

روش‌های باستان‌سنجی به منظور ساختارشناسی آجرهای کشف شده از تل آجری

تخت جمشید

سید محمدامین امامی*

استادیار گروه مرمت اشیا تاریخی – فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان

سیمین آریا نسب

کارشناسی ارشد مرمت اشیا تاریخی – فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان

حسین احمدی

استادیار گروه مرمت اشیا تاریخی – فرهنگی، دانشگاه هنر اصفهان

علیرضا عسگری چاوردی

استادیار گروه باستان‌شناسی دانشگاه شیراز

پیر فرانجسکو کالیری

استاد گروه باستان‌شناسی دانشگاه راونا

(از ص ۱ تا ۱۹)

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۰۸/۲۸؛ تاریخ پذیرش قطعی: ۹۳/۰۹/۱۵

چکیده

حفری‌های باستان‌شناسی هیئت ایرانی – ایتالیایی در محوطه تل آجری، در سال ۱۳۹۰ شروع شد و بقایای معماری مزین به آجرهای لعاب‌دار بسیار نفیسی از این منطقه به دست آمد که مشابهت‌های قابل‌ملاحظه‌ای با آجرهای ایلامی و هخامنشی یافته شده در تخت جمشید و شوش دارد. آجرهای مکشوفه، یا در ساختار معماری استفاده شده و یا به صورت دست‌نخورده در محل حفاری حفظ شده‌اند. شناسایی مواد به کار رفته در ساخت این آجرها، لعاب، و تکنولوژی پخت آن از اهداف مورد بحث در این مقاله می‌باشد. آجرهای موردنظر با آنالیز فازی، عنصری و میکروسکوپی (XRD, XRF, LM) و روش‌های تعیین درجه حرارت پخت (DSC) مورد بررسی قرار گرفتند. بر این اساس، مواد خام مورد استفاده ترکیبات آهکی با افزودنی سیلیسی شناسایی شد و درجه حرارت پخت آجرها در محدوده ۱۱۰۰ تا ۱۱۴۰ درجه سانتیگراد، تحت پخت اکسیداسیون معین گردید.

واژه‌های کلیدی: آرکئومتری، آجر، مینرالوژی، ترکیب شیمیایی، تل آجری، تخت جمشید

۱. مقدمه

آجر، آجور یا آگور واژه‌ای بابلی است و به خشت‌هایی اطلاق می‌شده است که بر آن فرمان، منشور، قانون و... را می‌نوشتند (Vogelsang, 1990: 88). مبدأ پیدایش آجر و تکامل آن، سرزمین بین‌النهرین می‌باشد و این به دلیل شرایط طبیعی ایده‌آلی است که خاک حاصلخیز جلگه بین دجله و فرات برای شکل‌گیری داشته و این سرزمین بهترین مواد اولیه را برای تهیهٔ سرامیک و آجرسازی دارا بوده است. در سرزمین بین‌النهرین ساختارهای قابل‌توجهی از آجر کشف شده که مخلوطی از قیر و گل، استحکام و پیوند مخصوصی به آجرها داده است و بدین ترتیب در بابل (که با دیوارهای آجری محصور بود) و آشور، شاهکارهای معماری‌ای از آجر به وجود می‌آیند که نمونهٔ این تمدن در ۳۰۰۰ ق.م در بین‌النهرین دیده می‌شود (Marchetti, 2012: 140). در این زمان بشر به خوبی قادر به شناخت مواد خام مصرفی و چگونگی تهیه آجر بوده است و به وسیلهٔ لعاب یا قیر بر دوام ساختار آن نیز می‌افزود (Carter, 1994: 73). تکنیک پخت آجر پیش از هخامنشیان در ایران تکامل یافت تا جایی که در دورهٔ هخامنشی پخت آجرهای بدون لعاب و لعاب‌دار منقوش و برجسته معمول گردید؛ نمونه‌های برجسته از کتیبه‌های آجری موجود از دورهٔ هخامنشی از شوش و تخت‌جمشید گواه آن است (Hachmann, 1997: 222; Sumner, 1974: 170; de Morgan, 1905: 7; Boucharlat, 1987: 357). حوزه تاریخی تخت‌جمشید واقع در شهرستان مرودشت یکی از مناطق باستانی ایران است که با پیشینهٔ کهن خود در طول تاریخ توجه بسیاری از باستان‌شناسان و محققین را به خود معطوف داشته است. مطالعه بر روی محدودهٔ تخت‌جمشید قریب به ۱۷۰ سال است که ادامه داشته و هنوز کشفیات جدیدی در این رابطه مطرح می‌گردد (Hallock, 1969: 111-117; Sumner, 1986: 12 & 1974: 173). مجموعه آثار به‌جای مانده نه‌تنها به دلیل مجموعه کاخ‌های تخت‌جمشید شایان اهمیت است بلکه هنرهای وابسته به معماری و اشیاء مکشوفه از حفاری‌های متعددی که در ده سال اخیر در این منطقه انجام شد، موضوع اصلی بحث‌های باستان‌شناسی و علوم دیگر بوده است (Boucharlat, and Benech, 2002:7). مواد تاریخی - فرهنگی به‌دست آمده از حفاری‌های باستان‌شناسی در این منطقه در چند سال اخیر تنوع زیادی را از خود نشان داده است (Boucharlat, 1989: 678). این مواد بیشتر بر پایهٔ ترکیبات رسی نظیر سرامیک‌ها، آجرها و لعاب‌های رنگی بوده و گاه مواد خام مورد استفاده در تزیینات وابسته به معماری نظیر رنگ و یا بست بوده است. ابزارهای سنگی و اشیاء فلزی در حفاری‌های سال‌های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳ در تل آجری یافت نشد.

کاوش‌های باستان‌شناسی در دو تپهٔ معروف «تل آجری» و «تل فیروزی» که در محدودهٔ شمال غربی تخت‌جمشید قرار گرفته‌اند، به جهت شناسایی معماری و بقایای ساختارهای به‌جای مانده از این شهر (شهر پارسه) از سال‌های ۱۳۹۰ تا حال در حال انجام می‌باشد. پژوهش‌های باستان‌شناسی هیئت ایرانی - ایتالیایی در محوطهٔ تل آجری، به کاوش بسیاری از بقایای معماری مزین به آجرهای لعاب‌دار انجامید که در بسیاری از فاکتورهای تکنیکی و صنعتی دارای خصوصیات مشابهی با آجرهای ایلامی و هخامنشی یافته شده در آپادانای داریوش در شوش می‌باشد (Gondet, 2011: 171; Boucharlat, 1987: 365). وجود این آجرها در قالب آثار بر جای مانده از معماری در تل آجری بسیار جالب‌توجه می‌باشد. بخش عمده‌ای از این سازه به دلیل فرسودگی شدید آجرها به صورت دست‌نخورده در محل حفاری حفظ شده‌اند، و برخی کاملاً شکیل در جای خود باقی بوده‌اند. آجرهای مکشوفه از منطقهٔ تل آجری از نوع آجرهای لعاب‌دار بوده و فرسودگی شدید لعاب

این آجرها علاوه بر دشوار کردن مطالعه و تحلیل فنی آنها، بررسی زیبایی‌شناسانه این آثار را پیچیده کرده است (Carter, 1994: 90). آجرهای لعاب‌دار به دست‌آمده از محوطه تل‌آجری به دلایل گوناگون در نوع خود کم‌نظیر هستند. در چیدمان آجرها از ملات قیر استفاده شده است. استفاده از قیر سابقه قدیمی در معماری ایلامی و هخامنشی دارد و نشان‌دهنده پیشرفت قابل‌ملاحظه صنعتگران و معماران این عصر در خصوص نگهداری بناها در شرایط خاص می‌باشد. آجرها دارای نقوش نیم‌برجسته روی یک وجه خود هستند که طرح‌هایی از حیوانات یا گیاهان اساطیری را باز می‌نمایند (Coningham, 1995: 25). لعابی که روی سطح آجرها کار شده فقط در قسمت‌های محدودی باقی مانده که اتصال بسیار ضعیفی به بدنه آجر دارد و با کمترین فشاری از سطح جدا می‌شود. بدنه آجرها نیز در بعضی قسمت‌ها تخریب شده است که تحلیل این فرایند مستلزم فن‌شناسی و آسیب‌شناسی دقیق آجرهاست (Kristály et al. 2012: 256). به طور کلی، اهداف اصلی این مقاله به طور مشخص شامل موارد ذیل می‌باشد؛

۱. نوع ماده خام و نحوه تهیه و تولید بدنه‌های آجری و ترکیب لعاب روی آجرها چگونه بوده است؟
۲. در آماده‌سازی و تولید این آجرها به عنوان یکی از نادرترین آثار به‌جای‌مانده از دوران هخامنشی از چه تکنیکی استفاده شده است؟
۳. آیا تکنیک ساخت این اشیاء مبتنی بر آزمون و خطا بوده، یا با علم بر چگونگی انجام کار بوده است؟

۲. معرفی محدوده اکتشافی تل‌آجری

در حریم شهر تاریخی پارسه، در محور شرقی - غربی تخت‌گاه تخت‌جمشید، حوزه وسیعی متشکل از تعدادی تپه کم‌وبیش مرتفع و پست در امتداد دو کیلومتری از یکدیگر واقع شده‌اند که به باغ فیروزی معروف هستند. محدوده نزدیک به بخش‌های معروف به شمال غربی تخت‌جمشید، در واقع، فیروزی شرقی محسوب می‌شود که محوطه‌های تاریخی تل‌آجری و تل‌جنگی در این محدوده و در فاصله کمی از یکدیگر قرار گرفته‌اند (تصویر ۱). درباره کارکرد محوطه تل‌آجری، تفسیرهای متعددی از طرف پژوهشگران مختلف نظیر ویلیام سامنر، استفانو تیلیا، رمی بوشارلا و پیرفرانچسکو کالیری مطرح شده است و همگی بر این عقیده هستند که این محوطه یک مرکزیت صنعتی داشته، و در برخی موارد از آن به عنوان یک ساختمان یادمانی ذکر شده است (Sumner, 1986: 5; Tilia, 1974: 202; Callieri, 2007: 11; Boucharlat, 1989: 710). مکمل این تحقیقات بررسی‌های ژئومغناطیس هیئت ایرانی - فرانسوی بود که موارد جدیدی را در ارتباط با محوطه‌ها و ساختارهای معماری کاوش نشده در عمق زمین در حریم تخت‌جمشید مطرح می‌کند که تاکنون در بررسی‌های سطحی مشخص نبود (Boucharlat and Benech, 2002: 7; Gondet, 2011: 76). نتایج حاصل از بررسی ژئوفیزیک نشان‌دهنده آنومالی ضخیمی است که با حدود هفت متر پهنا در بخش مرکزی محوطه توسط یک حجم چهارگوش محاط شده و در مرکز آن فضایی مربع‌شکل وجود دارد. این حجم آنومالی به وجود مقدار زیادی آجر نسبت داده شده است که در این قسمت وجود دارد. مهم‌ترین دستاورد کاوش در محوطه تل‌آجری، شناسایی بنای یادمانی بزرگی از خشت و آجر بود که در نمای آن از آجرهای لعاب‌دار استفاده شده بود. بر اساس یافته‌های باستان‌شناسی، گفته می‌شود که این بنا به دوران هخامنشی تعلق دارد. با توجه به استفاده گسترده از آجرهای لعاب‌دار و همچنین به کارگیری آجرهای لعاب‌دار مزین، می‌توان گفت

که این ساختمان هم از نظر کارکرد اداری و هم مذهبی حائز اهمیت بوده است. آنچه در طی کاوش باستان‌شناسی از امتداد این بنا روشن شد، وجود بخشی از سکویی از خشت و آجر به ضخامت هفت متر بود که در سرتاسر نمای آن از آجرهای لعاب‌دار استفاده شده بود. این ساختمان در راستای شمال غربی - جنوب شرقی با ۲۰ درجه انحراف در محور شرقی - غربی بنا شده بود (تصویر ۲). با توجه به سفال‌های یافت شده و لایه‌نگاری آثار فرهنگی پنج دوره استقرار در این محوطه تخمین زده می‌شود.

۱-۲- لایه اول استقرار

این لایه بر روی خاک بکر و روی تهنشست‌های رسوبی که با توده‌ای از خاکستر در ترکیب با استخوان حیوانی پر شده، قرار داشته است. در این لایه، روی کف، نمونه‌های بقایای ظروف سفالی بزرگ به‌دست آمد که وجود تعداد محدود از این نمونه ظروف سفالی، به ویژه در لایه‌های تحتانی، گواهی است بر مسکونی نبودن این بنا. در لایه‌های بالاتر از همین مرحله، تعدادی آجر لعاب‌دار به‌دست آمد که در بین آنها بخشی از نقش‌برجسته سر شیر از جنس سنگ آهک سیاه‌رنگ، وجود داشت.

۲-۲- لایه دوم استقرار

این لایه، روی واپسین سطح سکونتی قرار داشته است و شامل یک‌سری از لایه‌های آواری در ترکیب با قطعات بزرگ آجر می‌باشد. علاوه بر آجرهای فاقد لعاب، قطعات آجرهای لعاب‌دار مزین به نقوش برجسته نیز به‌دست آمد.

۳-۲- لایه سوم استقرار

سازه آجری از دو سازه دیوارمانند درست شده است، که با بخش تخریب شده وسیعی از سازه آجری بزرگ در ارتباط بوده است. در این مرحله، هشت ردیف آجر از بالاترین بخش سازه بزرگ آجری مفقود بود.

۴-۲- لایه چهارم استقرار

بخشی از آجرهای جابه‌جا شده در مرحله سوم، برای استفاده مجدد در این لایه به کار برده شده است، به گونه‌ای که پس از یک مرحله تخریب آجرها، در سطح بالای سازه آجری، دیوار کوچک خشتی بنا شده است. نبود سفال یا هرگونه مواد آلی، امکان تعیین تاریخ این دوره کوتاه سکونتی را ناممکن ساخته است.

۵-۲- لایه پنجم استقرار

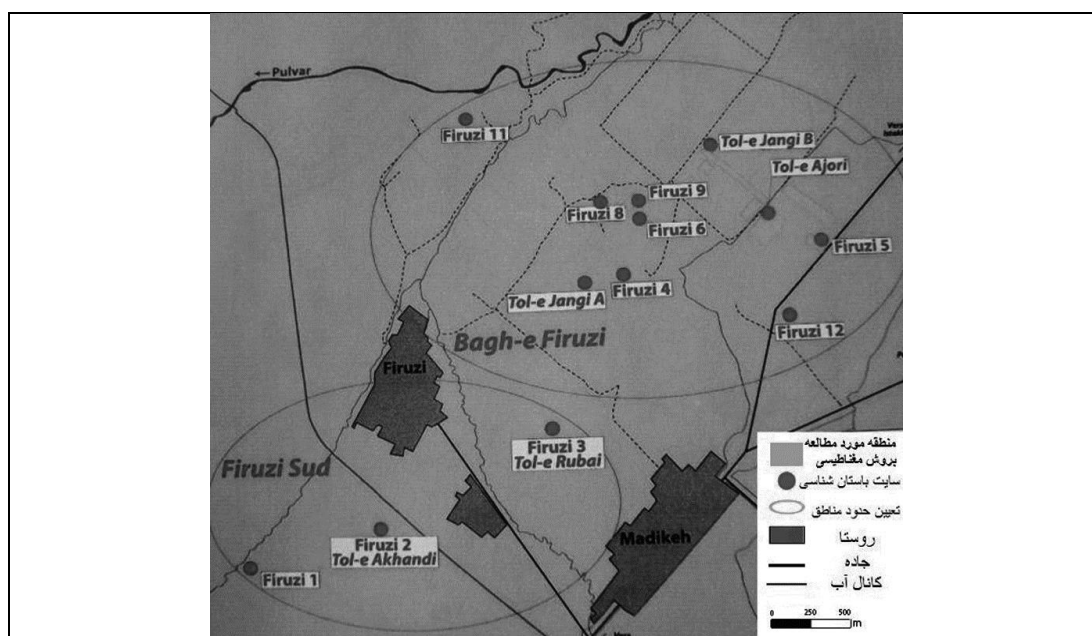
روی این سطح، تکه‌های بیشتری از آجر و ملات قیر مشهود است (تصویر ۳). توالی تهنشست‌های رسوبی این قسمت تا دوره‌های متأخر ادامه داشته است چرا که اثرات شخم زمین در سطح یکی از واپسین لایه‌های سکونتی در نزدیکی خاک سطحی دیده شده است.

از کاوش در محدوده بخش غربی تخت‌جمشید، آثار سفالین ارزشمندی نیز به‌دست آمد که بر اساس خصوصیات ظاهری و نقوش این سفال‌ها به دوره هخامنشی و فراهخامنشی و دوره اسلامی نسبت داده می‌شوند. در بین این نمونه‌ها وجود تکه‌سفال‌های یونانی و هلنی با نقوش سیاه‌رنگ از اهمیت خاصی برخوردار است (Boucharlat and Haerinck, 1991: 305). از دیگر یافته‌های این بررسی می‌توان از ظروف سنگی در اندازه‌های مختلف، اشیاء فلزی از جنس برنز، مس و آهن، یا جواهرات مسی و برنزی، ابزار نبرد نظیر

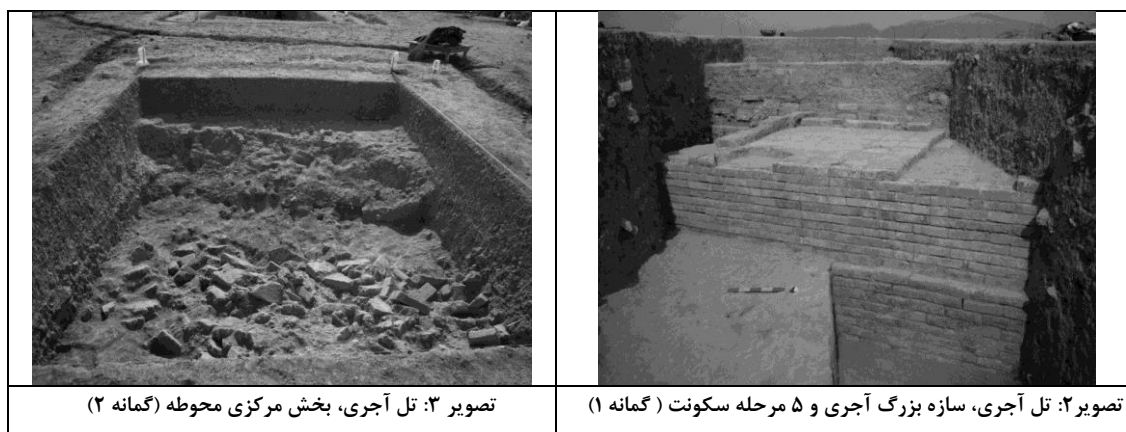
پیکان‌های فلزی، مهره عقیق و چشم‌های عقیق، قطعه‌ای از لاجورد مصری، دستبندهای شیشه‌ای و ابزار بازی از جنس استخوان نام برد که موضوع بحث در این مقاله نمی‌باشد.

۳. معرفی آجرهای مطالعاتی و ریخت‌شناسی آن

از نظر ظاهری در منطقه تل آجری با دو دسته آجر مواجه هستیم؛ آجرهای ساده با رنگ روشن و گاه قرمز و آجرهای لعاب‌دار با لعاب‌های رنگی زرد، آبی، قرمز و گاهی سیاه. لعاب به کار رفته برای تزئین این نمونه‌ها به شدت آسیب دیده، عمدتاً رنگ اصلی خود را از دست داده و به شدت متخلخل شده است. این آسیب‌ها در لعاب آجرهای مکشوفه، نگهداری این آثار را در محوطه اصلی با پیچیدگی‌های فراوانی مواجه می‌کند و از طرفی به دلیل عدم شناخت دقیق طرح و رنگ، روش تحقیق این تزئینات را در مطالعات موزه‌ای نیز دشوار می‌نماید.



تصویر ۱. موقعیت جغرافیایی باغ فیروزی و سایت‌های باستان‌شناسی مورد بررسی در محدوده کاوش



تصویر ۳: تل آجری، بخش مرکزی محوطه (گمانه ۲)

تصویر ۲: تل آجری، سازه بزرگ آجری و ۵ مرحله سکونت (گمانه ۱)

۳-۱. آجرهای بدون لعاب

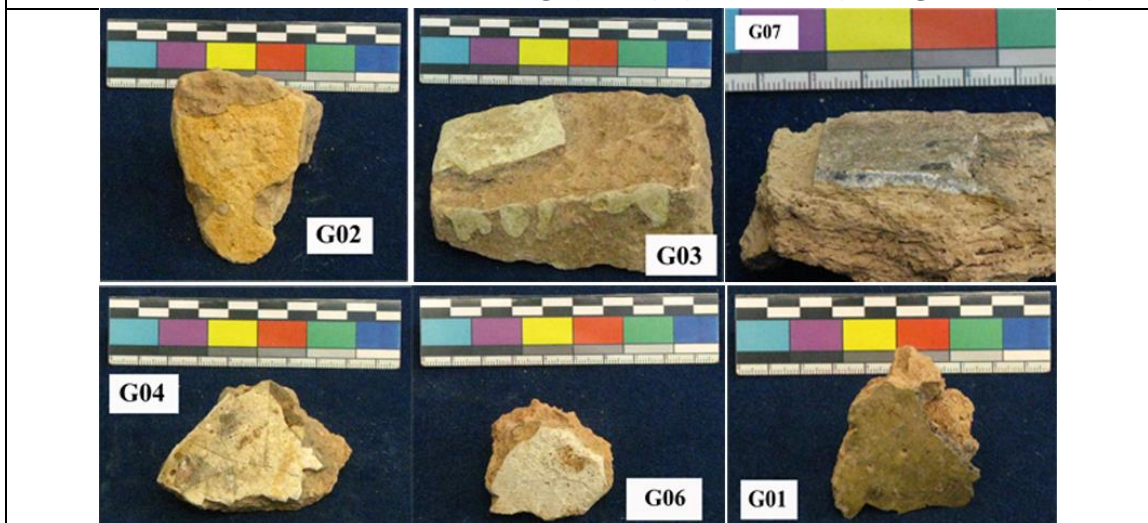
ابعاد هر یک از این آجرها $۳۲ \times ۳۲ \times ۸/۵۰$ سانتیمتر است و در ۹ ردیف قرار دارد. این ردیف آجرها بدون لعاب بوده و در پایه‌های نمای دیوار به صورت پیش آمده آجر چینی شده‌اند (تصویر ۴). بدنه آجرها دارای رنگ کرمی روشن تا قرمز بوده و دارای تخلخل زیادی می‌باشند. مواد پرکننده آجرها از ذرات سیلیسی می‌باشد که با چشم غیر مسلح نیز کاملاً مشهود است. بر روی بافت ظاهری مشاهده شده در این آجرها، فضاهای خالی ناشی از پرکننده آلی نظیر کاه یا نی دیده می‌شود. بر روی سطح خارجی بیشتر آجرهای بدون لعاب، پوشش ضخیمی از قیر دیده می‌شود که به احتمال زیاد، به منظور افزایش چسبانندگی یا ناتراوا کردن سطح آجر استفاده می‌شده است.

۳-۲. آجرهای لعاب‌دار

ابعاد هر کدام از این آجرها، $۳۲ \times ۳۲ \times ۷/۵۰$ سانتیمتر است. تعدادی از آجرها در ابعاد بزرگتر ($۳۶ \times ۳۶ \times ۷/۵۰$ سانتیمتر) ساخته شده که به صورت متوالی یک در میان در هر دو ردیف روی هم چیده شده‌اند و نمای بیرونی آنها در ابعاد مربع و مستطیل شکل تنظیم شده است. لعاب روی آجرها در رنگ‌های متعددی از جمله زرد، سفید، سبز، کرمی و نارنجی دیده می‌شود و ضخامت‌های متفاوتی را از ۱ تا ۳ میلیمتر دارا می‌باشد، بسیاری از لعاب‌ها دارای استحکام خوبی بوده و برخی وضعیت سستی را دارا هستند (تصویر ۵).



تصویر ۴. تعدادی از آجرهای مطالعاتی بدون لعاب که بقایای درجه حرارت بالا بصورت ساختارهای شیشه‌ای شده و تیره رنگ (جوش کوره) و اندوهدایی از جنس قیر بر روی سطح آن مشخص می‌باشد.



تصویر ۵. تعدادی از آجرهای مطالعاتی لعاب‌دار با لعاب سفید، زرد و شفاف رنگین

۳-۳_ رنگ بدنه آجرها

الف) آجرهای طیف رنگی قرمز تا خاکستری

پدید آمدن رنگ‌های مختلف در بدنه آجر را می‌توان به اکسیدها و ناخالصی‌های موجود در بافت آن نسبت داد که در حین فرآیند پخت آجر تغییرات رنگی را ایجاد می‌نمایند. خاک رس‌هایی که حاوی اکسید آهن هستند بسته به اتمسفر کوره و مقدار دمای آن، آجرهایی با رنگ‌های مختلف قرمز، نارنجی و ارغوانی پدید می‌آورند. بسیاری از این آجرها دارای پخت ناقص بوده و خمیره آنها در برش عرضی توالی رنگی از خود نشان می‌دهد. علت سیاه‌رنگ شدن درون آجر، وجود مواد آلی در خمیره آن بوده که در هنگام پخت به سبب احیاء مقطعی و کمبود اکسیژن به رنگ سیاه در آمده‌اند (Emami et al. 2009: 937). خاکستری شدن مغز آجر همچنین می‌تواند به دلیل پخت ناقص و سریع آن باشد که در چنین شرایطی مغز آجر فرصت پخت کامل را نداشته و احیاء می‌شود (Kavenagh and Wheeler, 2003: 110). همچنین این تیره شدن می‌تواند ناشی از تجزیه کلسیت به دی اکسید کربن و اکسید کربن باشد که به دلیل شرایط پخت نتوانسته از کوره خارج شود و لذا به مغز آجر، رنگ تیره‌ای بخشیده است (Emami et al. 2009: 937).

ب) آجرهای طیف رنگی زرد تا نخودی

این دسته از آجرها طیف وسیعی را به خود اختصاص می‌دهند و جزء سالم‌ترین آجرهای به‌دست آمده از محوطه تل آجری هستند. رس‌های غنی از کربنات با مقدار اکسید کلسیم بیش از ۷٪ به هنگام پخت زرد کم‌رنگ، زرد و یا زرد متمایل به قهوه‌ای می‌شوند (Hoerlé, 2006: 373). لیمونیت ($FeOOH$) نیز آجر را به رنگ زرد نخودی در می‌آورد. بدنه این آجرها به لحاظ ظاهری استحکام خوبی دارند که می‌توان آن را به پخت در دمای مناسب نسبت داد.

ج) آجرهای سبزرنگ

پدید آمدن رنگ سبز تیره در مغز آجر نشان‌دهنده این است که آجر در دمای بالایی پخته شده و یا این که مدت زمان پخت آن طولانی بوده است (Dolata, 1999: 195). به این نوع آجرها آجر جوش می‌گویند و نسبت به آجرهای معمولی شکننده‌تر می‌باشند. سطح رویی آجرهای جوش ساختاری تیره‌رنگ و دارای حباب دارد. علت وجود این لایه‌های دارای حباب، سرد شدن سریع آن نیز می‌تواند باشد. در جدول ۱ مشخصات کلی نمونه‌های آجرهای مطالعاتی لعاب‌دار و بدون لعاب آورده شده است. برای کدگذاری نمونه آجرهای لعاب‌دار، به جهت تسهیل فرایند آنالیز و شناسایی مواد از حرف G که اول Glaze (لعاب) است استفاده شد و از N برای نام‌گذاری نمونه‌های بدون لعاب استفاده شده است (Non glaze) است. به طور کلی، به منظور شناسایی رنگ ظاهری قطعات نمونه‌های مطالعاتی از جدول رنگ Munsell استفاده شد.

جدول ۱. مشخصات کامل نمونه‌های مورد مطالعه				
شماره اکتشافی نمونه‌های	کد نمونه	رنگ آجر و کد آن بر اساس جدول MUNSELL ⁽¹⁾	رنگ لعاب و کد آن بر اساس جدول MUNSELL	ابعاد تقریبی (Cm)
IR-TAJ-SAMP0059	G01	نخودی 10YR4/6	سبز 5GY5/6	4.7 × 5.2 × 3.2
IR-TAJ-SAMP0062	G02	نخودی متمایل به قرمز 10YR4/6	کرم روشن 2.5GY9/4	4.9 × 5.1 × 3.5
IR-TAJ-SAMP0077	G03	نخودی 10YR4/6	کرم روشن 2.5GY9/6	6.7 × 8.9 × 2.8
IR-TAJ-SAMP0078	G04	نخودی 2.5Y6/6	کرم روشن 2.5GY9/6	4.2 × 6.7 × 1.9
IR-TAJ-SAMP0079	G05	نخودی 2.5Y6/8	کرم روشن 2.5GY9/4	8.9 × 9.4 × 3.1
IR-TAJ-SAMP0080	G06	قرمز 2.5 YR3/8	سفید 2.5GY9/4	4.2 × 4.4 × 1.8
IR-TAJ-SAMP0065	G07	نخودی 2.5Y6/8	سفید 2.5GY6/4	4.3 × 5.8 × 2.1
IR-TAJ-SAMP0081	G08	قرمز 5GY5/6	زرد روشن 5Y8/10	11.3 × 13.5 × 8
IR-TAJ-SAMP0082	G09	نخودی 2.5Y6/8	زرد 10Y9/8	8.6 × 9 × 4.5
IR-TAJ-SAMP0066	G10	قرمز 2.5YR3/6	زرد روشن 5Y8/10	5 × 7.1 × 3
IR-TAJ-SAMP0072	N01	نخودی با مغز قرمز 5Y7/8	-	10 × 12 × 6.3
IR-TAJ-SAMP0073	N02	قرمز 5GY5/6	-	7.7 × 10.1 × 4.2
IR-TAJ-SAMP0074	N03	نخودی با مغز سبز 2.5GY5/6	لایه سیاه از قیر	11.5 × 12 × 5.7
IR-TAJ-SAMP0075	N04	نخودی با مغز سبز 2.5GY5/6	لایه سیاه از قیر	7.2 × 9.74 × 4

۴. روش‌هایی آنالیز در این پژوهش

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق و پاسخ به پرسش‌های مطرح شده، روش تحقیق و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها به سه دسته تقسیم‌بندی شد. هدف از انجام این سه دسته روش آنالیز در جدول ۱ آمده است.

- مطالعات مینرالوژی بر پایه متد پراش اشعه ایکس (XRD) به منظور شناخت ساختار فازهای کریستالین و همچنین شناخت فازهای ثانوی تشکیل شده بر اثر فرآیند فرسایش و تغییرات محیطی. آنالیزهای XRF به جهت شناخت عناصر تشکیل‌دهنده نمونه‌ها.
- مطالعات میکروسکوپی به وسیله میکروسکوپ پلاریزان به جهت شناسایی ساختارهای بلورین و تحلیل‌های مینرالوژیک بر اساس پترولوژی و پتروگرافی آجر.
- روش‌های آنالیز حرارتی (DSC و TG) با هدف تخمین دمای پخت آجرها.

جدول ۲. فرایند تحقیق و متدولوژی شناسایی آجرهای مطالعاتی از تل آجری			
فرایند تحقیق و متدولوژی	مطالعات شیمیایی و مینرالوژیک	XRD (X-Ray Diffraction)	برای شناخت فازهای کریستالین
		XRF (X-Ray Fluorescence)	برای شناخت ترکیب شیمیایی کلی
		Polarization Microscopy	به منظور شناخت خصوصیات نوری و مینرالوژی فازهای سازنده آجر
		DSC (Differential Scanning Calorimetry) TG (Thermo Gravimetry)	به منظور تعیین درجه حرارت
	مطالعات فیزیکی و مکانیکی	Porosity & Physical Resistanc	برای تعیین تخلخل و مقاومت فشاری

۵. تحلیل و بحث نتایج آزمایشگاهی

۵-۱. نتایج مطالعات ترکیب عنصری نمونه‌ها (XRF)

نتایج آنالیز کمی بر روی نمونه آجرهای محوطه تل آجری در جدول ۳ آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که عناصر عمده در ساختار آجرها CaO و SiO₂ می‌باشند. کربنات کلسیم پس از کلسیته شدن در دمای حدود ۷۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتیگراد به CO₂ و CaO تجزیه می‌شود که CaO به آجر، رنگ سفید یا کرمی می‌بخشد و خارج شدن CO₂ باعث ایجاد تخلخل در آجر می‌شود. بنابراین می‌توان رنگ روشن و تخلخل نسبتاً بالای آجرها را به حضور درصد بالای اکسید کلسیم نسبت داد (Böttger et al. 2002: 33). اگر کلسیت به صورت ریزدانه و به طور یکنواخت در آجر پراکنده باشد با کانی‌های رسی، نظیر ایلیت، کلریت‌ها، میکاها و در درجه حرارت بالا با کوارتز واکنش داده و سیلیکات‌های کلسیم را تشکیل می‌دهد که معمولاً در دمای بالای ۹۵۰ درجه سانتیگراد پایدار هستند (Deer et al. 1991: 355). کلسیت درشت‌دانه (بزرگتر از یک میلی‌متر) در هنگام فرایند پخت کاملاً به سیلیکات کلسیم تبدیل نشده و با جذب آب باعث شکفته شدن آهک و تشکیل فاز میانی پورتلندیت (Ca(OH)₂) می‌شود که افزایش حجم ناشی از این واکنش باعث آسیب‌دیدگی آجر و خرد شدن آن می‌شود (Böttger et al. 2002: 20). در نتیجه، در خاک آجر مقدار کلسیت دانه باید بین ۳۰٪ و ۱۷٪ باشد. همان‌گونه که در نتایج XRF مشاهده می‌شود، میزان CaO در بعضی از نمونه‌ها به مرز ۲۲٪ هم رسیده است که می‌تواند سبب بروز آسیب ذکر شده در آجرها باشد. در نتایج XRD آجرهای مکشوفه از تل آجری فازهای درجه حرارت بالا و کلسیت در کنار یکدیگر شناسایی شده‌اند که نشان‌دهنده وجود این فاز به صورت ثانویه می‌باشد و دلیل آن می‌تواند آهکی بودن شدید منطقه تل آجری و رسوبات آهکی محل دفن باشد. عناصر آلومینیوم و اکسید آهن نیز در نمونه‌ها درصد بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. رنگ قرمز بعضی از آجرها می‌تواند به دلیل همین حضور درصد بالای اکسید آهن باشد. آهن شناسایی شده در آنالیز XRF دربرگیرنده مجموع آهن‌های دوظرفیتی و سه ظرفیتی می‌شود که با توجه به نتایج حاصل از آنالیز XRD در فازهای مگنتیت، هماتیت و همچنین سیلیکات آهن (انستاتیت) شناسایی شده است. مقادیر بالای Al₂O₃ که در ترکیب کانی‌های رسی موجود است به نسبت مستقیم باعث افزایش انقباض پخت خواهد شد. اکسید کلسیم در نمونه‌های G04, G07, G09 و N03 و میزان منیزیم در نمونه‌های G05 و N04 بسیار

قابل توجه است. علاوه بر مواد آلی، اکسید منگنز و سولفورها نیز در رسوبات رسی رنگ تیره تولید می‌کنند. وجود توأم منگنز با درصد زیاد اکسید آهن، باعث سیاه شدن رنگ آجر می‌شود (Molina et al. 2013: 20). اکسیدهای قلیایی نظیر Na_2O و K_2O در تمام نمونه‌ها دیده می‌شوند. این اکسیدها یا در اثر تولید نمک در سطح آجر پدیدار شده و یا از فازهای آلومینوسیلیکاتی نظیر پلاژیوکلازهای سدیم‌دار و یا فلدسپات‌های غنی از پتاسیم (ارتوکلاز). یکی از منابع مهم اکسید پتاسیم، خاک رس ایلیتی می‌باشد که البته در منطقه تا آجری یافت شده است. TiO_2 نیز از اکسیدهای موجود در خاک بوده که در ترکیب فاز مگنتیت ظاهر می‌گردد (Deer, et al, 1991: 355-356). P_2O_5 در ترکیب آجرها در حین فرایند پخت تولید شده که حفرات زیادی را در بافت آجر تولید می‌کند و شیشه‌ای شدن بدنه آجر را سبب می‌گردد (Tite, et al. 2008: 190-195).

جدول ۲. ترکیب شیمیایی کلی آنالیز بدنه آجرهای مکشوفه از منطقه تل آجری تخت‌جمشید

Samples	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	TiO_2	MnO	P_2O_5	SO_3	L.O.I
G01b	48.73	12.95	5.28	17.15	1.27	0.76	4.92	0.627	0.398	0.207	0.043	7.34
G02b	41.35	10.85	5.63	17.95	0.98	1.71	3.57	0.567	0.101	0.171	0.230	16.51
G03b	42.11	9.52	5.34	17.84	0.73	1.60	4.98	0.556	0.152	0.167	0.418	16.23
G04b	41.77	10.11	5.45	20.64	0.86	1.40	3.37	0.553	0.081	0.170	0.235	15.06
G05b	42.32	9.85	4.83	18.73	0.70	1.55	5.30	0.550	0.086	0.131	0.175	15.36
G06b	43.11	10.58	5.86	19.85	0.81	1.72	4.01	0.576	0.078	0.167	0.195	12.75
G07b	42.85	11.25	5.35	21.68	0.52	1.71	3.78	0.538	0.226	0.162	0.055	11.53
G08b	42.51	10.25	5.30	19.57	0.89	1.21	4.31	0.539	0.096	0.183	0.068	14.44
G09b	43.05	10.58	5.32	21.07	0.50	1.73	3.65	0.572	0.133	0.156	0.002	13.00
G10b	36.25	10.54	6.07	18.82	0.38	1.85	4.62	0.579	0.089	0.163	0.023	20.19
N01b	41.95	9.6	5.31	20.64	0.62	1.78	2.83	0.547	0.078	0.160	0.270	15.81
N02b	40.25	12.54	5.98	18.89	0.77	1.94	4.52	0.592	0.117	0.193	0.118	13.77
N03b	41.75	11.54	5.23	21.61	1.32	0.87	4.28	0.558	0.465	0.135	0.100	11.79
N04b	48.12	14.25	5.49	17.98	1.14	0.75	5.11	0.623	0.117	0.159	0.002	6.01
N05b	39.93	9.85	5.15	22.01	1.04	1.24	4.87	0.545	0.074	0.141	0.055	14.72

۲.۵. نتایج مطالعات پراش اشعه ایکس (XRD)

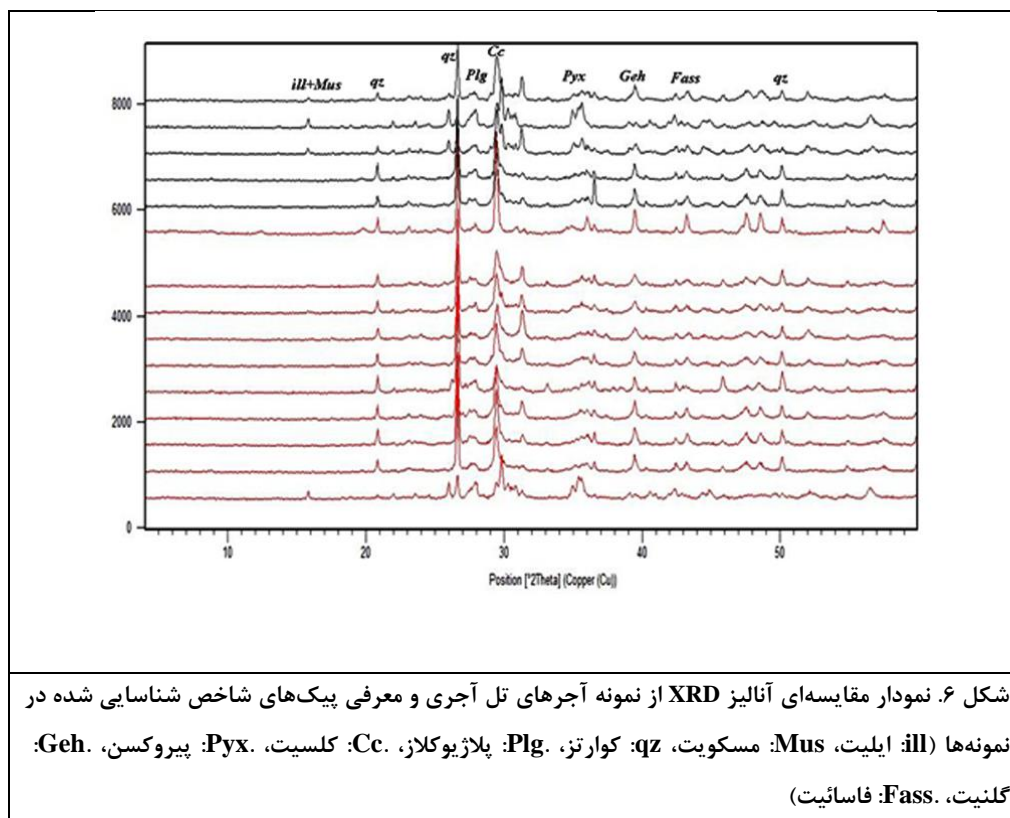
به طور کلی، فازهای شناسایی شده در نمونه آجرهای تل آجری را می‌توان به چهار گروه تقسیم کرد: گروه اول فازهای اصلی پرکننده بافت آجر هستند که مهم‌ترین آنها کوارتز است. گروه دوم فازهایی هستند که از محیط اطراف و محل دفن وارد شیء می‌شوند. فازهای شناسایی شده در نمونه که در این گروه جای می‌گیرند شامل آلبیت، وایراکیت، برلینیت و مسکویت می‌شوند. گروه سوم فازهایی هستند که به طور مشترک تحت تأثیر محیط و همچنین دمای فرایند ساخت در شیء پدیدار می‌شوند که دو فاز فاسائیت و گلنیت از این دسته می‌باشند. گروه چهارم، فازهای درجه حرارت بالا هستند نظیر اوژیت، آنورتیت و سانیدین. فازهای اوژیت و آنورتیت در اکثر نمونه‌ها شناسایی شده‌اند اما دو فاز دیگر، تنها در یکی از نمونه‌ها حضور دارند (G05). فازهای مهم شناسایی شده و فرمول شیمیایی آنها در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴. کلیه فازهای کریستالین شناسایی شده در XRD		
نام ترکیب	علامت اختصاری	فرمول شیمیایی
Quartz	Qz	SiO ₂
Albite	Ab	Na[AlSi ₃ O ₈]
Anortite	An	Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]
Dolomite	Dol	(MgCa)CO ₃
Gehlenite	Geh	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇
Calcite	Cc	CaCO ₃
Ortoclase	Or	KNa[AlSi ₃ O ₈]
Augite	Au	CaMg[Si ₂ O ₆]
Fassaite	Fas	Ca(MgFeAl)[(SiAl) ₂ O ₆]
Wairakite	Wa	Ca (Al ₂ Si ₄ O ₁₂) H ₂ O
Analcime	Ana	NaAlSi(H ₂ O)
Muscovite	Mus	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀
Sanidine	Sa	KNa[AlSi ₃ O ₈]
Microcline	Mic	K[AlSi ₃ O ₈]
Hematite	Hem	Fe ₂ O ₃
Magnetite	Mag	Fe ₃ O ₄
Enstatite	En	MgFe[Si ₂ O ₆]
Berlinite	Ber	AlPO ₄
Silver phosphate	AP	Ag ₃ PO ₄
Bindheimite	Bd	Pb ₂ Sb(OOHFH ₂ O) ₇
Lead silicate	PS	PbO ,SiO ₂
Diopside	Di	CaMg[Si ₂ O ₆]
Lead bismuth	PBO	Pb ₄ BiO ₄ PO ₄

کوارتز به عنوان شاخص‌ترین کانی اولیه موجود در ترکیب آجرهای تل آجری و در واقع بافت غنی از سیلیس آجرها است. این فاز، در بررسی‌های پتروگرافی نیز مشاهده و شناسایی شده است. فلدسپارها و پلاژیوکلازها نیز به مقدار زیاد در نمونه آجرهای تل آجری شناسایی شده‌اند. این دسته از آلومینوسیلیکات‌ها از دسته فازهایی هستند که از خاک منطقه یا خردشده مواد پرکننده آجر می‌باشند. آلپیت، به عنوان یک فاز اولیه در بافت آجر مطرح می‌شود که تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد پایدار است. آنورتیت با نقطه ذوب ۱۵۵۳ درجه سانتیگراد، جزو دسته کانی‌هایی است که در درجه حرارت بالا پایدار بوده و می‌تواند به صورت ثانویه و از مجاورت و واکنش بین فیلو سیلیکات‌ها با دانه‌های کلسیت نیز به وجود بیاید. فازهای سانیدین، میکروکلین و

اورتوکلاز از دیگر فازهای آلکالی فلدسپارها هستند که در نمونه G05 شناسایی شده‌اند. فاز دولومیت، در همه نمونه‌ها به غیر از نمونه G02 شناسایی شده است. در نمونه G02 فاز کلسیت به عنوان فاز کربناته شناسایی شده است. دولومیت و کلسیت از دسته فازهای کربناته‌ای هستند که به شدت در معرض انحلال و تخریب قرار دارند. مسکوویت یک آلومینوسیلیکات پتاسیم‌دار از فیلوسیلیکات‌های ثانویه است که در اثر تخریب و هوازدگی پلاژیوکلازها در محیط دفن در بافت دو نمونه از آجرها دیده شده است. موسکوویت، از دسته کانی‌های صفحه‌ای است که تا دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد در حین پخت پایدار است و در درجه حرارت بالاتر تخریب شده و کاتیون پتاسیم تولید می‌کنند (Deer et al, 1991: 220-235). مشخصه این کاتیون‌ها، تحرک بالا و تمایل به شرکت در واکنش‌های شیمیایی است. این کاتیون‌ها می‌توانند به ساختارهای سیلیسی نفوذ کرده و نقش گدازآوری داشته باشند. پیروکسن، یک کانی ثانویه درجه حرارت بالا محسوب می‌شود. از آنجایی که این فاز معمولاً در دمای ۹۰۰ درجه به بالا در نمونه آجرها به وجود می‌آید می‌توان به این نتیجه رسید که آجرها به احتمال قوی، پخت کاملی داشته‌اند. اوژیت و انستاتیت از فازهای گروه پیروکسن هستند. فاز اوژیت در بیشتر نمونه‌ها و انستاتیت در نمونه N02 شناسایی شده است. عدم حضور این فاز و دیگر فازهای درجه حرارت بالا در نمونه خشت آنالیز شده (G10) نپخته بودن این نمونه را تأیید می‌کند. گلنیت، از فازهای ثانویه مهم در درجه حرارت بالا در پخت آجر است که تقریباً در بیشتر نمونه‌ها شناسایی شده است. فازهای آهن‌دار، چون مگنتیت و هماتیت نیز در آجرهای بدون لعاب شناسایی شده است. تشکیل ترکیب جدیدی چون آنالسیم (ژئولیت سدیم‌دار) در نمونه آجر G01 نشان از تخریب آلبیت در شرایط مرطوب دارد. این فاز از نظر آسیب‌شناسی حائز اهمیت است. این ساختار با قابلیت جذب بالای مولکول‌های آب و تمایل به تبادل یونی خوب، سبب ناپایداری در بافت آجر می‌شود (Emami and Trettin, 2010: 185).

نمودار مقایسه‌ای آنالیز XRD از ۱۵ نمونه مورد مطالعه در ادامه ارائه شده است (تصویر ۶). ۵ طیف بالای نمودار متعلق به آجرهای بدون لعاب و ۱۰ طیف پایین آن مربوط به آجرهای لعاب‌دار است. فازهای شاخص در بالای پیک به صورت اختصار نوشته شده و اسم کامل فاز کریستالین در راهنمای شکل اشاره شده است. از این دسته اکسیدهای سرب با سه ترکیب متفاوت در سه نمونه لعاب آزمایش شده، شناسایی شده است که می‌تواند نشان‌دهنده این نکته باشد که لعاب زرد، بیشتر بر پایه ترکیبات سربی است. اکسید سرب در حرارت ۸۸۶ درجه سانتیگراد حل شده و تشکیل شیشه (لعاب) می‌دهد و این خصلت گدازآوری اکسید سرب به لعاب‌ها اجازه می‌دهد تا در دمای پایین‌تری ذوب شوند (Rosi et al. 2009: 110). فاز بیندهیمیت (Bindheimite) با فرمول شیمیایی $Pb_2Sb(OOHFH_2O)_7$ که در نمونه لعاب G08 شناسایی شده، با نتایج آنالیز فلورسانس اشعه ایکس که عناصر سرب و آنتیموان را در لعاب شناسایی کرده است مطابقت دارد و با توجه به وجود این فاز می‌توان گفت که لعاب این نمونه آجر ترکیب کمپلکس سرب و آنتیموان باشد. همچنین فاز اکسید سرب و بیسموت (Lead bismuthe Oxide) با فرمول شیمیایی $Pb_4BiO_4PO_4$ در نمونه لعاب G04، نشان‌دهنده ترکیب کمپلکس دیگری از سرب و بیسموت است (Rosi et al. 2009: 110).



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای آنالیز XRD از نمونه آجرهای تل آجری و معرفی پیک‌های شاخص شناسایی شده در نمونه‌ها (ill: ایلیت، Mus: مسکویت، qz: کوارتز، Plg: پلاژیوکلاز، Cc: کلسیت، Pyx: پیروکسن، Geh: گلنیت، Fass: فاسائیت)

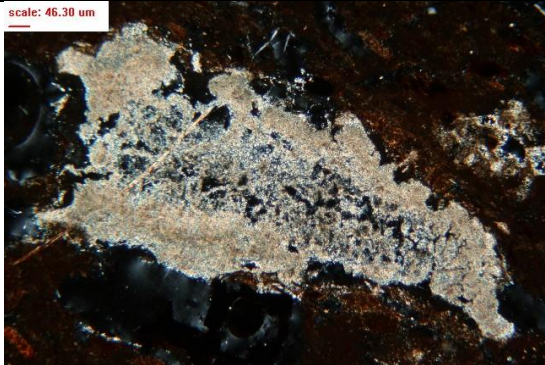
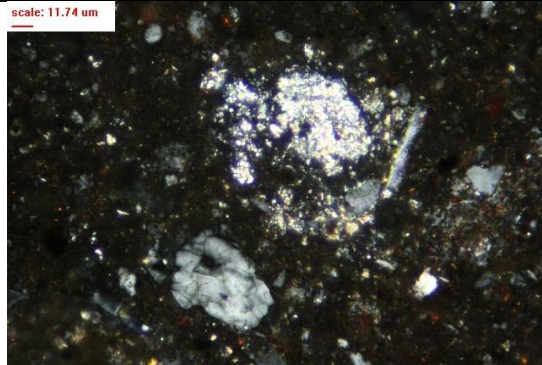

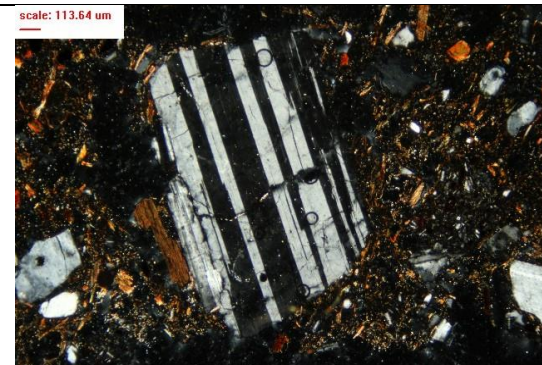
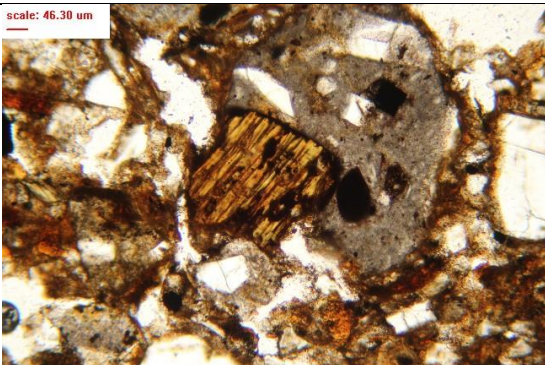

۵-۳. نتیجه مطالعات پترولوژی و پتروگرافی آجرهای تل آجری

بافت مواد پرکننده زمینه، بیشتر شامل قطعات کوارتز در ماتریکس سیلیسی بوده که با نتایج حاصل از آنالیز XRD و XRF نیز مطابقت دارد. مشاهده دانه‌های کوارتز به صورت گوشه‌دار در تصاویر میکروسکوپی آجرها دلیلی است بر این که این مواد منشأ رسوبی-آواری نداشته‌اند، بلکه از خردشدن سنگ برای استفاده به عنوان ماده پرکننده نشئت گرفته‌اند (شکل ۷). ریزدانه و زاویه‌دار بودن کوارتز به پیوستگی اجزاء و درهم‌تنیدگی بهتر آنها می‌انجامد. کربناتیزاسیون یا فرایند تخریب کلسیت در درجه حرارت ۷۸۰ تا ۸۹۰ درجه سانتیگراد در بافت آجر دیده می‌شود (شکل ۸). فازهای کربناتیزه شده در اثر دفن در محیط مرطوب به ترکیبات هیدروکسیدی تبدیل گشته که سبب انقباض بافت آجر و تخریب آن می‌گردند. از دیگر فازهای کریستالین مهم در ترکیب آجرها، وجود پلاژیوکلازها و آلکالی‌فلدسپات‌ها است که در ترکیب کانی‌شناسی خاک منطقه و همچنین در مواد پرکننده بافت آجر وجود دارند. پلاژیوکلازهای سدیم‌دار نظیر آل‌بیت با توجه به حوزه پایداری بالا تا ۱۳۷۰ درجه سانتیگراد، خود را در بافت آجر به وضوح نشان می‌دهند چرا که درجه پخت آجرها بدون شک به این درجه حرارت نخواهد رسید (شکل ۹). اما این کانی‌ها در محیط‌های مرطوب در مدت زمان زیاد و در اثر هوازدگی شیمیایی تخریب می‌شوند و کانی‌های صفحه‌ای و شبیه به رس به نام سریسیت تولید می‌کنند. این فرایند به سریستیزاسیون معروف است و در تصاویر میکروسکوپی با توجه به خصوصیات دانه‌ای و برفکی، یا سطح زبر و ناصاف روی سطح آل‌بیت شناسایی می‌شود (شکل ۱۰). نکته قابل توجه در مطالعات میکروسکوپی این آجرها این است که ساختار رنگی لایه‌لایه و زون‌بندی‌های موجود در آل‌بیت، عیناً در ترکیبات مواد

پرکننده سفال‌های به‌دست آمده از باروی تخت‌جمشید می‌باشد (Emami and Trettin, 2010: 183). چنین ساختارهای لایه‌ای شکل را به عنوان زون‌های رنگی در علم کانی‌شناسی می‌دانند. این ساختارها یا نشانه هوازگی و تخریب کند یک کانی است و یا تأثیر عوامل رادیواکتیو در محیط پیرامون یک فاز یا کانی (Görres et al. 2000: 995).

آنورتیت، به عنوان پلاژیوکلاز حاوی کلسیم و همچنین با پایداری در درجه حرارت بالا در بافت آجر با آنالیز XRD شناسایی شد. آنورتیت، از این جهت مهم است که هم به صورت اولیه در مواد معدنی خام مورد استفاده در تولید آجر یافت می‌شود و هم در تولید گلنیت به صورت ثانویه در دمای بالاتر از ۹۷۰ درجه دخیل می‌باشد (Martineau et al. 2007: 32-40). آلکالی‌فلدسپات‌ها نیز مانند پلاژیوکلازها با سطوح رخ موازی و با رنگ خاکستری در بافت آجرها دیده می‌شوند. این کانی‌ها نیز مانند پلاژیوکلازها در درجه حرارت‌های بالا پایداری دارند. آلکالی‌فلدسپات‌ها از خرده‌سنگ‌هایی که به منظور مواد پرکننده بافت آجر آماده‌سازی شده، به‌جای مانده‌اند (شکل ۱۱). از مهم‌ترین کانی‌های گروه آلکالی‌فلدسپات‌ها، اورتوکلاز می‌باشد که کانی مهمی برای ایجاد پتاسیم در محیط بدنه آجر است. از دیگر کانی‌های بسیار مهم در مطالعات میکروسکوپی، کانی‌های صفحه‌ای نظیر بیوتیت و موسکویت می‌باشد. این کانی‌ها به عنوان فازهای معرف درجه حرارت یا ترمومتر در کانی‌شناسی مطرح می‌گردند. بیوتیت، در سنگ‌های گرانیته و دیوریتی و گنایس و در بسیاری از سنگ‌های رسوبی نیز وجود دارد. این کانی در مقاطع نازک سنگ‌های طبیعی با خصوصیات اپتیکی مشخصی ظاهر می‌شود که از آن جمله، رخ‌های موازی عمود بر محور و نوری‌رنگ قرمز آن بدون مشاهده توسط لنز نیکول یا آنالیزاتور در میکروسکوپ پلاریزان است. این کانی همچنین دارای پلیکروئیسم بسیار مشخصی است. در درجه حرارت بالای ۹۵۰ درجه، این کانی خصوصیات نوری خود را تا حدی از دست داده و رنگ آن به زرد تبدیل شده و پلی کروئیسم آن نیز ضعیف می‌شود. وجود چنین مشخصه‌ای در بافت آجرها نشانه این است که درجه حرارت فرایند از ۹۵۰ درجه بالاتر رفته است (شکل ۱۲). به تعقیب این امر آهن موجود در این ساختار آزاد شده و فازهای آهن اکسیدی چون هماتیت و مگنتیت را تولید می‌نماید و یا ماتریکس یا بافت زمینه آجرها قرمز می‌شود که به پخت اکسیدی معروف می‌باشد (Kennett, 2002: 399-401). هماتیت هم به عنوان یک فاز اولیه با منشأ رسی، یا در ابتدای فرایند پخت تولید شده که در این محدوده حرارتی آجر به رنگ قرمز مشاهده می‌شود و یا در درجه حرارت‌های بالا و تحت شرایط احیاء به واسطه ایجاد اکسیدهای آهن از نوع مگنتیت رنگ آجر به سیاهی نیل می‌کند.

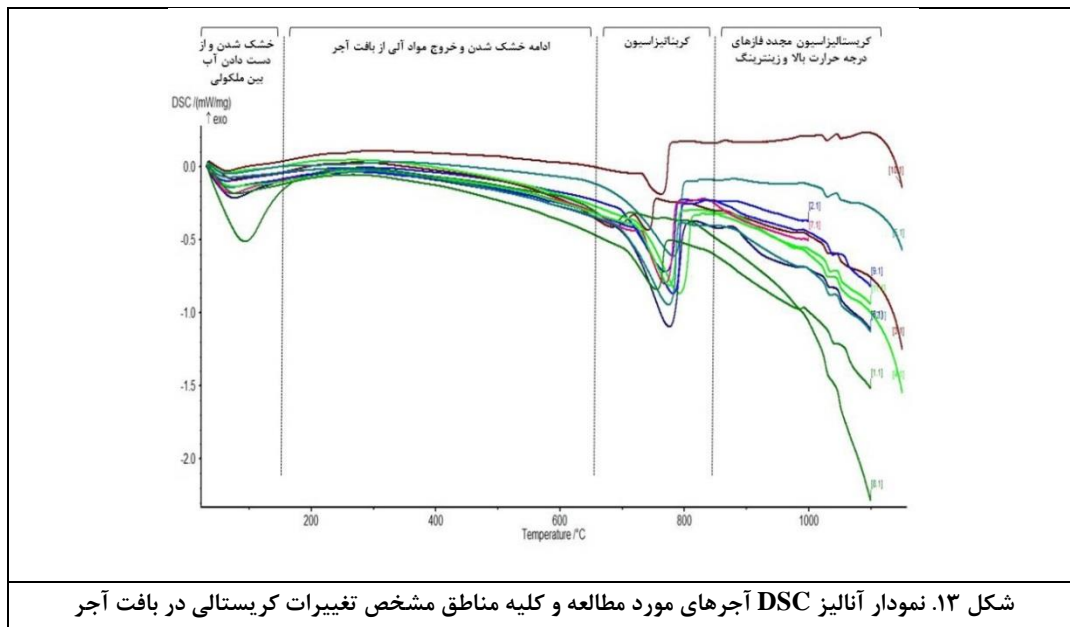
نکته حائز اهمیت در مطالعه مقاطع نازک آجرهای مطالعاتی منطقه تل آجری تشابهات مواد پرکننده در بافت این آجرها می‌باشد. چنین به نظر می‌رسد که در طول زمان تهیه و تولید آجر در استفاده از مواد خام برای درست کردن آن، هیچ‌گونه تغییر و یا تنوعی داده نشده است. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی تکنیک پخت و تولید سفال‌های منطقه تخت‌جمشید (Emami and Trettin, 2010: 188) و وجود چنین شباهت‌هایی حتی در پخت سفال می‌توان گفت که صنعتگران منطقه بعد از به دست آوردن نتیجه مطلوب از کارکرد یک ماده، دیگر تکنیک پخت آن را تغییر نداده و با علم بر مناسب بودن کیفیت ماده مزبور به تولید انبوه آن اقدام نموده‌اند.

	
<p>شکل ۸. کربناتیزاسیون و تخریب کلسیت به صورت فاز کم‌رنگ مرکزی و رشد کلسیت ثانویه در مرکز فاز و در فضای خالی. بزرگنمایی x20-2Pol+nicole</p>	<p>شکل ۷. ذرات خرد شده کوارتز در بافت آجر با رنگ مرزهای گوشه‌دار حاصل از تخریب سنگ‌های متامورف یا رسوبی. بزرگنمایی x20-2Pol+nicole</p>
	
<p>شکل ۱۰. سربستیزاسیون و هوازدگی پلاژیوکلاز در محیط‌های مرطوب. فازهای تولیدشده بر روی سطح پلاژیوکلاز شامل سربستیت و اپلیت می‌باشند. بزرگنمایی x40-2Pol+nicole</p>	<p>شکل ۹. پلاژیوکلاز با ساختار آلبیتی همراه با دوقلولی پلی سینتتیک در زمینه آجر. بزرگنمایی x20-2Pol+nicole</p>
	
<p>شکل ۱۲. بیوتیت با ساختار صفحه‌ای و خطوط رخ مشخصه این فاز با رنگ زرد پر رنگ ناشی از حرارت بالای ۹۵۰ درجه در بافت سیلیکاته آجر. بزرگنمایی x20-1Pol+nicole</p>	<p>شکل ۱۱. آلکالی‌فلدسپات از نوع اورتوکلاز با خطوط رخ مشخص این فاز در زمینه رسی بافت آجر. بزرگنمایی x20-2Pol+nicole</p>

۴-۵ نتایج مطالعات آنالیز حرارتی در آجرها به منظور تخمین درجه حرارت فرایند

آنالیز حرارتی DSC سه مرحله مشخص در پخت آجرها را اثبات می‌کنند (شکل ۱۳). تمامی آجرهای مورد مطالعه تا درجه حرارت ۱۷۰ °C خشک شده و تنها یک نمونه از خاک ایلیتی، که نشان‌دهنده دامنه وسیع

اندوترمی در نمودار است در بین نمونه‌ها دیده می‌شود. مرحله کربناتیزاسیون در آجرهای مطالعاتی از محدوده، از 680°C شروع و تا 820°C ادامه دارد. از آنجایی که کربنات کلسیم در محیط احیا در درجه حرارت‌های بالاتر از 800°C تخریب می‌شود، در نتیجه، فرایند پخت این آجرها تحت شرایط اکسیدی انجام گرفته است. پخت آجر با تغییرات نهایی فازی که سبب کریستالیزاسیون مجدد فازها در درجه 1140°C می‌شود، ادامه پیدا می‌کند. درجه حرارت پخت آجرها با توجه به حوزه پایداری کانی‌های تشکیل‌دهنده و همچنین آخرین تغییرات فازی در نمودار DSC بین 1100°C تا 1140°C تخمین زده می‌شود. آخرین تغییرات دمایی، نشان‌دهنده تکمیل واکنش‌های حرارتی مرحله پخت تا دمای حدود 1140°C می‌باشد، نتایج حاصل از آنالیز TG میزان تغییرات وزنی نمونه‌ها را بر اثر افزایش حرارت معین می‌کند. مشاهده افت وزنی در محدوده‌های دمایی 170°C و 680°C و 800°C مشخصه محدوده‌های تغییرات فازی در نمونه است.



۵-۵. نتایج مطالعات فیزیکی و مقاومت فشاری نمونه‌های مطالعاتی

بررسی آجرها زیر لوپ استریو نشان می‌دهد که بدنه آنها دارای تخلخل نسبتاً بالایی است. به منظور ارزیابی تأثیر شرایط محیطی و چگونگی فرآوری ساخت آجرها میزان تخلخل آجرها محاسبه شد. میزان تخلخل در آجر را به عوامل گوناگونی از جمله نوع تمپر، دانه‌بندی خاک، دمای پخت بدنه و محیط دفن می‌توان نسبت داد. تخلخل به صورت تخلخل اولیه در زمان فرآوری گل شکل می‌گیرد و تخلخل ثانویه در طول زمان دفن در بافت آجر به وجود می‌آید. تخلخل آجرهای مطالعاتی بین $28/06$ تا $38/81$ درصد محاسبه گردید.

برای تعیین مقاومت فشاری، آجر نمونه را در دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری قرار داده و با روند بارگذاری $3/5$ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع در ثانیه نیرو بر آن وارد شد. نتایج حاصل که بر اساس استاندارد ASTM اندازه‌گیری شد حاکی از مقاومت بالای آجرهاست. بر اساس استاندارد ۱۱۶۲ ایران، میزان حداقل مقاومت فشاری یک آجر دستی استاندارد $80-60$ kg/cm^2 می‌باشد و مقاومت یک آجر ماشینی باید بین

بر اساس نتایج حاصل از محاسبه مقاومت فشاری، این مقاومت در آجرهای تل آجری بین $107-131 \text{ kg/cm}^2$ محاسبه شده است که این رقم کیفیت بسیار بالای آجرها را به اثبات می‌رساند.

۶. نتیجه

با توجه به مطالعات آزمایشگاهی و ساختارشناسی آجرهای محوطه تل آجری و با وجود این که خاک مرودشت خاکی است که در آن درصد ناخالصی‌هایی مانند اکسید آهن و اکسید کلسیم بالاست، این آجرها را می‌توان در زمره آجرهای نسبتاً مرغوب قرار داد. آجرهای لعاب‌دار هخامنشی غالباً از یک خمیر غیر پلاستیک از جنس ماسه و آهک تشکیل شده‌اند که با یا بدون نقش برجسته قالب‌گیری می‌شده و سپس طی سه مرحله پخت آماده می‌شده است. در مرحله اول بیسکوئیت یا بدنه آجر پخته می‌شده است. در مرحله دوم شبکه‌بندی طرح بر روی آجر ایجاد می‌شده است و در مرحله سوم لعاب‌های رنگی داخل محدوده ویژه خود قرار گرفته و پخته می‌شدند. سپس، آجر در دمای ۹۰۰ تا ۱۱۴۰ درجه سانتیگراد پخته می‌شده است. اندازه آجرهای لعاب‌دار هخامنشی تقریباً ۴ اینچ، یعنی معادل ۱۰ سانتیمتر برای قطر هر آجر و ۱۳ اینچ یعنی معادل ۳۳ سانتیمتر برای طول هر آجر می‌باشد. به این صورت می‌توان نتیجه گرفت که آجرهای مربع‌شکل که بیشتر برای راه پله‌ها و درگاه تخت‌جمشید به کار رفته است، دارای ابعادی حدود $10 \times 33 \times 33$ سانتیمتر می‌باشد که این اندازه تقریباً مشابه ابعاد آجرهای محوطه تل آجری است.

کوارتز به عنوان فاز اصلی آجر در آنالیز XRD شناسایی شده است و مشاهده دانه‌های کوارتز با گوشه‌های زاویه‌دار توسط میکروسکوپ پلاریزان دلیلی است بر این که این مواد منشأ رسوبی - آواری نداشته بلکه ناشی از خرد شدن سنگ‌های مادر به منظور استفاده به عنوان ماده پرکننده بوده است. دانه‌های کوارتز در اندازه‌های تقریباً یکسان در بافت آجر پخش شده‌اند که نشان از ورز خوردن خوب این مواد پرکننده می‌باشد. شناسایی فازهای شکل گرفته در درجه حرارت بالا مانند گلنیت و پیروکسن در آنالیز XRD، معرف پخت مناسب آجرهاست. طیف‌های حاصل از آنالیز حرارتی DSC نیز نشان‌دهنده پخت آجرها در دمایی بین ۱۱۰۰ تا ۱۱۴۰ درجه سانتیگراد است. درصد بالای کلسیم احتمالاً به سبب میزان بالای ترکیبات آهکی در خاک منطقه است و حضور کلسیم در خاک اولیه، تأثیر به‌سزایی در تشکیل فازهای شکل گرفته در فرآیند پخت و پایین آوردن دمای پخت آجرها دارد. همان‌طور که می‌بینیم با وجود پختن آجرها در دمای ۱۱۴۰ درجه سانتیگراد در بین آنها نمونه آجر جوش دیده می‌شود. با توجه به تشابه در فازهای شناسایی شده با آنالیز XRD و عناصر شناسایی شده در آنالیزهای XRF، می‌توان به این نتیجه رسید که روند ساخت همه نمونه‌ها چه از لحاظ فرآوری و تهیه مواد اولیه و چه از نظر تکنیک پخت یکسان بوده است و این می‌تواند نشان‌دهنده در نظر داشتن استانداردهای اولیه در انتخاب مواد اولیه و مراحل از پیش تعیین شده برای پخت آجرها باشد. در تهیه و تولید آجر از بابت استفاده از مواد خام دیگر برای ساختن، هیچ‌گونه تغییر و یا تنوع تکنیکی داده نشده است و به نظر می‌رسد که صنعت‌گر با علم به کیفیت فرایند فعالیت خود را ادامه داده است.

۷. پی‌نوشت

1. Munsell Color System By T.M. Cleland

۸. منابع

- Boucharlat, R., 1987. Suse a l' e poque sassanide, *Mesopotamia*, 22, 357-366.
- Boucharlat, R and Benech, C., 2002. Organisation et am enagement de l' espace a Pasargades: reconnaissances archeologiques de surface, 1999-2002, *RTA*, 001.
- Boucharlat, R., 1989. Cairns and pseudo - cairns du Fars: l' utilisation des tombes de surface au 1er mill e naire de notre e re, in De Meyer and Haerinck, (eds.), 675 – 712.
- Boucharlat, R. and Haerinck, H., 1991. Ceramics xii, the Parthian and Sasanian periods, *EnIr*, 5, 304 – 307.
- Böttger, K. G., Thiedig, F., Knöfel, D., 2002. 'Keltisch-römische Mörtel vom Magdalensberg in Kärnten', *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, Vol. 8, 19-41.
- Callieri , P., 2007. *L' Archeologie du Fārs a l'epoque hellenistique: quatre lecons au College de France*, 8, 15, 22 et 29 Mars 2007, Vol. 11, de Boccard. Paris.
- Carter, E., 1994. Bridging the gap between the Elamites and the Persians in southeastern Khuzistan, in H. Sancisi-Weerdenburg (eds.), *Achaemenid History 8, continuity and change*, Leiden: Nederlands Instituut voor het Nabije Oosten, 65–95.
- Coningham, R. A. E., 1995. Dark Age or continuum? an archaeological analysis of the second emergence of urbanism in south Asia, in F.R. Allchin (ed.), *the archaeology of early historic south Asia*, Cambridge University Press, 20–30.
- de Morgan, J., 1905. *Histoire et travaux de la delegation en Perse du ministere de l' instruction public 1897–1905*, Ernest Leroux Éditeur, Paris.
- Deer, W. A., Howie, R. A., and Zussman, J., 1991. *An introduction to the rock forming minerals*, Longman Scientific & Technical.
- Dolata, J., 1999. *Archäologische und naturwissenschaftlich-technische Untersuchungen zur Beschaffung römischer Baukeramik im nördlichen Obergermanien'*, Akten des 1. Trierer Symposiums zur antiken Wirtschaftsgeschichte Sonderdruck. Verlag Philipp von Zabern . Mainz, 193-208.
- Emami, M. A., Kowald, T. and Trettin, R., 2009. Mineralogical and chemical investigation on the recrysattalization process during sintering in face-interface areas in ancient ceramic matrices, *Materials and Manufacturing Processes*, 24, Vol. 9, 934-941.
- Emami, M. A. & Trettin, R., 2010. Phase generating processes in ancient ceramic matrices through microstructure investigation with high resolution microscopy methods, *Journal of Advanced Microscopy Research*, 5, Vol. 11, 181-189.
- Gondet, S., 2011. *Occupation de la plain de Persépolis au I^{er} millénaire av.J.-C.(Fars central,Iran)*, Université Lumière Lyon 2.
- Görres, M., Evangelakakis, C., Kroll, H., Kohl, V., 2000. 'The application of mineralogical techniques to the characterization of archaeological ceramic finds, *Applied Mineralogy*, 2, 985-087.
- Hachmann, R., 1997. Die Völkerschaften auf den Bildwerken von Persepolis, in edited by U. Finkbeiner, R. Dittmann, and U. Hauptmann (eds.), *Beiträge zur Kultutgeschichte Vorderasiens. Festschrift für Rainer Michael Boehmer*, Mainz, Phillip van Zabern, 195–224..
- Hallock, R. T., 1969. *Persepolis fortification tablets*, Oriental Institute Publications 92, Chicago: University of Chicago Press.
- Hoerlé, S., 2006. Rock temperatures as an indicator of weathering processes affecting rock art, *Earth Surf. Process Landforms* 31, 383–389
- Kristály.F., Kelemen, E., Rozsa, P., Nyilas, I., Papp, I., 2012. Mineralogical investigations of medieval brick samples from Békés County (SE Hungary), *Archaeometry*, 54, part 2, 250-266.
- Kavenagh, C. and Wheeler, G. 2003. Evaluation of cleaning methods for the exterior brick at the Brooklyn Historical Society, *JAIC*, Vol. 42, No: 1, Article 6, 97-112

Kennett, D. J., 2002. Compositional characterization of prehistoric ceramics: new approach, *Journal of Archaeological Science*, 29, 443-455.

Martineau, R., Walter-Simonnet, A. V., Grobéty, B., Buatier, M., 2007. Clay resources and technical choices for Neolithic pottery (Chalian, Jura, France), chemical, mineralogical and grain-size analyses, *Archaeometry*, 49 (1), 23-52.

Molina, G., Di Febo, R., Molera, J., Pradell, T., 2013. Technology of production of manganese pigments in medieval ceramics, Emac 2013, *Proceedings of 12 European meeting on ancient ceramics*, Padova, Italy, 19-21

Marchetti, N., 2012. *Karkemish on the Euphrates, excavating a city's history*, Near Eastern archaeology, a publication of the American Schools of the Oriental Studies, Vol. 75, issue 3, 132-147.

Rosi, F., Manuali, V., Miliani, C., Brunetti, B. G., Sgamellotti, A., Grygar, T., Hradil, D., 2009. Raman scattering features of lead pyroantimonate compounds. Part I: XRD and Raman characterization of Pb₂Sb₂O₇ doped with tin and zinc, *Journal of Raman Spectroscopy*, 40, 107-111.

Sumner, W., 1974. Excavations at Tall-i Malyan 1971-72, *Iran*, 12, 155-80.

Sumner, W., (1986). Achaemenid settlement in the Persepolis plain, *AJA* 90 (1), 3-31.

Tite, M. S., Shortland, A. J., McCarthy, B., Paynter, S., 2008. Production of glazed pottery and brickwork in the Near East, in M. S. Tite and A. J. Shortland (eds.), *Production technology of faience and related early vitreous materials*, Monograph 72, Oxford University School of Archaeology, Oxford, 187-98.

Tilia, A.B., 1974. Discovery of an Achaemenian palace near Takht - i Rustam to the north of the terrace of Persepolis, *Iran* 12, 200 - 204.

Vogelsang, W., 1990. The Achaemenids and India, in Sancisi-Weerdenburg, in H. Kuhrt and A. Kuhrt (eds.), *Achaemenid History*, Vol. 4, Centre and Periphery, *Proceedings of the Groningen 1986 Achaemenid History Workshop*, Leiden: Nederlands Instituut voor het Nabije Oosten, 93-110.