Petrographic Studies of the Historical Bricks of the Chogha Zanbil World Heritage Site

Hamid Fadaei

Assistant Professor, Research Centre for Conservation and Restoration of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran-Iran

Abstract

The Chogha Zanbil world heritage site in Khuzestan is one of the most important Elamite sites, constructed using materials such as mud bricks and baked bricks. Today, the use of petrographic methods holds a special place in archaeometric studies of historical materials like bricks and stones. This cost-effective method allows for the extraction of valuable technical information from historical materials. The main objective of this article is to identify the mineralogical characteristics of historical brick samples from Chogha Zanbil through the microscopic examination of their thin sections. The details examined in the bricks include the types of minerals that make up the bricks, texture (including grain size and shape), porosity, types of impurities, and their distribution, all presented in detail along with relevant images. The results of the studies indicate that the apparent color of the bricks from Chogha Zanbil ranges widely from yellow, brown, and red to green. Microscopic examinations not only introduce some physical characteristics of the bricks from Chogha Zanbil but also identify the main minerals present in their structure, which include iron oxide grains, calcite, quartz, chert, gypsum, fine mica grains, and feldspar. Additionally, the conducted studies provide a clear picture of the weathering processes affecting the bricks, particularly under the influence of soluble salts.

Keywords: Brick, Petrography, Archaeometry, Chogha Zanbil WHS.

Knowledge of Conservation and Restoration

Vol. 5(2) No.12

September 2022

https://kcr.richt.ir

Pages: 35 to 52

Corresponding Author

Hamid Fadaei

Assistant Professor, Research Centre for Conservation and Restoration of Cultural Relics, Research Institute of Cultural Heritage and Tourism, Tehran-Iran

Email

hfadaii@yahoo.com

Copyright © 2020,Knowledge of Conservation and Restoration. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-noncommercial 4.0. International License which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cited.

مطالعات پتروگرافی آجرهای تاریخی محوطه میراث جهانی چغازنبیل

حمید فدایی

استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران.

چکیده

محوطه میراث جهانی چغازنبیل در خوزستان یکی از مهمترین محوطه‌های ایلامی است که با مصالحی از خشت و آجر بنا شده است. امروزه بهره‌گیری از روش پتروگرافی از جایگاه ویژه‌ای در مطالعات باستان‌سنجی مصالح تاریخی همچون آجر و سنگ برخوردار است و با این روش کم‌هزینه می‌توان اطلاعات فنی و ذی‌قیمت فراوانی را از مواد و مصالح تاریخی استخراج نمود. هدف اصلی این مقاله شناخت ویژگی‌های کانی‌شناسی نمونه آجرهای تاریخی چغازنبیل از طریق بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک آنها بوده است. جزییات مورد بررسی آجرها شامل: نوع کانی‌های تشکیل دهنده آجر، بافت (شامل اندازه و شکل دانه‌ها)، تخلخل، نوع ناخالصی‌ها و نحوه توزیع آنها بوده که به همراه تصاویر مربوطه به تفصیل ارایه شده است. نتایج مطالعات نشان می دهد رنگ ظاهری آجرهای چغازنبیل دارای طیف وسیعی از رنگ‌های زرد، قهوه‌ای، قرمز تا سبز هستند. بررسی‌های میکروسکوپی ضمن معرفی برخی ویژگی‌های فیزیکی آجرهای چغازنبیل، عمده کانی‌های موجود در ساختار آنها را از نوع دانه‌های اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، چرت، ژیپس، دانه‌های ریز میکا و فلدسپات معرفی می‌کند. همچنین بررسی‌های به عمل آمده تصویری روشن از فرآیندهای فرسایشی آجرها، به ویژه تحت تاثیر نمک‌های محلول ارایه داده است

واژگان کلیدی: آجر، پتروگرافی، باستان سنجی، محوطه میراث جهانی چغازنبیل

فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

سال پنجم، شماره ۲
شماره پیاپی ۱۲، تابستان ۱۴۰۱

https://kcr.richt.ir

صفحات: ۳۵ تا ۵۲

نویسنده مسئول

حمید فدایی

استادیار پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

رایانامه

hfadaii@yahoo.com

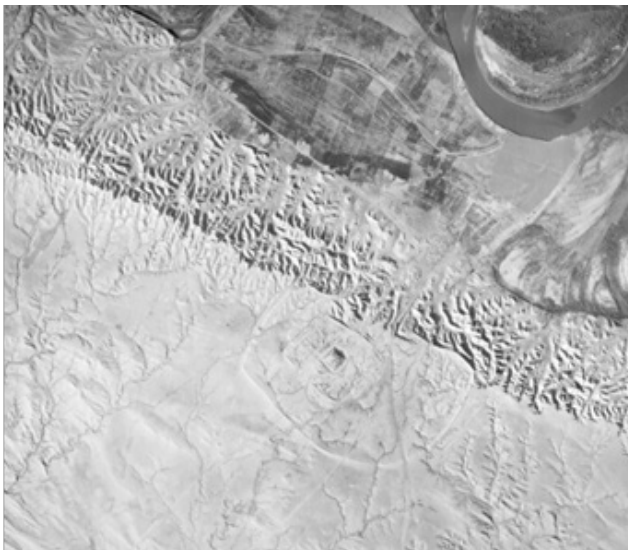
دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می‌شود.

مقدمه

محوطه تاریخی و میراث جهانی چغازنبیل در ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی شوش در استان خوزستان واقع شده است. چغازنبیل با نام باستانی دوراونتاش (Dur Untash)، نام شهری است که در اوایل قرن سیزدهم قبل از میلاد توسط اونتاش نپیریشا (Untash Napirisha) شاه مقتدر ایلامی در مجاورت رود دز بنیان گذارده شد (شکل ۱ و ۲). شهر دارای سه حصار است که در مرکز حصار میانی برج مطبقی که در آن زمان ذیقورات (Ziqqurrat) خوانده می‌شد، افراشته شده است. ذیقورات دارای پلانی مربع شکل بوده که طول هر ضلع آن حدود ۱۰۵ متر است. حجم خشتی ذیقورات با پوششی از آجر به ضخامت تقریبی ۲ متر پوشیده می‌شده است. البته این ضخامت در تمامی بخش‌های بنا یکسان نیست (گیرشمن، ۱۳۷۳). مصالح آجری مورد استفاده در چغازنبیل برای قرن‌ها حجم خشتی بناها و به‌ویژه معبد عظیم شهر را از گزند فرسایش‌های محیطی محفوظ نگاه داشته است

امروزه با گذشت قرن‌ها بخش عمده‌ای از این پوشش در اثر عملکرد عوامل محیطی کاملاً فرسایش یافته است. مطالعات میکروسکوپی امروزه نشان‌دهنده ویژگی‌های ساختاری و همچنین مشکلاتی هستند که آجرهای چغازنبیل با آن مواجه هستند(Larbi, 2004). به‌طور کلی مصالح آجری در چغازنبیل کارکردهای مختلفی را بر عهده داشته است؛ یعنی گاه در قالب آجرهای ساده به عنوان پوششی برای ساختارهای فرسایش‌پذیر خشتی، ضمن حفاظت از آن‌ها نقش سازه‌ای را نیز بر عهده داشته است و یا در قالب انواع آجرهای نوشته‌دار و آجرهای لعاب‌دار، نقشی تزیینی می‌یافته است (فدایی، ۱۳۸۲، ص. ۲۱۵)

بسیاری از آسیب‌های وارده به آجرهای چغازنبیل به‌دلیل حضور املاح در خاک اولیه ساخت آجرها و یا ناشی از انتقال املاح از محیط طبیعی اثر به درون ساختار مصالح بوده است (Franke and Grabau, 1998). به‌ویژه مطالعاتی که شاه‌بیگ و افشاریان‌زاده (۱۳۶۲) و ویسه و عمادی (۱۳۷۵) بر روی منابع خاک مناطق شوش، هفت‌تپه و دزفول انجام داده‌اند، نشانگر فراوانی حضور ترکیبات آهکی و گاه گچی در منابع خاک این منطقه است. منابع خاکی در منطقه چغازنبیل نیز دارای وضعیت کم و بیش مشابهی است



شکل ۱. عکس هوایی ۱:۲۰۰۰۰ محوطه چغازنبیل و منظر طبیعی رودخانه دز، سال ۱۳۴۲ شمسی، منبع: مرکز اسناد پایگاه جهانی چغازنبیل.
شکل ۲. ذیقورات چغازنبیل به همراه منظر طبیعی آن، منبع: داریوش کیانی.

زمین ساخت منطقه چغازنبیل

محوطـه چغازنبیـل در بخـش کوچکـی از زون سـاختاری زاگـرس چین‌خـورده جـای دارد کـه ویژگی‌هـای چینه‌شناسـی خاصـی بـر آن حاکـم اسـت. یکـی از سـازندهایی کـه در منطقـه چغازنبیـل رُخنمـون دارد، تاقدیـس سـردارآباد اسـت و بـر حسـب نـوع سـنگ و سـن از دیـد چینه‌شناسـی بـه واحدهـای سـازند آغاجـاری و عضو لهبـری آن تقسـیم شـده اسـت. سـنگ‌های تشـکیل‌دهنده ایـن سـازند از جنـس آواری‌هـا (ماسـه سـنگ و کنگلومرا) و دریایـی کـم عمـق (مـارن و گـچ) هسـتند. سـازند آغاجاری متشـکل از ماسـه سـنگ‌های دانه‌درشـت بـا سـیمانی سسـت اسـت. در ایـن ماسـه سـنگ‌ها در اکثـر نقـاط، لایه‌هـای مارنـی گـچ‌دار به‌صـورت بین‌لایـه‌ای وجـود دارنـد. همچنیـن سـازند عضـو لهبـری را بیشـتر مارن‌هـای گـچ‌دار، سـیلت اسـتون همـراه بـا لایه‌هـای نـازک گـچ و گل سـنگ تشـکیل داده اسـت. به‌دلیـل نرم‌فرسـا بـودن سـازندهای یـاد شـده و بـه ویـژه در عضـو لهبـری، ایـن سـازندها در محـدوده محوطـه چغازنبیـل اغلـب فرسـوده شـده و زیر پوشـش آبرفـت قـرار دارد و رخنمون‌هـا را تقریباً در نقاطـی کـه آبکنـد عمـل کـرده باشـد، می‌تـوان دیـد. فرسـایش آبکنـدی در نهشـته‌های نرم‌فرسـای مربـوط بـه سـازند آغاجـاری، به‌ویـژه عضـو لهبـری بیشـترین تغییـر ریخت‌شناسـی را در منطقـه سـبب شـده‌اند. در عضـو لهبـری بـه دلیـل چیرگـی مـارن، مارن‌هـای گـچ‌دار و سـیلت و ماسـه، تپـه ماهورهـای کم‌ارتفـاع ریخت‌هـای اصلـی را تشـکیل داده‌انـد (شـهرابی و ملک‌عباسـی، ۱۳۷۹)

بخشـی از طـول رودخانـه دز در مجـاورت محوطـه چغازنبیـل قـرار می‌گیـرد کـه ریخت‌شناسـی ویـژه‌ای دارد. ایـن رودخانـه در مجـاورت چغازنبیـل بارهـا تغییـر مسـیر داده و بسـتر دائمـی رودخانـه در مسـیر دیگـری قـرار گرفته اسـت، لـذا در طرفیـن ایـن رودپیچ‌هـا، رسـوبات زیـادی نهشـته شـده‌اند. نهشـته‌های دز در ایـن منطقـه به‌دلیـل شـیب کـم و نزدیکـی بـه دلتـای محـل تخلیـه (خلیـج فـارس) بیشـتر از نـوع دانه‌ریـز و در قالـب رس، سـیلت و ماسـه ریزدانـه هسـتند. موقعیـت مـکانی محوطـه چغازنبیـل از دیـدگاه زمین‌شـناسی واجـد ویژگی‌هـای زیـادی بـوده اسـت و بـه نظـر می‌رسـد شهرسـازان ایلامی در ۱۲۵۰ سـال قبـل از مـیلاد، در گزینـش آن بـه مـوارد زیـر توجـه داشـته‌اند

قـرار گرفتـن محوطـه در بلنـدی سـازند آغاجـاری بـه گونـه‌ای کـه از سـویی دیـد کافی را نسـبت بـه مناظـر و شـهرهای اطـراف (به‌ویـژه شـوش بـه عنـوان پایتخـت آن دوره) مهیـا می‌نمـود و از دیگـر سـو شـهر را از گزنـد سیلاب‌هـای روخانـه بـزرگی چـون دز مصـون نـگاه می‌داشـت

شهرسـازان ایلامـی بـا شـناخت کافـی نسـبت بـه نرم‌فرسـایی آبرفت‌هـای عضـو لهبـری، محـل شـهر را در جایـی انتخـاب نمودنـد کـه رخنمون‌هـای سـطحی سـازند آغاجـاری دیـده می‌شـود. ایشـان بـه درسـتی می‌دانسـته‌اند کـه گرچـه سـازند آغاجـاری (بخـش ماسه‌سـنگی و کنگلومرایـی) در اثـر فرسـایش هوازدگـی در قسـمت‌های سـطحی کـم مقاومـت و فرسـوده هسـتند ولی به‌عنـوان سـازندی سـخت شـده بـرای پـی و بنیـان بناهـا و معابـد ایـن شـهر مناسـب اسـت (نبیـان و ملک‌عبـاسی، ۱۳۷۹)

از دیربـاز به‌دلیـل وجـود مقادیـر زیـادی ترکیبـات کلسـیتی دانـه درشـت و همچنیـن مقادیـر زیـاد ژیپـس در ایـن سـازندها، بهره‌بـرداری از منابـع رسـی ــ مارنـی سـازندها در سـاخت بسـیاری از مصالـح از جملـه آجـر بـا محدودیت‌هـای زیـادی روبـرو بـوده اسـت. به‌همیـن جهـت بـه نظـر می‌رسـد معمـاران ایلامـی ایـن مشـکل را از طریـق بهره‌بـرداری از ذخایـر خـاک رودخانـه دز کـه در مجـاورت محوطـه قـرار دارد برطـرف نموده‌انـد. البتـه امـروزه آجرهـای مـورد اسـتفاده در سـاخت معابـد ایـن شـهر بـه نسـبت‌های متفاوتـی تحـت تأثیـر فرسـایش و هوازدگـی قـرار گرفته‌انـد. مهم‌تریـن عامـل ایـن فرسـایش و تخریـب وفـور ترکیبـات کلسـیتی و ژیپسـی در منطقـه و نقـل و انتقـال آن به‌صـورت نمک‌هـای محلـول (Arnold & Zehnder, 1987) از نـوع کربناتـی و سـولفاتی بـه سـاختار آجرهـا اسـت کـه تبلـور مکـرر آن‌هـا بـه تخریـب مصالـح آجـری منجـر گردیـده اسـت. چنیـن فرآینـدی در تخریـب ماسـه سـنگ‌های سـازند آغاجـاری نیـز نقـش اساسـی ایفـا نمـوده اسـت (شـهرابی و ملک‌عباسـی، ۱۳۷۹)

مواد و روش‌ها

آجرها ساده مورد استفاده در چغازنبیل را می‌توان بر اساس ابعاد آن‌ها به دو گروه عمده آجرهای مربع شکل و آجرهای مستطیل شکل تقسیم نمود. هر یک از این دو گروه بر اساس اندازه‌ها به انواع بزرگ، متوسط و یا کوچک دسته‌بندی می‌گردند (جدول۱). مطالعات سنگ‌نگاری (Petrography) آجرها به دو صورت ماکروسکوپی و میکروسکوپی صورت گرفته است. به این منظور تعداد ۹ نمونه از آجرهای مختلف انتخاب گردید. ملاک انتخاب آجرها، وجود اختلاف در ویژگی‌های ظاهری همچون تنوع در رنگ، بافت، میزان سختی و یا سستی آجرها بوده است. در بررسی میکروسکوپی ابتدا از نمونه‌های آجر با کدهای ۱ تا ۹ مقاطع نازک (Thin section) تهیه گردید. این مقاطع توسط میکروسکوپ پلاریزان نوری (Polarizing Microscope) بررسی گردید. علاوه بر آن از مقاطع مختلف عکس‌برداری میکروسکوپی به‌عمل آمد که تمامی عکس‌ها در نور XPL گرفته شده است. همچنین بررسی‌های ماکروسکوپی به‌منظور شناسایی ویژگی‌هایی همچون بافت و تخلخل در نمونه‌های آجر و توسط استریو میکروسکوپ انجام پذیرفته است. بسیاری از تصاویر با نمونه‌های استاندارد مقایسه گردید (Quinn et al., 2011)

در این نوشتار ابتدا به ویژگی‌های کانی‌شناسی هر یک از آجرها اشاره می‌شود و آنگاه ویژگی‌های ماکروسکوپی و نیز مقایسه مشاهدات میکروسکوپی با نتایج پراش‌سنجی پرتوایکس (X Ray Difraction-XRD) بیان می‌گردد. تهیه مقاطع و مطالعه میکروسکوپی نمونه‌ها در آزمایشگاه پتروگرافی گروه تحقیقات مواد خام و مصالح ساختمانی مرکز تحقیقاتِ شرکت فرآورده‌های نسوز آذر اصفهان انجام شده است و آزمایش‌های پراش‌سنجی پرتوایکس در پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی – فرهنگی به انجام رسیده است.

بررسی نمونه آجر شماره ۱

(کد نمونه: ۱/٤١٤ ـ چ. ز)

رنگ: قهوه‌ای روشن (شکل ۳)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتوایکس

(XRD): Calcite, Quartz

الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

ضخامت این آجر حدود ۸ سانتیمتر است. نمونه از نظر بافت، متخلخل بوده که منافذ آنگاه به‌طور ثانویه پر شده‌اند. کانی پرکننده تخلخل‌ها شوره بوده که بخش عمده آن به هنگام تهیه مقطع شسته شده است. رنگ آجر به‌دلیل حضور ترکیبات اکسید آهن موجود در مواد تشکیل‌دهنده آن قهوه‌ای روشن است. نمونه از یکنواختی و استحکام مطلوبی برخوردار است

ب) بررسی میکروسکوپی

این نمونه به‌طور عمده دارای زمینه‌ای (Matrix)

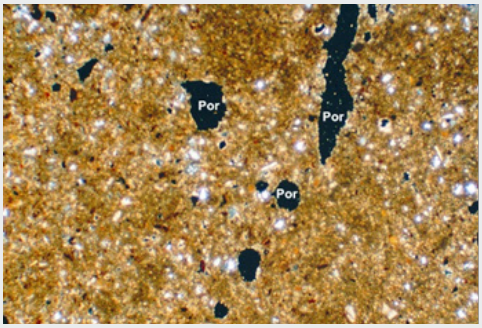
جدول ۱. میانگین ابعاد و اندازه برخی از انواع آجرهای ساده به‌کار رفته در چغازنبیل (فدایی و دیگران، ۱۳۹۴، ص. ۴)

ردیف	انواع آجر	میانگین ابعاد و اندازه
۱	ابعاد آجرهای مربع شکل بزرگ	۱۰ × ۴۰ × ۴۰ سانتیمتر
۲	ابعاد آجرهای مربع شکل کوچک	۸/۵ × ۳۳ × ۳۳ سانتیمتر
۳	ابعاد آجرهای مربع شکل متوسط	۹ × ۱۶/۵ × ۱۷ سانتیمتر
۴	ابعاد آجرهای مستطیل شکل بزرگ	۹ × ۱۶ × ۳۷ سانتیمتر
۵	ابعاد آجرهای مستطیل شکل متوسط	۱۰ × ۱۴/۵ × ۲۵ سانتیمتر

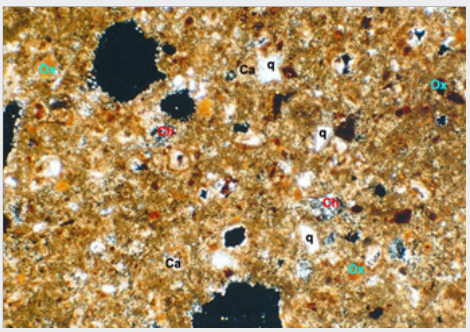
مخلـوط از کانی‌هـای رسـی (Clay mineral)، کلسـیت و اکسـید آهـن اسـت، بـه گونـه‌ای کـه رس و کلسـیت ریزدانـه به‌خـوبی آغشـته بـه مـواد آهـن‌دار بـوده و بـه همیـن خاطـر زمینـه بـه رنـگ قهـوه‌ای ــ قرمـز دیـده می‌شـود (شـکل ۴). در نمونـه مذکـور دانه‌هـای اکسـید آهـن، کوارتـز، کلسـیت، چـرت، فلدسـپات و اکسـید آهـن مشـاهده می‌گـردد کـه فراوان‌تریـن آن‌هـا دانه‌هـای اکسـید آهـن و سـپس کوارتـز اسـت (شـکل ۵). دانه‌هـای اکسـید آهـن عمدتـاً از اوپکـی شـدن (Opacified) کانی‌هـای اولیـه کـه هـم اکنـون شناسـایی آن‌هـا ممکـن نیسـت، پدیـدار گشـته‌اند. ایـن دانه‌هـا به‌صـورت ذرات بسـیار ریـز همـراه بـا سـایر کانی‌هـای زمینـه و نیـز بـه شـکل دانه‌هـای درشـت قهـوه‌ای، قرمـز و زرد پراکنـده در زمینـه وجـود دارنـد

سـیلیس در ایـن نمونـه بـه دو گونـه کوارتـز اولیـه و چـرت (سـیلیس ریزدانـه) ثانویـه دیـده می‌شـود. دانه‌هـای کوارتـز عمدتـاً بـه شـکل قطعـات زاویـه‌دار دیـده می‌شـوند. چـرت عمدتـاً فضاهـای خالـی تخلخل‌هـا را پـر نمـوده اسـت. سـیلیس حـدود ۱۰ تـا ۱۵ درصـد از دانه‌هـا را تشـکیل می‌دهـد. کلسـیت در ایـن آجـر بـه دو گونـه اولیـه و ثانویـه وجـود دارد. کلسـیت اولیـه آغشـته بـا کانی‌هـای رسـی و بـا دانه‌هـای درشـت بـوده و کلسـیتِ ثانویـه عمدتـاً در حواشـی تخلخل‌هـا رشـد یافتـه اسـت. دانه‌هـای کوارتـز فراوان‌تـر از کلسـیتِ درشـت‌دانه اولیـه مشـاهده می‌شـوند. دانه‌هـای فلدسـپات عمدتـاً به‌صـورت پلاژیـوکلاز (Plagioclase) و بـه مقـدار بسـیار انـدک در نمونـه وجـود دارنـد (شـکل ۶)

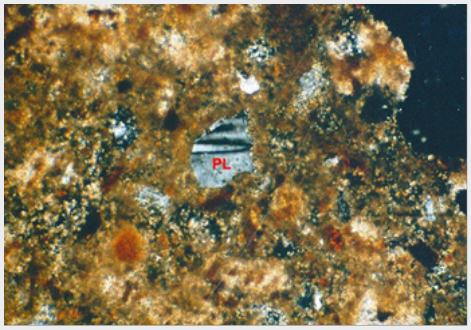
شکل ۳. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۱.



شکل ۴. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۱ (XPL,×29).



شکل ۵. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca)، کوارتز (q) و چرت (Ch) در زمینه قهوه‌ای رنگ آجر (XPL,×73).



شکل۶. پلاژیوکلاز (PL) در زمینه آجر (XPL,×115).

بررسی نمونه آجر شماره ۲

(کد نمونه: ۱/۴۱۵ ـ چ. ز)

رنگ: سبز کم‌رنگ (شکل ۷)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

(XRD): Calcite, Dolomite, Pyroxene, Quartz

الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

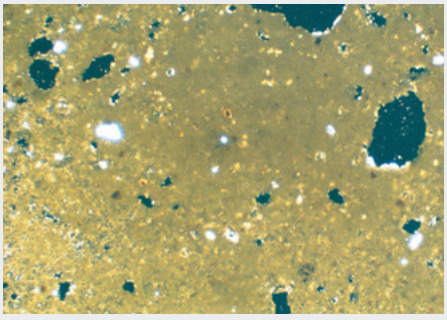
ضخامت آجر حدود ۱۰ سانتیمتر و به رنگ سبز کم رنگ است. این نمونه دارای بافتی متخلخل اما با تخلخلی کمتر از نمونه شماره ۱ است. در سطح آجر و نیز گاهی در منافذ آجر مواد ثانویه دیده می‌شود. حضور مواد ثانویه در ساختار این آجر در قیاس با بیشتر نمونه‌های بررسی شده بسیار اندک است. آجر در مقایسه با نمونه آجر شماره ۱ به دلیل اکسید آهن کمتر (از نوع هماتیت)، فاقد رنگ قرمز است

ب) بررسی میکروسکوپی

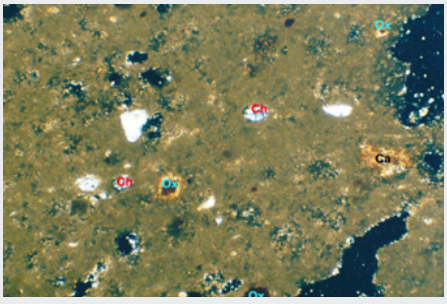
زمینه به‌طور عمده از کلسیت و کانی‌های رسی به همراه آغشتگی با مواد آهن‌دار تشکیل یافته است. آغشتگی این نمونه به مواد آهن‌دار از نمونه شماره ۱ کمتر است (شکل ۸). از کانی‌های موجود در این آجر می‌توان به دانه‌های اکسید آهن، کوارتز، چرت، کلسیت و فلدسپات اشاره نمود. فراوانی دانه‌های کوارتز و چرت به اندازه فراوانی دانه‌های اکسید آهن است، ولی کلسیت دانه‌درشت، فراوانی کمتری دارد. دانه‌های اکسید آهن به‌صورت پراکنده در زمینه مشاهده می‌شوند، ولی فراوانی کمتر نسبت به نمونه شماره ۱ دارند. این دانه‌ها نیز عمدتاً از اوپکی شدن کانی‌های اولیه حاصل گشته‌اند (شکل ۹). سیلیس به دو گونه کوارتز دانه درشت اولیه و چرت ثانویه دیده می‌شود. دانه‌های مذکور عمده دانه‌های زمینه آجر را تشکیل می‌دهند و میزان آن‌ها حدود ۲/۵ درصد کل آجر است. کوارتز به شکل قطعات زاویه‌دار و چرت اساساً به عنوان پرکننده فضای خالی در زمینه وجود دارند

کربنات‌ها (کلسیت + دولومیت) به شکل اولیه در زمینه و نیز به‌صورت ثانویه در حاشیه تخلخل‌ها

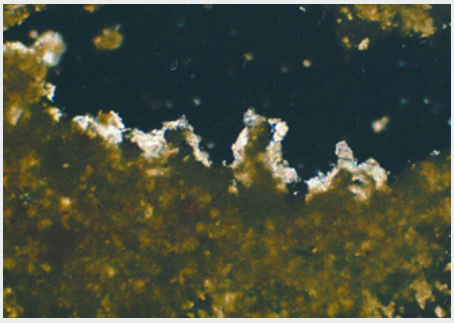
شکل ۷. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۲.



شکل۸. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۲ (XPL,×29).



شکل۹. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کوارتز (q)، چرت (Ch) و کلسیت (Ca) موجود در زمینه آجر (XPL,×73).



شکل۱۰. کلسیت ثانویه (Ca) در حاشیه تخلخل (XPL,×185).

دیـده می‌شـوند (شـکل ۱۰). در نتایـج آزمایـش XRD ایـن نمونـه، دولومیـت گـزارش شـده اسـت کـه به‌علـت شـباهت خـواص نـوری کلسـیت و دولومیـت تشـخیص آن از طریـق میکروسـکوپ نـوری امکان‌پذیـر نیسـت. بنابراین می‌تـوان به‌طـور کلـی از کربنـات نـام بـرد کـه شـامل کلسـیت و دولومیـت در ایـن نمونه اسـت. فلدسـپات اساسـاً به‌صـورت پلاژیـوکلاز بـه مقـدار بسـیار انـدک مشـاهده می‌گـردد. پیروکسـن کـه در نتایـج آزمایشـات XRD گـزارش گردیـده بـود کـه در بررسـی‌های میکروسـکوپی مشـاهده نگردیـد

بررسی نمونه آجر شماره ۳

(کد نمونه: ۱/٤١٦ ـ چ. ز)

رنگ: لایه سطحی به رنگ قرمز و بخش درونی قهوه‌ای رنگ (شکل ۱۱)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

(XRD): Calcite, Quartz, Gypsum, Feldspar, Dolomite

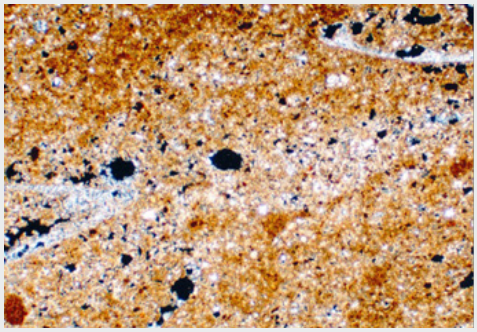
الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

ضخامـت ایـن آجـر ۷/۵ سـانتیمتر بـوده و بـه لحـاظ رنگ، در مقطـع ایـن نمونـه آجـر دو بخـش قابـل تفکیـک وجـود دارد: بخـش سـطحی کـه بـه رنـگ قرمـز اسـت و بخـش درونـی کـه بـه رنـگ قهـوه‌ای کم‌رنـگ اسـت. ضخامـت بخـش سـطحی حـدود ۹ میلی‌متـر اسـت و یـک سـمت آن نیـز فاقـد ایـن لایـه سـطحی اسـت. مـرز میـان دو سـطح در امتـداد یـک خـط مشـخص از یکدیگـر قابـل تفکیـک هسـتند. تخلخـل آجـر از نمونـه آجـر شـماره ۲ کمتـر بـوده و بافتـی یکدسـت و بـا تراکـم بیشـتر در آن به چشـم می‌خـورد. نمونـه حـاوی ترکیبـات ثانویـه به‌صـورت ژیپـس اسـت

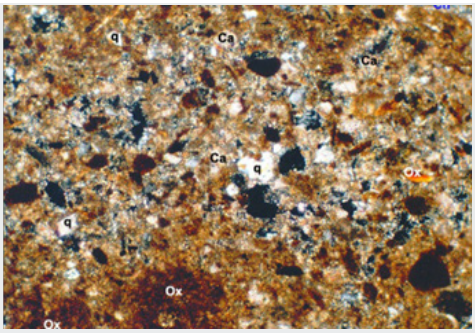
ب) بررسی میکروسکوپی

بخـش سـطحی ایـن نمونـه آجـر قرمـز رنـگ بـوده و بخـش درونـی آن بـه رنـگ قهـوه‌ای کمرنـگ اسـت. در بررسـی میکروسـکوپی زمینـه آجـر، بخـش سـطحی آغشـتگی بیشـتری را بـه اکسـید آهـن نشـان می‌دهـد. علاوه بـر آن دانه‌هـای اکسـید آهـن نیـز به‌صـورت مجـزا در زمینـه یافـت می‌شـوند، امـا به‌تدریـج بـه سـمت درونـی آجـر، از مقـدار اکسـید آهـن کاسـته می‌گـردد (شـکل۱۲). از جملـه دانه‌هـای موجـود در ایـن آجـر بـه ترتیـب فراوانـی می‌تـوان دانه‌هـای اکسـید آهـن، کلسـیت، چـرت، ژیپـس و فلدسـپات تـازه تشـکیل یافتـه را نـام بـرد (شـکل ۱۳). دانه‌هـای کوارتـز در مقایسـه بـا نمونه‌هـای قبلـی به‌مراتـب کمتـر اسـت در حالی‌کـه چـرت بـه همـان میـزان وجـود دارد. چرت‌هـا غالبـاً در حاشـیه تخلخل‌هـا قـرار گرفتـه و گاه نیـز منافـذ را پـر کرده‌انـد. ژیپـس یـا به‌صـورت سـتون‌های منشـوری شـکل در حاشـیه تخلخل‌هـا رشـد یافتـه و یـا حفـرات را کاملاً پـر نمـوده اسـت (شـکل ۱۴)

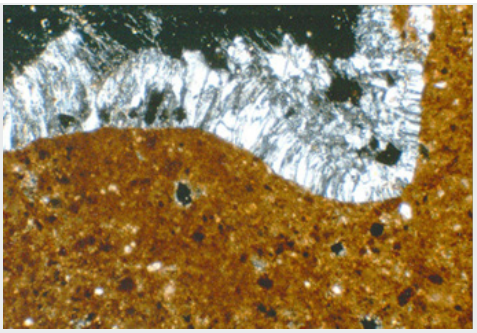
شکل ۱۱. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۳ (XPL,×115).



شکل۱۲. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل‌دهنده و تخلخل (Por) در بخش درونی و قهوه‌ای رنگ آجر شماره ۳ (XPL,×29).



شکل ۱۳. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca)، کوارتز (q)، چرت (Ch) در زمینه آجر (XPL,×115).



شکل ۱۴. ستون‌های منشوری شکل ژیپس به رنگ خاکستری و سفید در حاشیه تخلخل(XPL,×73).

بررسی نمونه آجر شماره ٤

(کد نمونه: ۱/٤۱۷ ـ چ. ز)

رنگ: قهوه‌ای کم رنگ (شکل ۱۵)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

(XRD): Calcite, Quartz, Gypsum

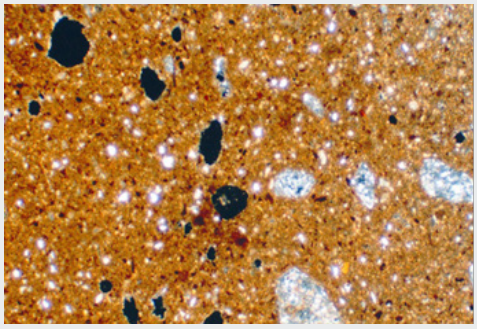
الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

ضخامت این آجر ۱۱ سانتیمتر است و رنگ آن قهوه‌ای کم‌رنگ است که این رنگ به‌طور محسوسی به سمت عمق آجر، تیره‌تر می‌شود. اختلاف رنگ فوق بسیار جزیی است. میزان تخلخل آجر کمی بیش از نمونه آجر شماره ۳ است. در داخل حفرات این آجر کانی‌های ثانویه به‌صورت شوره به‌خوبی و بیش از نمونه قبلی مشاهده می‌شود

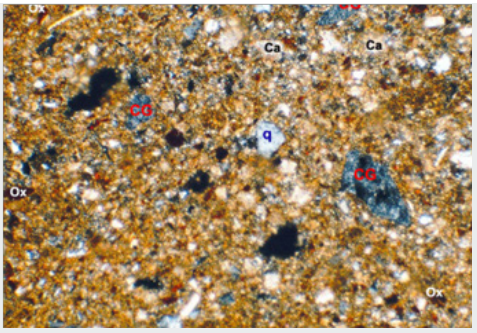
ب) بررسی میکروسکوپی

زمینه این آجر نیز مخلوطی از رس، کلسیت و اکسید آهن است؛ با این تفاوت که در مقایسه با نمونه‌های قبلی مقدار دانه‌ها بیشتر است (شکل ۱۶). دانه‌های موجود در زمینه به‌ترتیب فراوانی شامل دانه‌های اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، چرت، ژیپس، دانه‌های ریز میکا و فلدسپات هستند (شکل ۱۷). دانه‌های اکسید آهن به فراوانی وجود دارند که همانند نمونه‌های قبلی از «اوپکی» شدن کانی‌های پیشین حاصل گشته‌اند. همچنین اکسید آهن زمینه را به‌خوبی آغشته نموده است. دانه‌های کلسیت نسبت به نمونه‌های قبلی فراوان‌تر و از جمله دانه‌های شاخص‌تر است. دانه‌های کوارتز و چرت نیز به‌خوبی در این نمونه آجر مشاهده می‌گردد. ژیپس عمدتاً به‌صورت ثانویه جانشین کانی‌های اولیه‌ای شده که

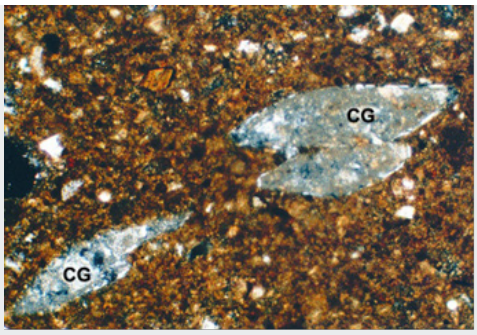
شکل ۱۵. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۴.



شکل ۱۶. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۴ (XPL,×29).



شکل۱۷.دانه‌های‌اکسیدآهن(Ox)،کلسیت(Ca)،کوارتز (q)،چرت(Ch)و ژیپس به همراه چرت (CG) در زمینه آجر (XPL,×73).



شکل۱۸. مخلوط ژیپس و چرت (CG) به صورت پزودومورف کانی پیشین(XPL,×115).

شکل آن در بافت کلی آجر حفظ شده است. به‌عبارت دیگر ژیپس، پزودومورف (Pseudomorph) کانی قبلی شده است. این قالب‌های پزودومورف در نمونه فراوان هستند و اغلب توسط ژیپس و چرت پر گشته‌اند (شکل ۱۸). دانه‌های ریز میکا و نیز فلدسپات به مقدار بسیار جزیی در این نمونه قابل شناسایی است

بررسی نمونه آجر شماره ۵

(کد نمونه: ۱/۴۱۸ ـ چ. ز)

رنگ: قرمز کم‌رنگ (شکل ۱۹)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

(XRD): Calcite, Quartz, Dolomite

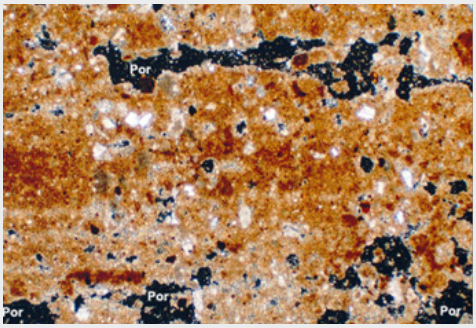
الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

ضخامت این آجر ۸/۵ سانتیمتر است و رنگ آن قرمز کمرنگ است که این رنگ، به سمت عمق آجر به‌طور محسوسی، به سمت قهوه‌ای متمایل به خاکستری می‌گراید. تفکیک این دو سطح و تعیین مرز مشخصی میان آن دو ناممکن است. تخلخل این نمونه آجر مشابه با آجر شماره ۴ است. ترکیبات ثانویه در بافت درونی آجر و درون منافذ کمتر بوده و آغشتگی به مواد ثانویه به‌صورت لایه‌ای از شوره و رسوبات، عمدتاً در سطح آجر دیده می‌شود

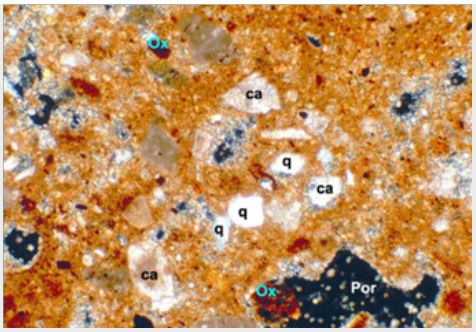
ب) بررسی میکروسکوپی

این آجر نیز عمدتاً از زمینه کلسیتی ــ رسی آغشته به اکسید آهن تشکیل یافته است (شکل ۲۰). عمده دانه‌های موجود در زمینه عبارتاند از دانه‌های اکسید آهن، کلسیت، کوارتز و چرت که اساساً اندازه دانه‌ها در این نمونه از نمونه‌های قبلی درشت‌تر است (شکل ۲۱). دانه‌های اکسید آهن در این مقطع به‌وفور

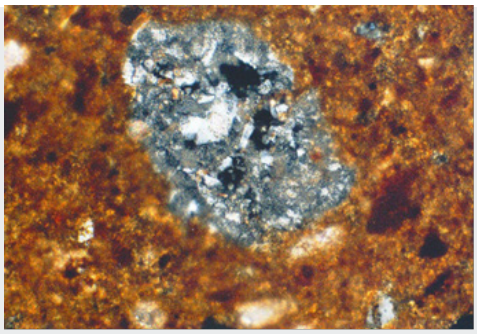
شکل ۱۹. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۵.



شکل۲۰. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۵ (XPL,×29).



شکل ۲۱ـ دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca)، کوارتز (q) در زمینه آجر (XPL,×73).



شکل ۲۲. دانه‌های اکسید آهن (Ox) و چرت (Ch) موجود در زمینه (XPL,×185).

یافت می‌شوند. کلسیت عمدتاً به‌صورت اولیه و به شکل دانه‌های درشتِ مجزا به‌خوبی دیده می‌شود. دانه‌های کلسیت در مقایسه با نمونه‌های قبلی درشت‌تر و فراوان‌تر می‌باشند. کوارتز و چرت نیز در زمینه حضور دارند (شکل ۲۲)

بررسی نمونه آجر شماره ٦

(کد نمونه: ۱/٤۱۹ ـ چ. ز)

رنگ: قرمز (شکل ۲۳)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

(XRD): Calcite, Quartz

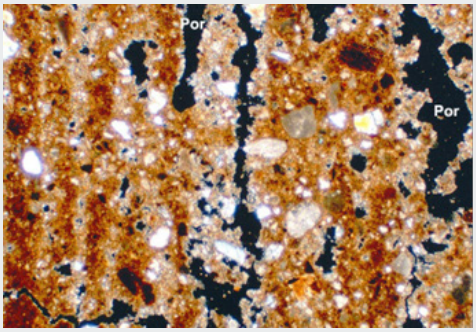
الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

ضخامت این آجر ۸/۵ سانتیمتر و رنگ آن قرمز کمرنگ است. مشخصات فیزیکی این آجر بسیار شبیه به لایه سطحی در آجر شماره ۵ است. تخلخل آن از آجر شماره ۵ بیشتر و نسبت به آن بسیار سست‌تر است، به‌گونه‌ای که آجر با فرسایش سطحی زیادی روبرو است. ترکیبات ثانویه به شکل رسوبات و شوره تا حدودی در سطح آجر مشاهده می‌شوند

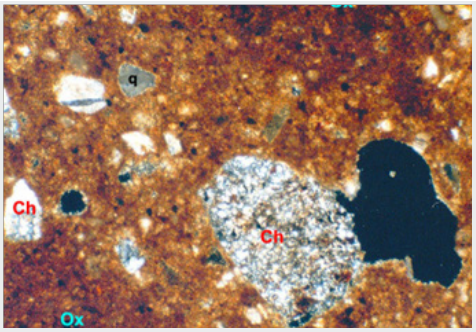
ب) بررسی میکروسکوپی

زمینه این آجر مخلوطی از کلسیت، رس و مقدار زیادی اکسید آهن است (شکل ۲۴). فراوانی دانه‌ها در آن بیشتر و اندازه آن‌ها از تمامی نمونه‌های قبلی درشت‌تر است (همین مسئله می‌تواند یکی از دلایل سست بودن بیشتر این نمونه نسبت به نمونه‌های قبلی باشد). دانه‌های تشکیل‌دهنده آجر شامل اکسید آهن، کلسیت و کوارتز ریزدانه، چرت، فلدسپات و میکا است. دانه‌های کوارتز، کلسیت و اکسید آهن به مقدار فراوان در زمینه آجر حضور داشته و چرت اساساً به‌صورت پرکننده حفرات دیده می‌شود (شکل ۲۵). فلدسپات و میکا نیز به مقدار جزیی در زمینه یافت می‌شوند (شکل ۲۶)

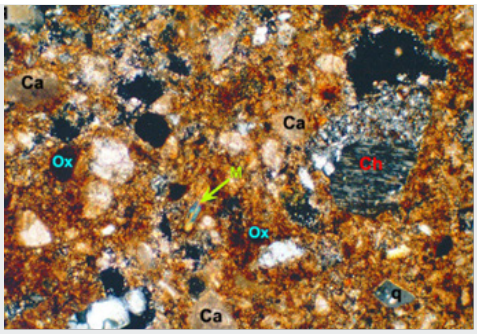
شکل ۲۳. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۶.



شکل ۲۴. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۶ (XPL,×29).



شکل ۲۵. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca)، کوارتز (q) و چرت (Ch) در زمینه آجر (XPL,×73).



شکل ۲۶. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca)، کوارتز (q)، میکا (M) و چرت (XPL,×115).

بررسی نمونه آجر شماره ۷

(کد نمونه: ۱/۴۲۰ ـ چ. ز)

رنگ: قهوه‌ای روشن (شکل ۲۷)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

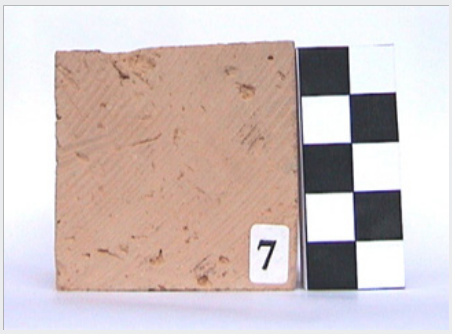
(XRD): Calcite, Quartz

الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

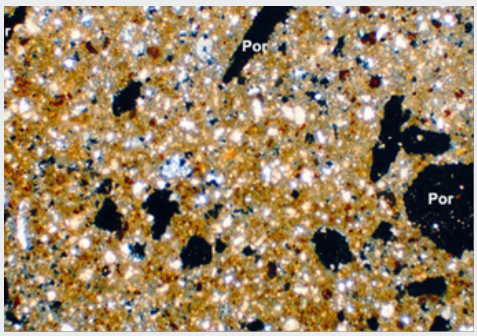
نمونه مورد مطالعه بخشی از یک آجر نوشته به‌کار رفته در بدنه ذیقورات است. ضخامت این آجر نوشته ۹/۵ سانتیمتر و رنگ آن قهوه‌ای کم‌رنگ است. آجر از یکنواختی و استحکام بسیار خوبی برخوردار بوده و فاقد حفرات بزرگ و عمده در مقطع است. در واقع با وجود تخلخل زیاد، منافذ دارای قطر کم و بسیار موییـن هستند. فراوانی شوره چه در سطح و چه در ساختار آجر به چشم می‌خورد به گونه‌ای که تجمع آن باعث پر شدن تمامی خلل و فرج در نمونه شده است

ب) بررسی میکروسکوپی

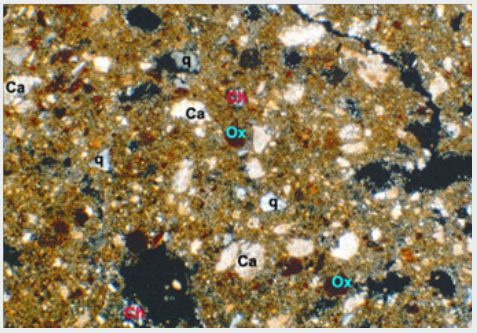
زمینه این آجر از کلسیت، رس و اکسید آهن تشکیل یافته است. مقدار اکسید آهن آن کمتر از نمونه آجر شماره ۶ است. میزان دانه‌ها در آن فراوان و شکل دانه‌بندی ریزتر از نمونه آجر شماره ۶ است (شکل ۲۸). این آجر دارای دانه‌های کلسیت اولیه درشت بلور، دانه‌های اکسید آهن، کوارتز و چرت است (شکل ۲۹). چرت اغلب حفرات را پر نموده است که در شکل ۳۰ به‌خوبی نمایان است



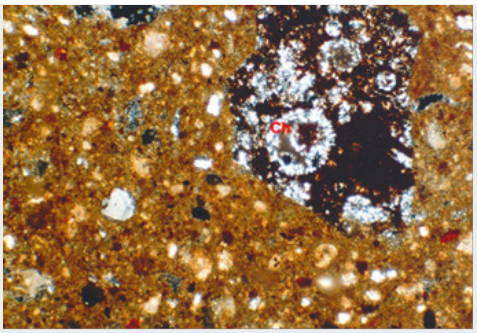
شکل ۲۷. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۷.



شکل۲۸. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۷ (XPL,×29).



شکل۲۹. دانه‌های کلسیت اولیه درشت بلور (Ca)، اکسید آهن (Ox)، کوارتز (q) و چرت(XPL,×73).



شکل ۳۰. چـرت (Ch) پرکننده حفرات در نمـونه آجـر (XPL,×73).

نمونه آجر شماره ۸

(کد نمونه: ۱/۴۲۱ ـ چ. ز)

رنگ: با سه طیف رنگی قرمز، قهوه‌ای و خاکستری (شکل ۳۱)

نتیجه آنالیز با پراش سنج پرتو ایکس (XRD):

بخش سطحی قرمز رنگ:
Calcite, Quartz , Gypsum, Dolomite

بخش میانی قهوه ای رنگ: Calcite, Quartz

بخش درونی خاکستری:
Calcite, Quartz , Feldspar, Dolomite

الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

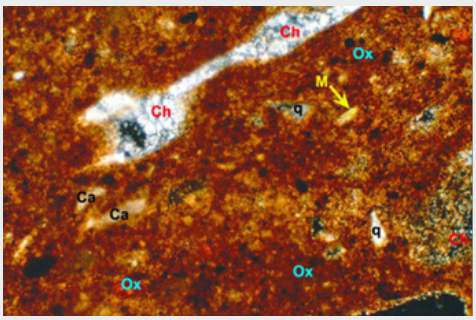
ضخامـت ایـن آجـر حـدود ۸/۵ سـانتیمتر اسـت. همان‌گونه کـه ذکـر گردیـد در مقطـع ایـن آجـر سـه بخـش متفـاوت را می‌تـوان شناسـایی و تفکیـک نمـود کـه عبارتانـد از: بخـش سـطحی بـه رنـگ قرمـز بـا ضخامـت تقریبـی ۸ تا ۱۰ میلی‌متـر و بـا یـک مـرز مشـخص، بخـش میانـی بـه رنـگ قهـوه‌ای روشـن و بخـش درونـی و مغـز آجـر کـه به رنـگ خاکسـتری اسـت. ضخامـت دو بخـش اخیـر بسـیار متغیـر بـوده به‌گونـه‌ای کـه در نمونـه آجـر مـورد مطالعـه ایـن ضخامـت بیـن ۱ تـا ۴ سـانتیمتر متفـاوت بـود

آجـر در بخـش خاکسـتری رنـگِ میانـی کاملاً سسـت و زودفرسـا اسـت و تنهـا، بخـش قرمـز رنـگِ سـطحی و تـا حـدودی بخـش میانـی از اسـتحکام نسـبتاً خوبـی برخورداراسـت. تخلخـل در ایـن نمونـه آجـر بسـیار زیـاد بـوده و انـدازه منافـذ به‌ویـژه در بخـش میانـی و خاکسـتری رنـگ آجـر، بزرگتـر از سـایر نمونه‌هـا اسـت. در ایـن نمونـه آجـر ترکیبـات ثانویـه و پرکننـده خلـل و فـرج از قبیـل ژیپـس و شـوره کمتـر وجـود دارنـد

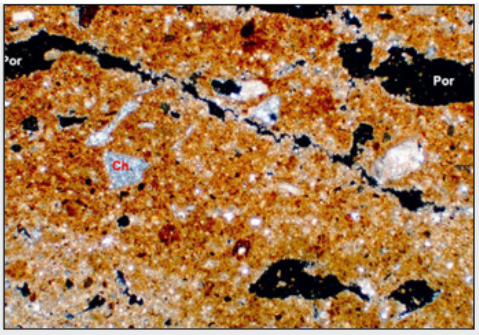
ب) بررسی میکروسکوپی

در مقطـع ایـن آجـر سـه بخـش سـطحی (بـه رنـگ قرمز)،

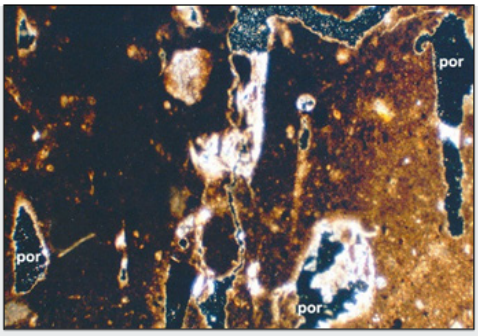
شکل۳۱. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۶.



شکل۳۲. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca)، کوارتز (q)، میکا (M) و چرت (Ch) در لایه سطحی (XPL,×115).



شکل۳۳. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده وتخلخل (Por) در لایه میانی آجر شماره ۸ (XPL,×29).



شکل۳۴. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در لایه درونی آجر شماره ۸ (XPL,×29).

بخش میانی (به رنگ قهوه‌ای روشن) و بخش درونی (به رنگ خاکستری) قابل تفکیک است که مطالعه میکروسکوپی به‌طور مجزا روی هر یک از این سه بخش انجام شده است. در بخش سطحی قرمز رنگ، آغشتگی به اکسید آهن به‌خوبی مشاهده می‌شود. با توجه به این رنگ می‌توان اکسید آهن در این بخش را از نوع هماتیت (Fe_2O_3) ارزیابی نمود. در این لایه دانه‌های اکسید آهن به فراوانی و نیز کلسیت، کوارتز و میکا (به مقدار اندک) مشاهده می‌شود. منافذ و تخلخل‌ها توسط ژیپس پر شده است (شکل ۳۲)

در بخش میانی و درونی آغشتگی به اکسید آهن نیز به‌خوبی مشاهده می‌شود. ولی علت تیره‌تر بودن رنگ در این دو لایه را می‌توان به این دلیل دانست که اکسید آهن در لایه میانی و درونی عمدتاً به شکل مگنتیت (Fe_3O_4) و کمتر به‌صورت هماتیت وجود دارد. لایه میانی آجر شامل دانه‌های اکسید آهن، کلسیت، کوارتز و ژیپس است (شکل ۳۳). لایه درونی نیز از دانه‌های اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، ژیپس و چرت تشکیل یافته است (شکل ۳۴). ژیپس در هر دو لایه عمدتاً حفرات و منافذ را پر کرده است

بررسی نمونه آجر شماره ۹

(کد نمونه: ۱/۴۲۲ ـ چ. ز)

رنگ: سبز تیره (شکل ۳۵)

نتیجه آنالیز با پراش‌سنج پرتو ایکس

(XRD): Pyroxene, Calcite, Dolomite

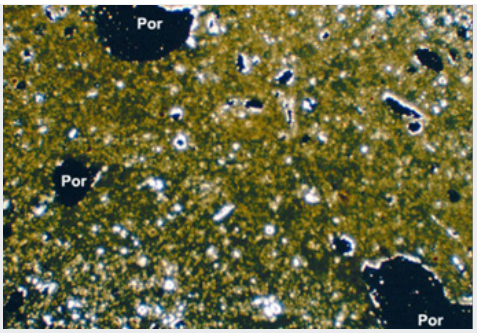
الف) مشخصات ماکروسکوپی آجر

ضخامت این آجر حدود ۸ سانتیمتر است. این نمونه نوعی آجر جوش و دارای اختلاطی از رنگ‌های سبز روشن تا سبز تیره است. نمونه دارای بافتی شیشه‌ای و بسیار سخت است. ترک‌های متعدد ناشی از انقباض پخت در سطح نمونه به‌خوبی نمایان است. تخلخل آجر نسبتاً زیاد بوده و در مقطع آجر منافذ کوچک و بزرگ فراوانی نمایان است. منافذ بزرگ فراوان‌تر بوده و عمدتاً قشری از شوره بر جداره آن‌ها قابل تشخیص است، اما پرشدگی کامل آن‌ها کمتر اتفاق افتاده است. آجر در بخش‌های فاقد منفذ بسیار متراکم و سخت بوده و دارای بافتی شیشه‌ای است. به دلیل تراکم موجود در بافت، وزن مخصوص این آجر بیش از نمونه‌های قبلی است. آجرهایی که دمای پخت آن‌ها زیاد بوده و یا مدت زمان بیشتری در دمای بالای پخت باقی می‌مانند چنین ویژگی‌هایی را از خود بروز می‌دهند (Ingham, 2009)

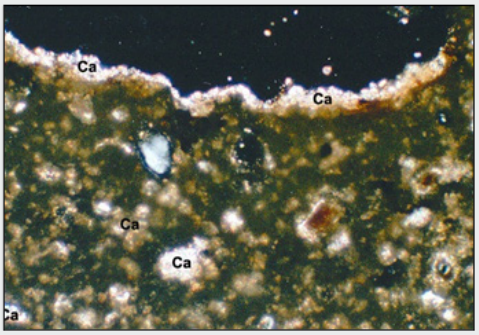
ب) بررسی میکروسکوپی

زمینه در این آجر تا حدی شیشه‌ای شده است (شکل ۳۶). دانه‌های کلسیت در این آجر به فراوانی دیده می‌شود و مقدار آن بیشتر از تمامی آجرهای قبلی است. کانی‌های موجود در حواشی منافذ نیز عمدتاً کلسیت است (شکل ۳۷). دانه‌های اکسید آهن و کوارتز در این آجر بسیار کمتر یافت می‌گردند (شکل ۳۸)

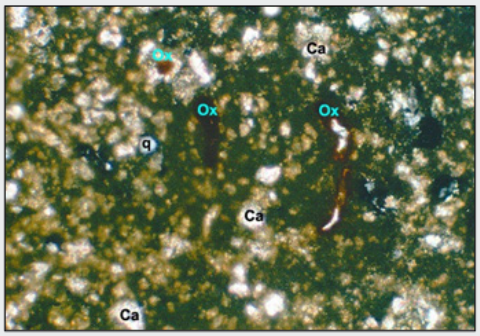
شکل ۳۵. دید ماکروسکوپی از مقطع آجر شماره ۹.



شکل ۳۶. وضعیت کلی بافت، زمینه، دانه‌های تشکیل دهنده و تخلخل (Por) در آجر شماره ۹ (XPL,×29).



شکل۳۷. فراوانی دانه‌های کلسیت (Ca) در این نمونه آجر و وجود این کانی به صورت ثانویه در حاشیه منافذ (XPL,×115).



شکل۳۸. دانه‌های اکسید آهن (Ox)، کلسیت (Ca) و کوارتز (q) موجود در این آجر (XPL,×115).

بحث و نتیجه‌گیری

مشاهدات میکروسکوپی مقاطع نازک نشان می‌دهد که زمینه آجر به‌طور عمده از کلسیت و کانی‌های رسی به همراه آغشتگی مواد آهن‌دار تشکیل شده است. کانی‌های موجود و شناسایی شده در زمینه آجر به ترتیب فراوانی شامل دانه‌های اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، چرت، ژیپس، دانه‌های ریز میکا و فلدسپات است. سیلیس به دو گونه کوارتز دانه درشت و چرت ثانویه وجود داشته و چرت‌ها اساساً پرکننده فضای خالی در زمینه آجر هستند. همچنین ژیپس عمدتاً به‌صورت ثانویه جانشین کانی‌های اولیه شده که شکل آن در بافت کلی آجر حفظ شده است. به‌عبارت دیگر ژیپس پزودومورف (Pseudomorph) کانی قبلی شده است. این قالب‌های پزودومورف در نمونه فراوان هستند و اغلب توسط ژیپس و چرت پرگشته‌اند. دانه‌های ریز میکا و نیز فلدسپات به مقدار جزیی در آجرها قابل شناسایی است (جدول ۲)

اکسید آهن عمدتاً از نوع هماتیت (Fe_3O_4) از جمله ترکیبات شناسایی شده در زمینه آجر بوده که باعث پدید آمدن طیف رنگ‌های قهوه‌ای تا قرمز در بافت آجر شده است. گاهی در یک مقطع از آجر تا چند طیف مختلف رنگی دیده شده است که این موضوع خود به‌دلیل حضور اکسیدهای مختلف آهن از نوع هماتیت و یا مگنتیت بوده است (معادله ۱).

معادله ۱

$$4Fe_3O_4 + O_2 \longrightarrow 6Fe_2O_3$$

(هماتیت: قرمزرنگ) (مگنتیت: تیره‌رنگ)

همان‌طور که از واکنش بالا برداشت می‌شود پیدایش این اکسیدها در ارتباط مستقیم با افزایش و یاکاهش

جدول ۲. نتایج پتروگرافی و پراش سنجی پرتو ایکس نمونه‌های آجر چغازنبیل.

نمونه و کد آجر	رنگ نمونه آجر	نتایج پتروگرافی	نتایج آنالیز XRD
آجر شماره ۱ (کد نمونه: ۱/۴۱۴ ـ چ. ز)	قهوه‌ای روشن	اکسید آهن، کوارتز، کلسیت، فلدسپات (پلاژیوکلاز)، چرت	کلسیت، کوارتز
آجر شماره ۲ (کد نمونه: ۱/۴۱۵ ـ چ. ز)	سبز کم‌رنگ	اکسید آهن، کوارتز، چرت، کلسیت، فلدسپات	کلسیت، دولومیت، پیروکسن، کوارتز
آجر شماره ۳ (کد نمونه: ۱/۴۱۶ ـ چ. ز)	لایه سطحی به رنگ قرمز و بخش درونی قهوه‌ای رنگ	اکسید آهن، کلسیت، چرت، ژیپس، فلدسپات	کلسیت، کوارتز، ژیپس، فلدسپات، دولومیت
آجر شماره ۴ (کد نمونه: ۱/۴۱۷ ـ چ. ز)	قهوه‌ای کم رنگ	اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، چرت، ژیپس، فلدسپات، میکا	کلسیت، کوارتز، ژیپس
آجر شماره ۵ (کد نمونه: ۱/۴۱۸ ـ چ. ز)	قرمز کم‌رنگ	اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، چرت	کلسیت، کوارتز، دولومیت
آجر شماره ۶ (کد نمونه: ۱/۴۱۹ ـ چ. ز)	قرمز	اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، چرت، فلدسپات، میکا	کلسیت، کوارتز
آجر شماره ۷ (کد نمونه:۱/۴۲۰ ـ چ. ز)	قهوه‌ای روشن	کلسیت، اکسید آهن، کوارتز، چرت	کلسیت، کوارتز
آجر شماره ۸ (کد نمونه: ۱/۴۲۱ ـ چ. ز)	سه طیف رنگی قرمز، قهوه‌ای و خاکستری	اکسید آهن، کلسیت، کوارتز، ژیپس، چرت، میکا	بخش سطحی قرمز: کلسیت، کوارتز، ژیپس، دولومی. بخش میانی قهوه‌ای: کلسیت، کوارتز. بخش درونی خاکستری: کلسیت، کوارتز، فلدسپات، دولومیت
آجر شماره ۹ (کد نمونه: ۱/۴۲۲ ـ چ. ز)	سبز تیره	کلسیت، اکسید آهن، کوارتز	پیروکسن، کلسیت، دولومیت

اکسیژن در اتمسفر کوره در هنگام پخت آجر است (Larbi, 2004). همچنین در این ارتباط نباید تأثیر دمای پخت را نادیده گرفت، به‌طور مثال در نمونه آجر شماره ۸ وجود سه رنگ مختلف قرمز، قهوه‌ای و خاکستری را می‌توان به‌گونه زیر توجیه نمود

در سطح آجر به دلیل مجاورت بیشتر با گرما و حضور اکسیژن بیشتر، ذرات آهن بیشتری اکسیده شده است و با شکل‌گرفتن اکسیدهای آهن از نوع هماتیت (Fe_2O_3) رنگ قرمز ایجاد شده است (ویسه، ۱۳۷۳؛ پایدار، ۱۳۸۴). پیدایش رنگ قهوه‌ای را در لایه میانی می‌توان به کمتر اکسیده شدن ذرات آهن نسبت داد؛ اما لایه درونی که در مجاورت دمای کمتری بوده و امکان حضور اکسیژن نیز در این بخش کمتر وجود داشته، اکسیدهای آهن به‌صورت مگنتیت (Fe_3O_4) شکل گرفته است و لذا این بخش از آجر رنگ تیره یافته است.

آجرها از تخلخل نسبتاً بالایی برخوردار بوده و نمک‌های شناسایی شده عمدتاً شامل ترکیبات ثانویه به‌صورت ژیپس و کلسیت هستند. کربنات‌ها به فراوانی به‌صورت اولیه در زمینه و یا به‌صورت ثانویه در حاشیه تخلخل‌ها دیده می‌شوند که با گذشت زمان از سایر مواد و مصالح مصرفی وارد ساختار آجرها شده‌اند. تبلور نمک‌ها و آسیب‌های ناشی از آن در چغازنبیل از مهمترین پدیده‌های مخرب به‌شمار

مـی‌رود کـه در ایـن فرآینـد عوامـل مختلـفی همچـون: میـزان رطوبـت، خصوصیـات خلـل و فـرج سـطح، میـزان و نـوع نمـک موجـود، نـوع و میـزان پخـت، میـزان تبخیـر و غیـره تاثیرگـذار اسـت (Caner-Saltik et al., 1998) نتایـج بررسـی‌های خاک‌شناسـی در منطقـه چغازنبیـل حاکـی از فراوانـی ترکیبـات کلسـیتی در سـاختار ذخایـر رسـی اسـت (نبیـان و ملـک عباسـی، ۱۳۷۹). به‌دلیـل فراوانـی حضـور ترکیبـات کربناتـی در رس‌هـای موجـود در منطقـه، حضـور اولیـه بخشـی از آن‌هـا را در سـاختار آجرها، می‌تـوان بـه ایـن موضـوع نسـبت داد، زیـرا ایـن ترکیبـات در دمـای پخـت پاییـن در سـاختار آجرهـا باقـی خواهنـد مانـد (Gliozzo, 2013). بـر ایـن اسـاس می‌تـوان دمـای پخـت آجرهـای چغازنبیـل را نیـز ناقـص پنداشـت. ترکیبات کربناتـی در دمایـی نزدیک بـه ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سـانتیگراد تجزیـه شـده و بـه CaO و CO_2 بـدل می‌شـوند. همچنیـن ایـن امـکان وجـود دارد کـه بـه هنـگام پخـت آجرهـا در کـوره، بخشـی از کلسـیت بـه دی‌اکسـید کربـن و اکسـید کلسـیم تبدیـل شـده باشـد، امـا به‌دلیـل شـرایط پخـت، گاز دی اکسـید کربـن نتوانسـته از آجـر خـارج شـود کـه در ایـن حالـت دی‌اکسـید کربـن مجـدداً بـا اکسـید کلسـیم ترکیـب شـده و داخـل خلـل و فـرج به‌صـورت کربنـات باقـی می‌مانـد (معادلـه ۲)

معادله ۲

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$$

در برخـی از مقاطـع نـازک، میکاهـا نیـز دیـده شـده‌اند و از آنجاکـه ایـن ترکیبـات در دمـای حـدود ۸۰۰ درجـه سـانتیگراد تجزیـه می‌شـوند ایـن موضـوع دلیـل دیگـری بـر پاییـن بـودن دمـای پخـت در نمونـه آجرهـای مـورد مطالعـه اسـت. بـا بررسـی مقطـع نـازک مربـوط بـه نمونـه آجـر کتیبـه‌دار (آجـر شـماره ۷) و مقایسـه آن بـا سـایر نمونه‌هـا، بـه لحـاظ ترکیبـات سـاختاری اخـتلاف زیـادی مشـاهده نشـد، امـا در دیـد ماکروسـکوپی به‌دلیـل تخلخـل کمتـر موجـود در بافـت آجرنوشـته‌ها، چنیـن به‌نظـر می‌رسـد کـه از نظـر تکنیکـی، اغلـبِ ایـن آجرهـا بـا دقـت بیشـتری سـاخته شـده‌اند. به‌طـور مثـال مرحلـه عمـل‌آوری و قالب‌زنـی خشـت‌ها بـا دقـت بیشـتری دنبـال شـده اسـت و لـذا ایـن آجرهـا اغلـب دارای تراکـم و فشـردگی بیشـتری هسـتند.

سپاسگزاری

از جنـاب آقـای دکتـر حسیـن پایدار و سـرکار خانـم مهندس فریبـا داوودی بـه جهـت همـکاری در تهیـه مقاطـع نـازک آجـر و مشـاوره در مطالعـات پتروگـرافی نمونه‌هـا تشـکر و قـدردانی ویـژه می‌گـردد. همچنیـن از سـرکار خانـم سـودابه دورعـلی مسـئول وقـت آزمایشـگاه پراش‌سـنجی اشـعه ایکـس در پژوهشـکده حفاظـت و مرمـت و خانـم دکتـر منیـژه هادیـان دهکـردی مسـئول بخـش مطالعـات مـواد و مصالـح در پـروژه چغازنبیـل بـه جهـت مشـاوره و همـکاری آزمایشـگاهی سپاسـگزاری می‌گـردد

حامیان مالی و معنوی

مطالعـات آجـر در محوطـه میـراث جهـانی چغازنبیـل در قالـب پـروژه بین‌المللـی حفاظـت و مرمـت چغازنبیـل بـا مدیریـت وقـت آقایـان دکتـر محمـد حسـن طالبیـان و دکتـر رسـول وطن‌دوسـت آغـاز گردیـد. همچنیـن در ادامـه پـروژه مذکـور نیـز حمایـت معنـوی پایـگاه میـراث جهـانی چغازنبیـل – هفت‌تپـه در تکمیـل مطالعـات آجرهـای تاریـخی تـا سـال‌ها بعـد ادامـه یافـت.

منابع

پایـدار، حسیـن. (۱۳۸۴). مـواد اولیـه مصرفـی در صنایـع سـرامیک. اصفهـان. انتشـارات غـزا

شـاه‌بیگ، امیـر؛ افشـاریانزاده، عبدالمجیـد. (۱۳۶۲). گـزارش مطالعـه و بررسـی خـاک رس در اسـتان خوزسـتان (اطـراف شـوش، هفـت تپـه، اندیمشـک و دزفـول). تهـران. سـازمان زمین‌شناسـی کشـور

شـهرابی، منصـور؛ و ملک‌عباسـی، عـلی. (۱۳۷۹). گـزارش زمین‌شناسـی مقیـاس ۱۲۰۰۰: و ۱۲۵۰۰۰: منطقـه چغازنبیـل. پایـگاه میـراث فرهنـگی چغازنبیـل و هفـت تپه. (گـزارش منتشـر نشـده).

فـدایی، حمیـد؛ و امـامی، سیدمحمدامین؛ کریمی جشـنی، ایـوب؛ و میـرزایی، آزیتـا. (۱۳۹۴). ارزیـابی خصوصیـات فیزیـکی و شیمیـایی آجرهـای عیلامی میانـه از محوطـه میـراث جهانـی چغازنبیـل بـا رویکـرد باستان‌سـنجی. دو فصلنامـه علـمی تخصـصی علـوم باستان‌شـناختی، ۱(۱)، ۱۳-۱.

فدایـی، حمیـد. (۱۳۸۲). از خـاک تـا آجـر: مطالعـات میدانـی ــ آزمایشـگاهی بـه منظـور تولیـد آجـر در محوطـه تاریخـی چغازنبیـل. مقـالات نهمیـن کنفرانـس بین‌المللـی مطالعـه و حفاظـت معمـاری خشـتی. معاونـت معـرفی و آمـوزش سـازمان میـراث فرهنـگی کشـور

گیرشـمن، رومـن. (۱۳۷۳). چغازنبیـل، جلـد ۱: زیگـورات. ترجمـه کریمـی. تهـران. انتشـارات سـازمان میـراث فرهنـگی کشـور

نبیـان، احمـد؛ و ملک‌عباسـی، عـلی. (۱۳۷۹) گـزارش بررسـی خاک‌شـناسی منطقـه چغازنبیـل (۱/۲۵۰۰۰). پایـگاه میـراث فرهنـگی چغازنبیـل و هفـت تپـه. (گـزارش منتشـر نشـده)

ویسـه، سـهراب. (۱۳۷۳). آجـر رسـی، خـواص و تولیـد. تهـران. انتشـارات مرکـز تحقیقـات سـاختمان و مسـکن.

ویسـه، سـهراب؛ و عمـادی، سـعید. (۱۳۷۵). بررسـی ذخایـر خـاک رس اسـتان خوزسـتان بـرای پخـت آجـر. تهـران. انتشـارات مرکـز تحقیقـات سـاختمان و مسـکن.

Arnold، A. & Zehnder, K. (1987). Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts, The Conservation of Wall Paintings. Proceedings of a Symposium organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 1987 ،16-13.

Caner-Saltik، E.N.، Schumann, I. & Franke, L. (1998). Stage of Damage in the Structure of Brick Due to Salt Crystalization. Conservation of Historic Brick Structures، Donhead Publishing Ltd 58 – 47 ,6 .1998.

Franke، L.، & Grabau, J. (1998). Transport of Salt Solutions in Brickwork. Conservation of Historic Brick Structures، Donhead Publishing Ltd 172- 167 ,15 .1998.

Gliozzo, E. (2013). Stamped bricks from the ager cosanus (Orbetello, Grosseto): integrating archaeometry, archaeology, epigraphy and prosopography. Journal of Archaeological Science, 1058-1042 ,(40)2.

Ingham, J. P. (2009). Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. Materials Characterization, 709-700 ,(60)7

Larbi, J. A. (2004). Microscopy applied to the diagnosis of the deterioration of brick masonry. Construction and Building Materials, -299 ,(18)5 307.

Quinn, P., Rout, D., Stringer, L., Alexander, T., Armstrong, A., & Olmstead, S. (2011). Petrodatabase: an on-line database for thin section ceramic petrography. Journal of Archaeological Science, 2496-2491 ,(38)9.