. Effect of rice husk ash on the properties of Ibaji burnt clay bricks, *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2(4), 674-677, <https://www.scribbr.com/AJSIR/PDF/2011/4/AJSIR-2-4-674-677.pdf>.
- Akintola, G.O., Amponsah-Dacosta, F., Mhlongo, S.E., Matsiketa, K.E., 2024. Mechanical evaluation of soil and artisanal bricks for quality masonry product management, *Limpopo South Africa, Sci Rep*, 14, 13921, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64332-w>.
- Asadi-Kord, F., 2024. *Textural, physical and chemical characteristics of bricks produced by Marjankar Company, M.Sc. thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, 116 p. (In Persian)*.
- Celik, H., 2010. Technological characterization and industrial application of two Turkish clays for the ceramic industry, *Applied Clay Science*, 50, 245-254, doi:10.1016/j.clay.2010.08.005.
- Cheng, X., Ke, S., Wang, Q., Wang, H., Shui, A., and Liu, P., 2012. Fabrication and characterization of anorthite-based ceramic using mineral raw materials, *Ceramics International*, 38, 3227-3235, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.12.028>.
- Cheng, Z., Chen, L., Liao, Y., Yuan, M., Zeng, L., Zuo, F., Chen, Y., and Ji, X., 2024. The effect of solid content on the anisotropy for 3D printed barium titanate piezoelectric ceramics, *Ceramics International*, 50(23), 50697-50703, doi:10.1016/j.ceramint.2024.09.414.
- Darvishzadeh, A., 2010. *Geology of Iran, 6th ed., University of Tehran Press, 540 p. (In Persian)*.
- Dondi, M., Guarini, G., and Raimondo, M., 1999. Trends in the Formation of Crystalline and Amorphous Phases During Firing of Clay Bricks, *Tile & Brick International*, 15, 176-183, https://www.researchgate.net/publication/268506397_Trends_in_the_Formation_of_Crystalline_and_Amorphous_Phases_During_Firing_of_Clay_Bricks.
- Elert, K., Clutrone, G., Navarro, C.R., and Prada, E.S., 2003. Durability of Bricks Used in the Conservation of Historic Buildings Influence of Composition and Microstructure, *Journal of Cultural Heritage*, 4(2), [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(03\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(03)00020-7).
- Gado, R.A., Hebda, M., Lach, M., and Mikula, J., 2020. Alkali activation of waste clay bricks: influence of the silica modulus, SiO₂/Na₂O, H₂O/Na₂O molar ratio, and liquid/solid ratio, *Materials*, 13(2), 383, <https://doi.org/10.3390/ma13020383>.
- Guzlena, S., Sakale, G., Certoks, S., and Grase, L., 2019. Sand size particle amount influence on the full brick quality and technical properties, *Construction and Building Materials*, 220, 102-109, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.170.
- Iranian National Standard, 2005. No. 1162, Soil – Clay for burnt clay brick making – Specifications and test methods, Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI). (In Persian)*.
- Jordan, M.M., Sanfeliu, T., and de la Fuente, C., 2001. Firing transformations of tertiary clays used in the manufacturing of ceramic tile bodies, *Applied Clay Science*, 116-117, 83-91, [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(00\)00044-2](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(00)00044-2).
- Karaman, S., Ersahin, S., and Gunal, H., 2006. Firing temperature and time influence on mechanical and physical properties of clay bricks, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 65(02), 153-159, https://www.researchgate.net/publication/267807532_Firing_temperature_and_firing_time_influence_on_mechanical_and_physical_properties_of_clay_bricks.
- Karimpour, M.H., 1999. Industrial minerals and rocks, Ferdowsi University of Mashhad Press, 398 p. (In Persian)*.
- Ma, H.Q., Tian, Y.M., Zhou, Y., Li, G.M., and Wang, K.Y., 2018. Effective reduction of sintering temperature and breakage ratio for a low-cost ceramic proppant by feldspar addition, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 15(1), 191-196, doi:10.1111/ijac.12774.
- Madavi, A., 2022. Environmental impact of bricks making, *Scieng Publication*, 26, 196-202, doi:10.researchgate.net/publication/369042839_Environmental_Impact_of_Bricks_Making.
- Martinez, S.M., Villarejo, L.P., Garzon, E., and Sanchez, P., 2023. Influence of firing temperature on the ceramic properties of illite-chlorite-calcitic clays, *Ceramics International*, 49, 24541-24557, doi:10.1016/j.ceramint.2022.11.077.
- Pedro, J., Dolores, E., Sergio, M., Luis, P., and Eduardo, G., 2022. Study of a Waste Kaolin as Raw Material for Mullite Ceramics and Mullite Refractories by Reaction Sintering, *Materials*, Volume 15, Issue 2, Article 583, <https://doi.org/10.3390/ma15020583>.
- Peters, T., and Iberg, R., 1978. Mineralogical changes during firing of calcium-rich brick clays, *American Ceramic Society Bulletin*, 57(5), 503-509, doi:10.scienceopen.com/document?vid=8351a5fb-704e-43e3-bfd9-1c94c89aa0f5.
- Rajabi, M., 2024. Mineralogy, texture, and physical and chemical characteristics of raw materials used in brick manufacturing of Marjankar Company, M.Sc. thesis, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, 148 p. (In Persian)*.
- Sabouri, J., 1999. Study of palynomorphs from Gorgan schists in the 1:100,000 scale geological map of Gorgan, Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Saeidi, A., and Farahani, M., 2017. Geological map of Gorgan, scale 1:25,000, Geological Survey of Iran, 79 p. (In Persian)*.
- Shirgire, A., Deepak, M., Thenmozhi, S., Sharma, A., Pawar, S., and Jose, P., 2024. Experimental study on brick performance using quartz material and woods ash, *Materials Today*, 103, 609-613, doi:10.1016/j.matpr.2023.11.054.
- Sokolar, R., 2010. Effect of calcite on the brick body closing, *Interceram*, 59(2), 123-127, doi:10.researchgate.net/publication/291987515_Effect_of_calcite_on_the_brick_body_closing.
- Stocklin, J., 1968. Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and Central Asia, *Mémoire hors-série de la Société géologique de France*, 8, 333-353.

- Tite, M.S., and Maniatis, Y., 1975. Examination of ancient pottery using the scanning electron microscope, *Nature*, 257, 122-123, <https://doi.org/10.1038/257122a0>.
- Trindade, M.J., Dias, M.I., Coroado, J., and Rocha, F., 2009. Mineralogical transformations of calcareous rich clays with firing, *Applied Clay Science*, 42(3-4), 345-355, doi:10.1016/j.clay.2008.02.008.
- Wang, S., Gainey, L., Mackinnon, I.D.R., Allen, C., Gu, Y., and Xi, Y., 2023. Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties, *Journal of Building Engineering*, 66, 105802, doi:10.1016/j.jobbe.2022.105802.
- Whitney, D., and Evans, B., 2010. Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals, *American Mineralogist*, Volume 95, pages 185187, doi: 10.2138/am.2010.3371.
- Yang, L., Sega, M., and Harting, J., 2021. Capillary-bridge forces between solid particles: Insights from lattice Boltzmann simulations, *Aiche Journal*, 67(9), <https://doi.org/10.1002/aic.17350>.
- Yuan, C., Zhao, C., Wang, F., and Yuan, S., 2022. Characterization of ceramic from the Early Bronze Age Xinzhai site, Henan Province, China, by using a multi-analytical approach, *Journal of Archaeological Science: Reports*, Volume 44, 103551, ISSN 2352-409X, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103551>.
- Zhang, X., Li, Y., Cui, Y., Tian, Z., Sun, L., Ma, C., and Sun, Y., 2023. Corrosion mechanism of silica bricks containing high amorphous for hot stoves, *Ceramics International*, 49, 40746-40753, doi:10.1016/j.ceramint.2023.10.058