

## واکنش‌های فازی و شیمیایی در فرآیند پخت آجر حاوی سرباره فولاد

مهدی ترابی کاوه<sup>۱</sup>، مهناز خدایی<sup>۱\*</sup>، منصوره سادات ناظم<sup>۱</sup>

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشگاه یزد، یزد

Khodami\_m@yazd.ac.ir\*

### چکیده

واکنش‌های فازی و شیمیایی در فرآیند پخت آجر رسی حاوی سرباره فولاد مشابه فرآیندهای دگرگونی است. پخت آجر با اضافه کردن سرباره فولاد به خاک رس انجام گردید. مواد اولیه شامل خاک حاوی کوارتز، فنزیت، آلبیت، کلسیت، دولومیت، کانی‌های رسی و سرباره فولاد دارای فازهای ماگنتیت، ژپس، ماگنیوفریت و کوپرواسپینل بودند. پس از خردایش، اختلاط، قالب‌گیری و خشک کردن، نمونه‌ها در کوره با دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد پخته و به آجر تبدیل شدند. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن ۱۵ درصد وزنی سرباره فولاد به مواد اولیه تولید آجر موجب تشکیل فازهای جدید آنورتیت و پیروکسن در کنار هماتیت و فاز شیشه‌ای سیلیکاتی شده که نقش مؤثری در بهبود استحکام و پایداری حرارتی آجر دارد.

کلیدواژه‌ها: آجر، سرباره فولاد، آنورتیت، پیروکسن

## Phase and chemical reactions in the baking process of bricks containing steel slag

Mehdi Torabi Kaveh<sup>1</sup>; Mahnaz Khodami<sup>1</sup>; Mansoureh Sadat Nazem<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Yazd university, Yazd, Iran

Khodami\_m@yazd.c.ir

### Abstract

The phases and chemical reactions involved in the firing process of clay bricks containing steel slag are similar to those found in metamorphic processes. The bricks were created by incorporating steel slag into the clay. The raw materials included soil containing quartz, phengite, albite, calcite, and dolomite, as well as clay minerals and steel slag, which contained magnetite, gypsum, magnesioferite, and cuprospinel phases. After grinding, mixing, molding, and drying, the samples were baked in an electric furnace at 950°C. The results of this study indicated that incorporating 15% of steel slag into the raw materials for brick production led to the formation of new phases, including anorthite, pyroxene, hematite, and a silicate glass phase. These additions significantly enhance the strength and thermal stability of the bricks.

**Keywords:** Clay brick, Steel slag, Anorthite, Pyroxene

### ۱- مقدمه

آجر یکی از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی است که از ترکیب خاک رس، ماسه، آب و مواد افزودنی تهیه می‌شود. مواد افزودنی بمنظور بهبود کیفیت یا رنگ به مواد اولیه اضافه می‌شود. خواص نهایی آجر به ترکیب شیمیایی مواد اولیه و فرآیند پخت بستگی دارد. یافتن کاربردهای جدید برای استفاده از ضایعات صنعتی نظیر سرباره فولاد در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است.

زیرا علاوه بر کاهش هزینه تولید، سبب کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شوند. سرباره فولاد حاوی اکسیدهای آهن، سیلیس، کلسیم و منیزیم است و می‌تواند به عنوان افزودنی در تولید آجر استفاده شود. بررسی واکنش‌های فازی در حضور این مواد افزودنی برای بهینه‌سازی تولید آجر ضروری است. واکنش‌های فازی و شیمیایی تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد همانند فرآیندهای دگرگونی است و به شناخت بهتر واکنش‌های دگرگونی در فشار ثابت کمک کند.

## ۲- مواد و روش‌ها

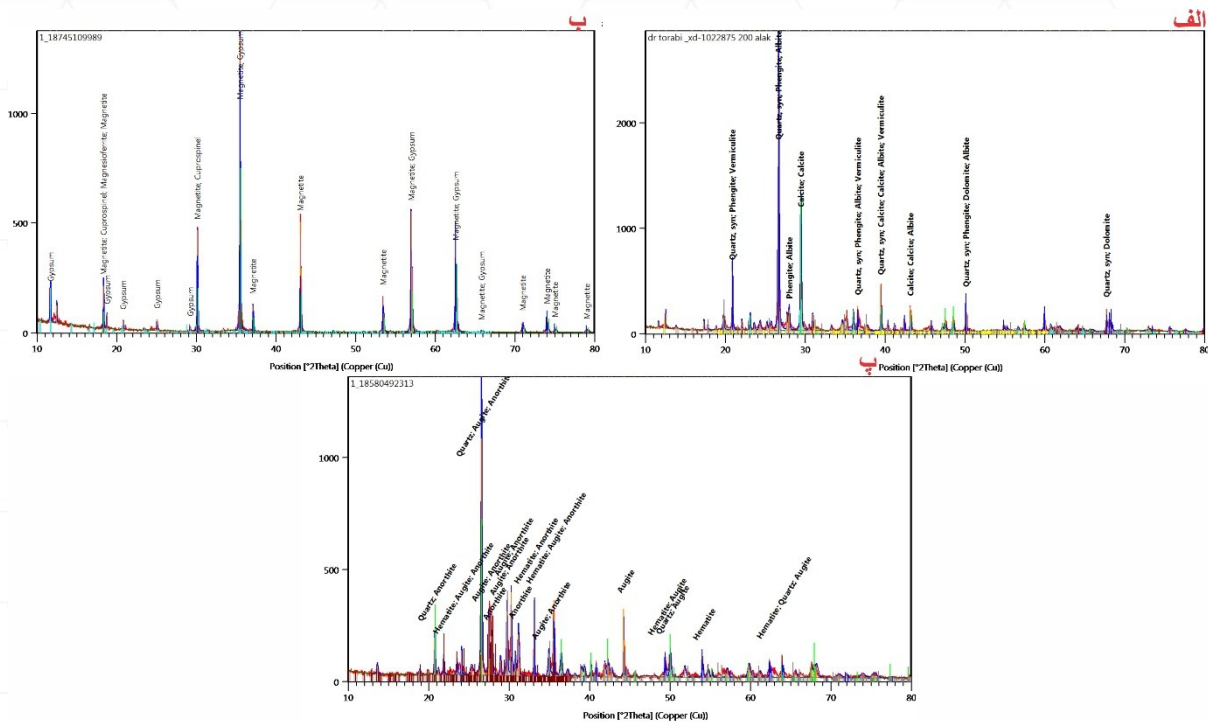
مخلوط خاک رس و سرباره با نسبت‌های مشخص پس از خردایش اولیه، آسیاب شدند تا مخلوطی از ذرات همگن و یکنواخت بدست آید. در ساخت آجر ۰/۵ کیلوگرم از مخلوط با نسبت‌های وزنی مناسب تهیه و سپس قالب‌گیری شد. نمونه‌ها در آون آزمایشگاهی خشک و پس از آن در کوره الکتریکی تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد با نرخ گرمادهی کنترل‌شده پخته شدند. فازهای موجود در مواد اولیه و آجر پخته شده با آزمایش پراش اشعه ایکس XRD شناسایی و تحلیل شدند.

## ۳- بحث

افزودن درصد معینی از سرباره فولاد به خاک مورد استفاده در فرآیند پخت آجر منجر به تشکیل فازهای کانیایی جدید می‌شود. با توجه به نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس فازهای کوارتز، فنزیت (مسکویت)، آلبیت، کلسیت، ورمیکولیت، دولومیت و کانی‌های رسی مانند اسمکتیت، ایلیت یا کائولینیت در نمونه خاک مصرفی شناسایی شدند (شکل ۱الف). همچنین نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه سرباره فولاد، حاکی از حضور فازهای بلورین مگنتیت  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ، ژپس  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، کوپروسپینل  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  و مگنزیوفریت  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  است (ناظم، ۱۴۰۴) (شکل ۱ب).

نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد که افزودن ۱۵ درصد سرباره فولاد به خاک مورد استفاده در مخلوط و پخت آن منجر به تشکیل فازهای جدیدی در ساختار آجر شده است. بر اساس رفتار حرارتی و شیمیایی فازهای مذکور، مجموعه‌ای از واکنش‌های فازی در طول پخت انتظار می‌رود. در آجر حاصل از این مواد، فازهای غالب شناسایی شده شامل آنورتیت، پیروکسن (اوژیت)، همتایت و شیشه سیلیکاتی هستند (شکل ۱پ). این فازهای جدید معمولاً ساختار بلوری قویتری دارند و می‌توانند به اتصال بهتر ذرات و افزایش استحکام آجر کمک کنند. در طول فرآیند پخت آجر ژپس ابتدا آب تبلور خود را از دست داده و سپس در دماهای بالاتر به اکسید کلسیم و گازهای گوگردی تجزیه می‌شود. کلسیت و دولومیت نیز در دماهای بین ۹۰۰ تا ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه شده و به اکسیدهای کلسیم، منیزیم و دی اکسید کربن تبدیل می‌شوند. خروج گازی اکسید کربن ممکن است منجر به تخلخل در ساختار آجر شود و اکسید کلسیم در صورت باقی ماندن در آجر و واکنش با رطوبت هوا، می‌تواند باعث انبساط و ترک خوردگی آجر شود. درحالی‌که این اکسیدها در واکنش با آلبیت و سایر سیلیکات‌ها، فازهای جدیدی از جمله پلاژیوکلاز نوع آنورتیت ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) و پیروکسن (اوژیت  $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al}, \text{Mn}, \text{Ti})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ ) تشکیل می‌دهند که استحکام آجر را بالا می‌برند (Dunham, 1992; Li, et al. 2017). کوارتز در حدود ۵۷۳ درجه سانتی‌گراد دچار تغییر پلی‌مورفی شده و به فازهای حرارت بالا تبدیل می‌شود و نهایتاً با افزایش بیشتر دما در تشکیل سیلیکات‌های حرارت بالا شرکت کند. کانی‌های ورقه‌ای از جمله فنزیت (مسکویت) و ورمیکولیت در دماهای پایین آب بین‌لایه‌ای خود را از دست داده، تجزیه می‌شوند و در دماهای بالاتر به فازهای آلومینوسیلیکاتی تبدیل می‌شوند یا آلومینیوم و سیلیس لازم برای تشکیل آنورتیت و پیروکسن را فراهم می‌کنند. حضور اکسیدهای قلیایی از جمله  $\text{Na}_2\text{O}$  حاصل از آلبیت و  $\text{K}_2\text{O}$  آزادشده از تجزیه فنزیت (مسکویت)، موجب کاهش نقطه ذوب بخشی و تشکیل فاز شیشه‌ای سیلیکاتی را تسهیل می‌کنند. فاز شیشه‌ای نقش مهمی در کاهش دمای ذوب، تسریع فرآیند جوش خوردگی و افزایش چسبندگی بین ذرات دارد.  $\text{K}_2\text{O}$  در صورت وجود مقادیر بیشتر آلومینیوم حتی می‌تواند

ارتوز تشکیل دهد که در این پژوهش تشکیل نشده است. مگنتیت در فرآیند پخت در شرایط اکسیداسیون به هماتیت ( $Fe_2O_3$ ) تبدیل می‌شود که موجب رنگ قرمز تا قهوه‌ای آجر می‌شود. مقادیری از آهن نیز وارد ساختار آنورتیت و پیروکسن می‌شود. اسپینل‌ها (ماگنیوفریت و کوپرواسپینل) معمولاً تا دماهای بالا پایداری دارند و می‌توانند به عنوان فازهای مقاوم در زمینه باقی بمانند یا با سیلیس، کلسیم و آهن واکنش داده و به تشکیل پیروکسن‌های آهن‌دار کمک می‌کنند (Dunham, 1992; Li et al, 2017; Abdrakhimov, 2025).



شکل ۱: الف) نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس نمونه خاک، ب) سرباره و پ) آجر پخته

#### ۴- نتیجه‌گیری

شناسایی فازهای آنورتیت، پیروکسن و هماتیت در آجر تولیدی در این پژوهش نشان می‌دهد که محصولات تجزیه کانی‌های خاک مورد استفاده وارد ساختار آنورتیت و پیروکسن شده‌اند، اکسیدهای قلیایی نقطه ذوب را کاهش داده و در تشکیل شیشه سیلیکاتی نقش داشته‌اند ولی مقدار آنها برای ساخت فلدسپار پتاسیم کافی نبوده است. هماتیت حاصل از اکسیداسیون ماگنتیت سرباره، باعث رنگ قرمز تا قهوه‌ای آجر شده است. عدم حضور اسپینل‌ها در آجر نیز نشان‌دهنده دخالت این فازها در ساخت و افزایش محتوای آهن پیروکسن است. همچنین با توجه به نتایج این پژوهش استفاده از ۱۵ درصد سرباره فولاد به عنوان افزودنی در تولید آجر رسی، سبب تغییر ترکیب فازی و تشکیل فازهای آنورتیت، پیروکسن و شیشه سیلیکاتی می‌شود که به بهبود استحکام مکانیکی، مقاومت سایشی و پایداری حرارتی آجر کمک می‌کند. از سوی دیگر خروج گاز و آب ناشی از تجزیه دولومیت، کلسیت، ژیپس و ورمیکولیت ممکن است موجب افزایش تخلخل شود.

#### ۵- تقدیر و تشکر

از شرکت فولاد مبارکه اصفهان که در انجام این پژوهش حمایت مالی را به عهده داشتند سپاسگزاری می‌شود.

#### ۶- مراجع

ناظم، م.، ۱۴۰۴. بازیافت سرباره فولاد در تولید آجرهای رسی پخته شده (مطالعه موردی سرباره فولاد شرکت فولاد مبارکه)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۹۳ صفحه.

Abdrakhimov, V.Z., 2025. The Effect of Metallurgical Iron-Containing Slag on the Technical Properties and Physicochemical Processes During the Firing of Ceramic Bricks. Theoretical Foundations of Chemical Engineering 59, 142–150.

Dunham A.C., 1992. Developments in industrial mineralogy: I. The mineralogy of brick-making, Proceedings of the Yorkshire Geological Society, 49, 95 – 104.

Li, B., He, M., Hwang, JY., et al. 2017. Characteristics of Anorthite-Pyroxene Ceramics Made from Hot-Poured Steelmaking Slag. JOM 69, 173–177.