

مطالعه باستان‌سنجی آجرهای لعاب‌دار هخامنشی به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی محوطه تل آجری در شهر پارسه

سودابه یوسف‌نژاد*

کارشناس ارشد مرمت آثار تاریخی - فرهنگی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده هنر و معماری

رضا وحیدزاده

عضو هیئت علمی گروه مرمت دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده هنر و معماری

محمدحسن طالبیان

استادیار مؤسسه آموزش عالی میراث فرهنگی و مدیر پایگاه میراث جهانی پارسه و پاسارگاد

(از ص ۱۶۵ تا ۱۷۹)

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۲۷، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۴/۱۷

چکیده

در این پژوهش آجرهای لعاب‌دار هخامنشی به دست آمده از کاوش‌های باستان‌شناسی تل آجری برای شناسایی ترکیبات سازنده لعاب رویه و بدنه آجری به کمک روش‌های شیمی تجزیه دستگاهی از قبیل: XRF، XRD، JCP، SEM-EDS و نیز میکروسکوپ نوری، آزمایش شده‌اند. نمونه لعاب‌های مورد مطالعه ظاهراً به رنگ‌هایی سفید و زرد می‌باشد که به دلیل سپری کردن فرایندهای فرسایش به حالت پودری و رنگ‌باخته درآمده است، به طوری که به کمک میکروسکوپ نوری تکه‌هایی پراکنده از لعاب آبی‌رنگ به روی زمینه فرسوده سفید یافت شد و نتایج حاصل از تجزیه کمی عنصری با حساسیت بالا در این نمونه وجود عناصر عامل ایجاد رنگ آبی از قبیل مس و کبالت و در نمونه زردرنگ آنتیموان و سرب را مشخص نمود. با توجه به شناسایی لعاب‌ها و ناپایداری ترکیبات رنگ‌ساز سازنده آن از قبیل مس و آنتیموان در دمای بالای 1000°C این آجرها در دمایی کمتر از آن پخت شده‌اند. بدنه‌های آجری به روش فلورسانس و پراش پرتو ایکس XRF و XRD مطالعه شدند. نتایج تجزیه عنصری این لعاب‌ها با لعاب‌های آجرهای لعاب‌دار کاخ آپادانای شوش مقایسه شده است.

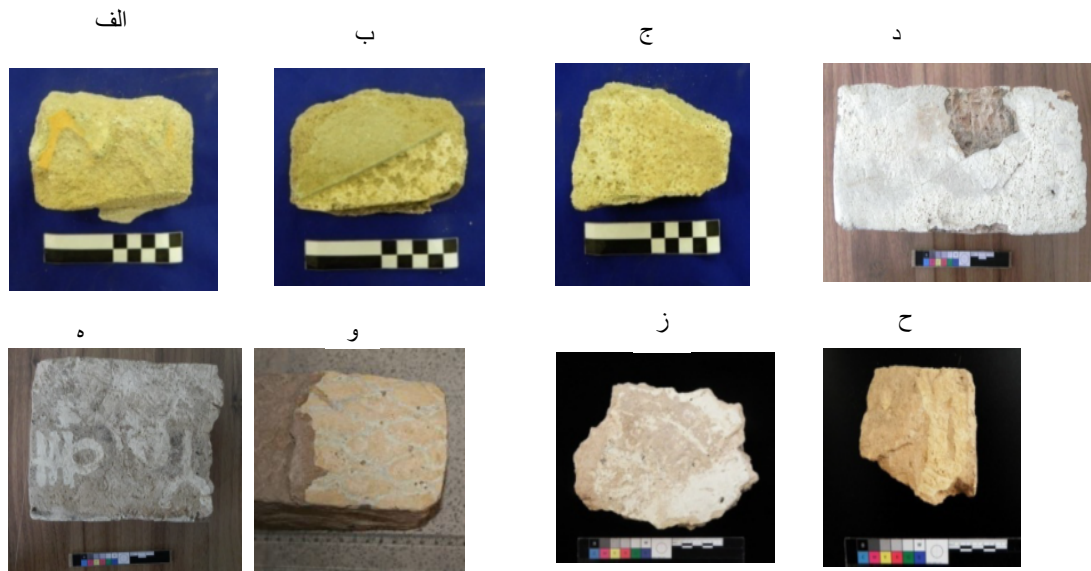
واژه‌های کلیدی: آجر لعاب‌دار، هخامنشی، تل آجری، تخت جمشید، شوش، شیمی تجزیه دستگاهی

۱- مقدمه

سابقه استفاده از آجرهای لعاب‌دار به تمدن بین‌النهرین باستان بازمی‌گردد، آنان برای تزئین کاخ‌ها و معابد از آجرهای لعاب‌دار استفاده می‌کردند. سومری‌ها و آکدی‌ها در بین‌النهرین در نیمه اول هزاره سوم نمونه‌های هنری خلق کردند که هنر بابل و آشور وارث آنان شد. این دو با هم اساس هنر کلاسیک را در خاور نزدیک باستان بنیان نهادند. سومری‌ها دیوارهای تالارها و ستون‌های بناها را با پوشش‌های مخروطی از گل پخته با رنگ‌های سیاه، سفید و قرمز پوشش می‌دادند. در معماری دوره بابل از گل پخته بلوک‌های ساختمانی با نقوش برجسته دیواری ساخته و آن‌ها را با لعاب تزئین می‌کردند. کولدوی (Koldewey) در کاوش‌های بابل محوطه وسیعی از آجرهای لعاب‌دار چندرنگ به دست آورد که با کنار هم گذاشتن آن‌ها سردرهای رنگی از آجرهای لعاب‌دار در موزه برلین شرقی بازسازی شد (مورنگات، ۱۳۸۷: ۳۰۲-۲۹۶). در زمان حکومت عیلامیان در نیمه دوم هزاره دوم از آجرهای لعاب‌دار در تزئین کاخ‌ها و معابد استفاده می‌شد، نمونه‌های شاخص آن‌ها و نیز تزئینات لعاب‌دار با رنگ‌های سفید، سبز و آبی در بزرگ‌ترین اثر معماری به جای مانده از آنان یعنی زیگورات چغازنبیل به کار رفته است، پس از عیلامیان و روی کار آمدن حکومت هخامنشیان آنان نیز در تزئین بناهای مهم خود در شهرهای بزرگ، همچون شوش و پارسه از آجرهای لعاب‌دار با نقوش گیاهی و حیوانات اساطیری استفاده می‌کردند (گیرشمن، ۱۳۷۱: ۱۳۹-۱۳۰). داریوش پس از احداث کاخ در شوش تصمیم به ساخت تخت-جمشید گرفت اما ساخت تخت‌جمشید در پارس تحولات پیشین را در این منطقه توجیه می‌کند؛ تحولاتی که منطقه را به یک مرکز فعال شهری و برخوردار از کاخ و جمعیت تبدیل کرده بود که با مراکز بابلی نیز در ارتباط بوده است و آمادگی داشته که امکانات لازم برای ساخت بنای عظیم تخت‌جمشید که شاه برای صفا در پای کوه مهر طرح‌ریزی کرده بود فراهم آورد (بریان، ۱۳۸۰: ۱۳۴-۱۳۲). شهر پارسه محیط بر صفا تخت‌جمشید و در دو دره شمالی و جنوبی آن گسترده بوده است و شاید در حدود سال ۲۵۰ قبل از میلاد، اندکی پس از سوختن تخت‌جمشید در زمان اسکندر متروکه شده است (هرتسفلد، ۱۳۵۵: ۱۶). کاوش‌های باستان‌شناسی متعددی از گذشته تا حال در شهر پارسه اطراف تخت‌جمشید انجام شده و بقایای معماری و نیز آثاری از زندگی مردم عادی در آن یافت شده است، در تداوم برنامه‌های روشمند مطالعه شهر پارسه در محدوده شمال غربی تخت‌جمشید محوطه معروف به تل آجری که در سرتاسر نمای آثار معماری یافت شده در آن آجرهای لعاب‌دار و آجرهای مزین به نقوش حیوانات اساطیری به کار رفته است، دارای اهمیت می‌باشد، زیرا در مورد کارکرد این محوطه تفسیرهای متعددی از طرف پژوهشگران مختلف نظیر ویلیام سامنر، تیلیا، تجویدی و سباستین کنده مطرح شده است، مانند این که محوطه مذکور کوره آجرپزی یا یادمانی آجری با کارکرد اداری یا مذهبی بوده است (عسکری، کالیری، ۱۳۹۰: ۸۰). هدف از انجام این پژوهش شناسایی مواد سازنده این آجرها، فن تولید آن‌ها، شناخت ماهیت لعاب و عناصر سازنده آن و بررسی وضعیت سطح فرسوده از نظر میزان فرسایش و علت آن و ارائه راهکاری بهینه در حفاظت این یادمان ارزشمند تاریخی است. پرسش‌های اساسی تحقیق در مورد شناسایی ترکیب بدنه آجری و لعاب رویه و بررسی احتمال منقوش بودن آن‌هاست، شباهت یا تفاوت عناصر سازنده لعاب با آجرهای لعاب‌دار هخامنشی کاخ آپادانا در شوش و بررسی فرایند فرسایش لعاب‌ها.

۲- دستگاه‌ها، روش آزمایش و نمونه‌برداری

نمونه‌برداری با همکاری بانک سفال تخت جمشید از نمونه‌های به دست آمده از حفاری تل آجری و نمونه‌برداری از آجرهای لعاب‌دار کاخ آپادانا با همکاری موزه شوش و هفت‌تپه انجام شد، نمونه‌های مورد مطالعه مطابق (شکل ۱، جدول ۱) شامل دو آجر لعاب‌دار به رنگ‌های سفید (Taj50) و زرد (Taj20) می‌باشند - در تحقیق با کدهای PE1, PE2 بررسی می‌شوند - و سه آجر لعاب‌دار کاخ آپادانا در شوش به رنگ‌های زرد SU1، آبی SU2 و سفید SU3 می‌باشند. نمونه‌های تل آجری در دو بخش لعاب رویه و بدنه آجری به روش آزمایشگاهی و با استفاده از روش‌های شیمی تجزیه دستگاهی بررسی شدند. دستگاه‌های به کاررفته در این پژوهش عبارتند از: میکروسکوپ الکترونی روبشی، Wega Tescan HV:15.00kv همراه با تجزیه عنصری SEM-EDS، پلاسمای جفت‌شده القایی ICP، Agilent 735 radial، فلورسانس اشعه ایکس Philips X'unique II، XRF، پراش اشعه ایکس XRD، Advance Bruker D-8 و میکروسکوپ نوری. از دو نمونه PE3 و PE4 برای انجام بررسی‌های فیزیکی استفاده شده است.



شکل ۱- PE4 (ح)، PE3 (ز)، PE2 (و)، PE1 (ه)، PE1 (د)، SU3 (ج)، SU2 (ب)، SU1 (الف)

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه

کد نمونه	محل نمونه	رنگ بدنه	ابعاد* (cm) ارتفاع × عرض × طول	توضیحات
PE1	تل آجری	قهوه‌ای روشن	۲۲×۱۴×۷	یک سطح لعاب‌دار سفید، سطح رویی دارای علائم و نشانه
PE2	تل آجری	قهوه‌ای متوسط	۱۴×۷×۵	یک سطح لعاب‌دار زرد- دارای نقش برجسته فلس‌مانند
PE3	تل آجری	قهوه‌ای - سبز	۱۴×۷×۵	-
PE4	تل آجری	قهوه‌ای روشن	۱۴×۸×۵	-
SU1	کاخ آپادانا - شوش	خاکستری روشن	۲۲×۱۸×۸	دارای جزئی لعاب زرد در یک سطح
SU2	کاخ آپادانا - شوش	خاکستری روشن	۲۱×۷×۵	دارای قسمتی لعاب سفید و آبی در یک سطح
SU3	کاخ آپادانا - شوش	خاکستری روشن	۱۴×۸×۵	دارای قسمتی لعاب سفید در یک سطح

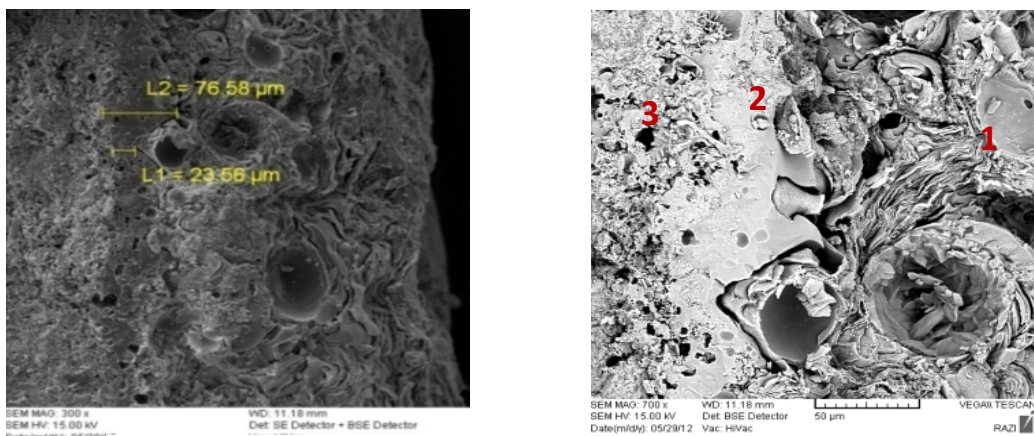
*اندازه‌های داده‌شده مربوط به آن دسته از ابعادی است که سالم بوده و امکان اندازه‌گیری وجود داشت.

۳- بحث و بررسی نتایج

آجرهای لعاب‌دار در این پژوهش با ترکیبی از روش‌های مختلف تجزیه دستگاهی که به‌طور مکمل اطلاعات ارزشمندی را در جهت شناسایی ترکیبات سازنده آجر و پی‌بردن به فنون ساخت آن‌ها در اختیار قرار می‌دهند، مورد مطالعه قرار گرفتند. برای شناسایی دقیق بدنه‌های آجری از روش SEM-EDS، فلورسانس و پراش اشعه ایکس استفاده شد. در مورد لعاب رویه آزمایشات با محوریت شناسایی ترکیبات سازنده لعاب و بررسی وضعیت سطح از نظر میزان فرسودگی و بررسی فرایند فرسایش انجام گرفته است، بدین‌منظور روش‌های SEM-EDS، XRF، XRD، ICP و میکروسکوپ نوری به‌طور مکمل یکدیگر اطلاعات مورد نظر در مورد لعاب‌های رویه را فراهم آوردند. نتایج حاصل از تجزیه عنصری لعاب‌های تل آجری با لعاب‌های کاخ آپادانای شوش مقایسه می‌شود.

۳-۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-EDS)

بدنه‌های آجری و نیز لعاب‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM برای بررسی دقیق‌تر ساختار سطحی، همچنین تجزیه عنصری مورد مطالعه قرار گرفتند، در مورد بدنه‌های آجری عناصر کلسیم، سیلیسیم، آهن، پتاسیم، آلومینیوم و منیزیم گزارش شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از لعاب سفید از مقطع و از سطح، نشان از فرسودگی و لایه‌لایه شدن لعاب دارد. در مطالعه سطح مقطع لعاب فرسوده توسط میکروسکوپ الکترونی لایه‌ای به نسبت چگال‌تر میان بدنه آجری و لعاب با ضخامتی حدود ۲۳-۷۶ میکرومتر مشخص گردید، تجزیه سطح مقطع لعاب در سه نقطه ۱، ۲، ۳ مطابق (شکل ۲، جدول ۲) نشان می‌دهد که این لایه ترکیبی حد واسط میان بدنه آجری و لعاب رویه دارد و پس از اعمال لعاب به‌روی آجر ایجاد شده است، واضح است که میزان زبری سطح با ازدیاد سطح تماس پوشش و پایه می‌تواند در افزایش چسبندگی لعاب به بدنه موثر بوده باشد. یکنواخت بودن حرارت کوره پس از قرار گرفتن آجرهای لعاب‌داده شده در آن و گیرش تدریجی لعاب از سطح به عمق این فرصت را برای لایه‌های زیرین و تشکیل ناحیه حد واسط فراهم آورده است. بررسی تجزیه عنصری در سه نقطه مشخص بر روی بدنه، لایه حد واسط و لعاب رویه نشان می‌دهد که غلظت آلومینیوم از سطح مشترک به سمت سطوح افزایش یافته و غلظت سیلیسیم جهتی عکس این را نشان می‌دهد، این نتایج در مورد لعاب‌های سالم به‌گونه‌ای دیگر است؛ به عنوان مثال برعکس لعاب‌های فرسوده مقدار آلومینیوم از سطح مشترک به سمت بدنه و لعاب کاهش می‌یابد (Eppler, 1998: 236-238). این تغییرات غلظت یونی در لعاب‌های فرسوده دلیلی است بر پیشرفت فرایند تعویض یونی در طی سالیان متمادی در محیط دفن. مطالعات ژئوشیمی انجام‌شده در بنیاد پژوهشی پارسه و پاسارگاد نشان می‌دهد که خاک منطقه ماهیت قلیایی دارد (زارع، ۱۳۸۳: ۲۰-۱۷)، از طرفی pH سنجی بدنه‌های آجری نیز در این تحقیق نشان می‌دهد که آن‌ها نیز کمی قلیایی هستند بنابراین وجود رطوبت در محیط دفن و گذر زمان طولانی شرایط را برای حملات هیدروکسیل و پیشرفت حل شدن و به اصطلاح خوردگی لعاب فراهم می‌آورد (White, 1980: 2-6).



شکل ۲ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطح مقطع لعاب، نمونه PE1

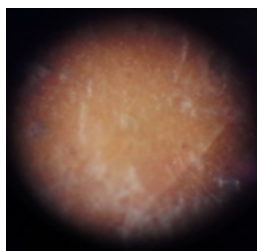
جدول ۲- نتایج آنالیز عنصری در سه نقطه مشخص روی لعاب، لایه واسطه و بدنه آجری

تجزیه عنصری در نقطه ۱ لعاب W%		تجزیه عنصری در نقطه ۲ W% لایه حد واسط		تجزیه عنصری در نقطه ۳ بدنه آجر W%	
Mg	۵/۲۱	Mg	۴/۴۸	Mg	۳/۱۸
Al	۱/۶۹	Al	۱/۲۳	Al	۵/۰۵
Si	۲۴/۰۲	Si	۲/۸۷	Si	۱۳/۱۵
Ca	۳/۷۱	Ca	۱۸/۵۸	Ca	۴۶/۳۰
Fe	۱/۱۵	Fe	۰/۰۸	Fe	۱/۳۹

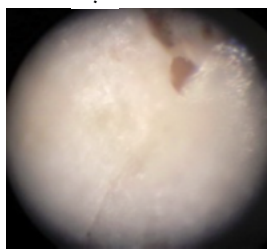
۳-۲- میکروسکوپ نوری

نمونه‌های لعاب سفید و زرد با میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفتند، تصاویر نشان‌دهنده بافتی فرسوده از لعاب‌های مذکور می‌باشند (شکل ۳)، میزان فرسودگی لعاب در نمونه‌های تل آجری بیش از نمونه‌های شوش می‌باشد. اما نکته قابل توجه این است که در مورد نمونه سفید بررسی‌های متعدد میکروسکوپ نوری حاکی از وجود تکه‌هایی پراکنده از لعاب آبی‌رنگ می‌باشد (شکل ۴-ه) که این فرض را تحکیم می‌کند که آجر لعاب‌دار مذکور دارای نقوشی غالباً آبی‌رنگ بوده است و سالیان متمادی مدفون بودن و پیشرفت فرایندهای فرسایش سبب محوشدن رنگ آبی و باقی‌ماندن ذرات پراکنده میکروسکوپی از آن شده است. در ادامه، انجام آزمایشات تجزیه کمی و با حساسیت بیشتر کمک شایانی در اثبات این مطلب خواهد کرد.

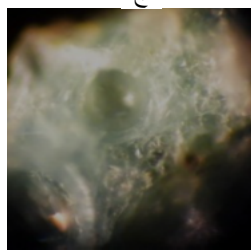
الف



ب



ج

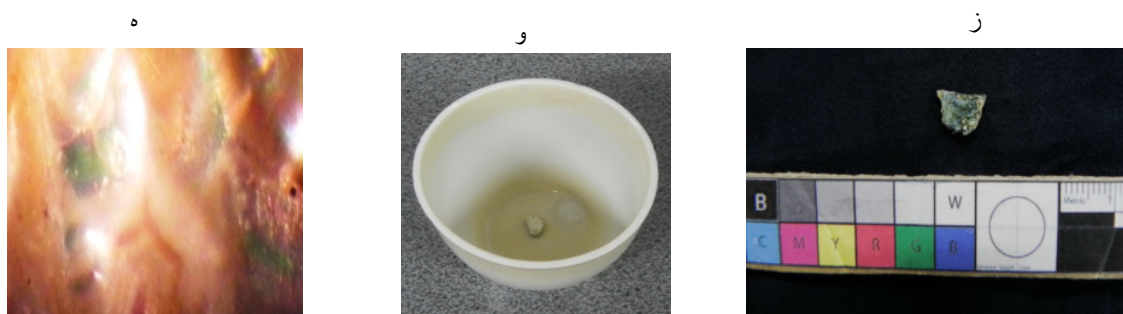


د



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ نوری ۱۰۰x از نمونه‌های لعاب

آزمون پخت مجدد لعاب بسیار فرسوده‌ای که دارای ذرات میکروسکوپی لعاب رنگی می‌باشد، در کوره با حرارت 900°C به همراه کمک ذوب بی‌کربنات سدیم، رنگ آبی ایجاد کرد (شکل ۴- و، ۴- ز).



شکل ۴- (ه) تصویر میکروسکوپ نوری و ذرات پراکنده لعاب آبی $200\times$ نمونه PE1 (و) لعاب سفید قبل از پخت در بوتۀ آزمایش (ز) لعاب پس از پخت

۳-۳- پلاسمای القایی جفت شده ICP

فرسودگی زیاد، از بین رفتن رنگ و کاهش غلظت موثر آن در لعاب که از حد تشخیص روش‌های به‌کار رفته کمتر می‌باشد از سوئی، و محدودیت مقدار نمونه‌ها از سوی دیگر ضرورت استفاده از روشی تجزیه‌ای با حساسیت بالا را معلوم ساخت، بنابراین برای تجزیه و شناسایی لعاب‌های فرسوده روش پلاسمای جفت شده القایی که با دقت زیاد (ppm) قادر به شناسایی طیف گسترده‌ای از عناصر بدون تداخل شیمیایی می‌باشد، به‌کار رفت (وست، ۱۳۸۷: ۳۸۷-۳۸۵)، نتایج حاصل از تجزیه لعاب‌ها به روش ICP در جدول ۳ و نتایج مقایسه‌ای مقدار عناصر کم‌مقدار و دیگر عناصر در نمونه‌های لعاب به‌صورت نمودار میله‌ای در شکل‌های ۵- الف، ۵- ب، ۵- ج آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه ظاهراً سفید که دارای ذرات میکروسکوپی لعاب آبی بود، دارای عناصر مس و کبالت به عنوان عوامل ایجاد رنگ آبی می‌باشد، این نتیجه با مشاهدات میکروسکوپی هماهنگی دارد و درستی این فرضیه را که آجر لعاب‌دار Taj50 دارای نقوش غالباً آبی‌رنگ بوده است را تحکیم می‌کند، از طرفی مطابق شکل (ه- ۱) روی این آجر لعاب‌دار علائم و نشانه‌هایی وجود دارد که می‌توانسته راهنمایی برای چینش صحیح آجرهای منقوش و دستیابی به طرحی واحد بر روی دیوار باشد؛ این سنت به بیان باستان‌شناسان در بین‌النهرین باستان در آجرهای لعاب‌دار کاخ شلمانزار III نیز وجود داشته است (Reade, 1963:39). در مورد آجرهای لعاب‌دار زرد رنگ SU1 و PE2 عناصر سرب و آنتیموان به عنوان عوامل ایجاد رنگ زرد، در نمونه سفید شوش SU3، آنتیموان و کلسیم که در ترکیب می‌تواند به عنوان عامل ایجاد سفیدی لعاب باشد گزارش شده است (Holakooei 2013:120)؛ نتایج حاصل با سایر مطالعات انجام‌شده بر روی آجرهای لعاب‌دار رنگین شوش هماهنگی دارد (Harper 1993:223,225)، (Caubet, 1998:23-26). وجود عناصر واسطه رنگ‌ساز همچون مس و آنتیموان در ترکیب لعاب و ناپایدار بودن آن‌ها در دماهای بیش از 1000°C می‌تواند دلیلی بر پخت آجرهای لعاب‌دار مورد مطالعه در دمایی کمتر از 1000°C باشد.

(Eppler 1998 : 151,155,156).

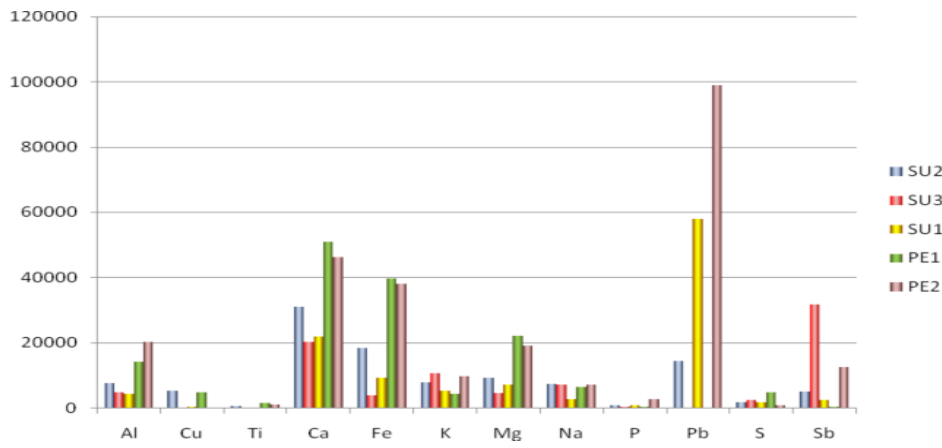
جدول ۳- نتایج تجزیه عنصری لعاب‌های هخامنشی تل آجری و شوش به روش ICP

	Ag	Al	As	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe	K
DL	0.1	100	0.5	5	0.2	0.2	100	0.1	1	1	1	1	100	100
SU1	14.1	4323	21	86	0.3	0.71	21896	1.51	7	11	22	409	9222	5160
SU2	1.4	7667	29.2	59	0.3	0.41	30994	0.5	8	1016	36	5266	18308	7912
SU3	0.31	4756	6.7	163	<0.2	0.41	20297	1.3	7	5	21	50	3799	10725
PE1	0.21	14201	2.2	38	0.5	0.37	50905	0.22	11	1315	421	4821	39796	4397
PE2	29	20246	100.7	151	0.8	0.53	46318	1.6	18	14	420	189	37969	9808

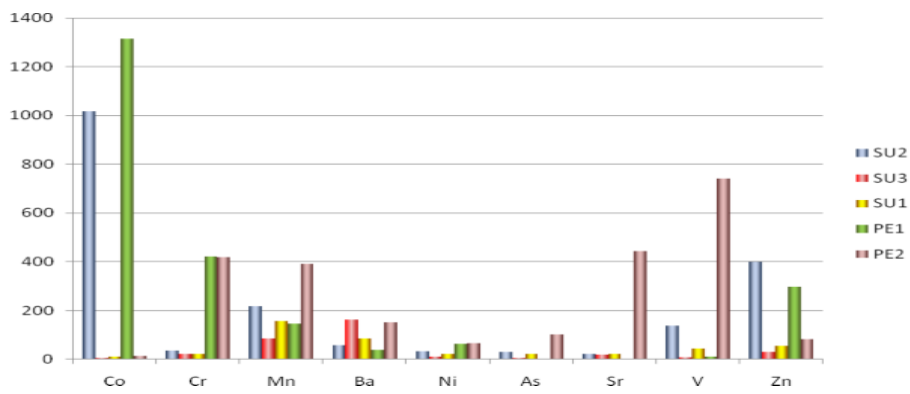
	La	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Sb	Sc	Sn	Sr
DL	1	1	100	5	0.5	100	1	10	1	50	0.5	0.5	0.5	2
SU1	3	2	7084	158	1.3	2590	22	696	57960	1729	2473	1	5.3	21
SU2	4	3	9273	219	1.1	7253	34	698	14414	1718	4974	2	6.6	22
SU3	3	<1	4474	85	0.91	7133	11	363	111	2562	31726.2	1.1	3.7	20
PE1	5	67	22214	146	1.11	6547	64	339	606	4849	347.8	3.5	5.3	301
PE2	11	19	19137	391	1.61	7181	67	2570	98883	776	12456	4.2	3.1	445

	Th	Ti	U	v	Y	Yb	Zn	Zr
DL	0.5	10	0.5	1	0.5	0.2	1	5
SU1	4.5	203	3.2	45	2	0.5	56	6
SU2	5	657	3	138	3	0.7	101	15
SU3	5.2	224	2.4	15	2	0.4	29	<5
PE1	6.6	1434	4.7	12	3	0.7	297	19
PE2	5.2	975	2.3	741	8	2.1	82	<5

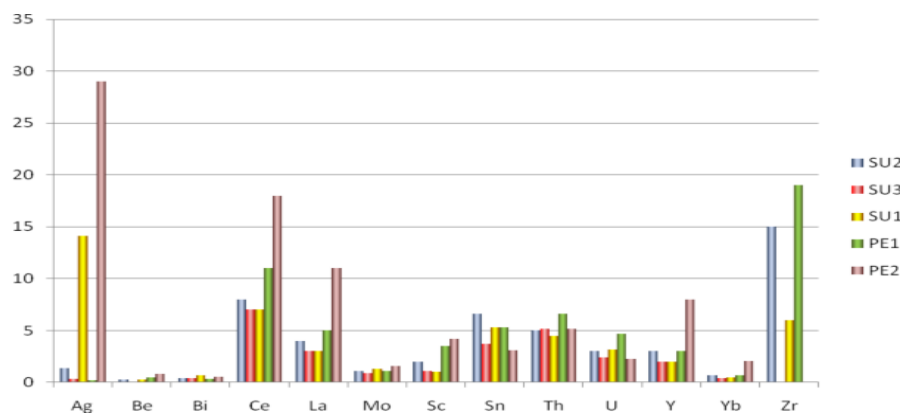
(الف)



(ب)



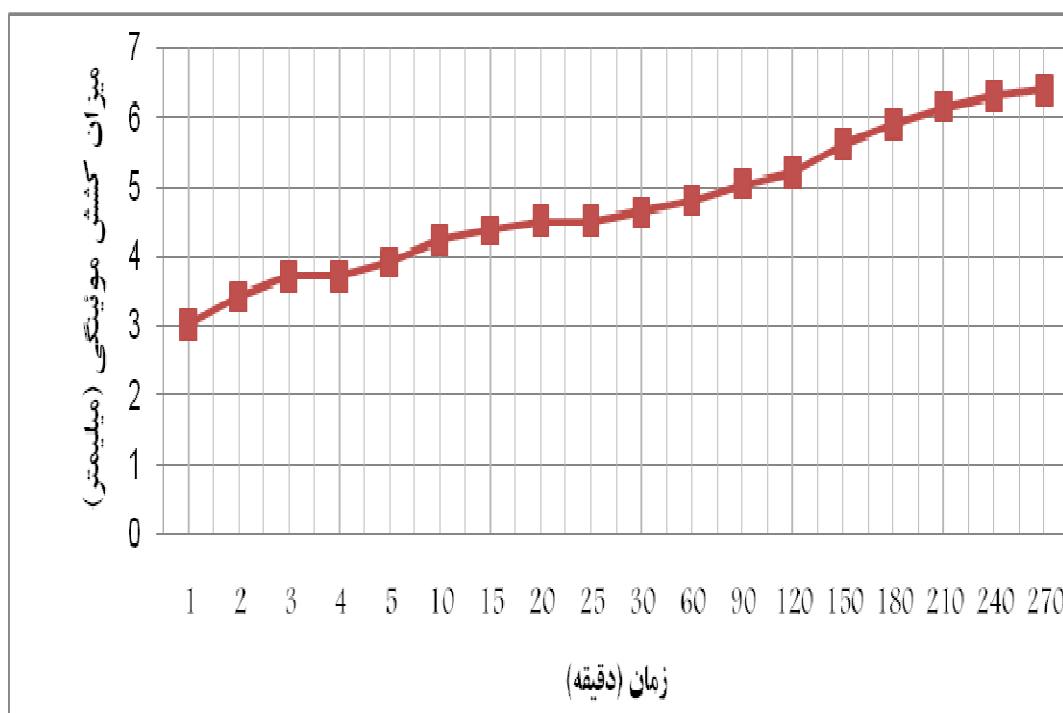
(ج)



شکل ۵- نمودار میله‌ای مقایسه نتایج تجزیه عنصری ICP لعاب‌ها بر حسب ppm

۳-۴- مطالعات فیزیکی

از نظر ظاهری آجرهای لعاب‌دار تل آجری با سایر آجرهای لعاب‌دار هخامنشی مانند آجرهای لعاب‌دار شوش که ساختار ماسه - آهکی دارند، متفاوت می‌باشد و دارای انسجام بیشتری است. بر اساس آزمایشات فیزیکی انجام‌شده در این تحقیق، مطابق دستورالعمل‌های آزمایشگاهی ICCROM، میزان تخلخل آجرهای تل آجری به‌طور میانگین و اندازه‌گیری‌شده در ۶ نمونه از قسمت‌های مختلف آجر PE4 و PE3 ۵۰٪ می‌باشد، البته لازم به ذکر است که این آجرها به دلیل مدفون‌بودن و جذب نمک‌ها بخشی از ویژگی‌های تخلخلی خود را از دست داده‌اند، در واقع سپری کردن فرایندهای فرسایشی در طی سالیان دفن می‌توانسته است در تغییر میزان تخلخل آجر تأثیر داشته باشد، بنابراین نمونه‌ها از قسمت‌های مختلف بدنه آجر بوده و عدد گزارش شده میانگین است. جذب آب در بدنه به طور میانگین ۲۵٪ است (جدول ۴- الف و ب) و مطابق با ویژگی‌ها و روش آزمون آجر رسی مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، حداکثر میزان جذب آب، ۲۳٪ برای آجرهای با کیفیت ویژه و ۲۰٪ برای آجرهای معمولی می‌باشد. تبلور نمک‌های محلول در بدنه آجر مطابق با استاندارد در محدوده کم قرار می‌گیرد، میزان جابجایی نمک‌های محلول در بدنه این آجرها در محلول سولفات سدیم ۱۰٪ و در طی ۱۵ روز ۱/۹ گرم است و نمودار کشش موئینگی آب (شکل ۸ و جدول ۵)، میزان جذب آب را بر حسب میلی‌متر در بدنه آجر در صورت قرارگرفتن در شرایط مرطوب نشان می‌دهد (Teutonico, : 44, 47, 52,58, 1988).



شکل ۶- نمودار کشش موئینگی آب در بدنه نمونه آجر از تل آجری PE4

جدول ۴- الف) درصد جذب آب در بدنه آجری PE3 و PE4 (ب) میزان تخلخل در بدنه آجری PE3 و PE4

(الف)

میانگین	PE4-6	PE4-6	PE4-5	PE4-4	PE3-3	PE3-2	PE3-1	شماره نمونه
۲۵	۲۰	۲۶	۲۶	۳۰	۲۷	۲۱	۳۱	درصد جذب آب

(ب)

میانگین	PE4-7	PE4-6	PE4-5	PE4-4	PE3-3	PE3-2	PE3-1	شماره نمونه
۵۰	۴۰/۵	۷۲	۳۹	۶۴	۴۹	۳۹	۴۲/۵	میزان تخلخل

جدول ۵- کشش موئینگی آب در بدنه نمونه آجر PE4 از تل آجری

زمان (دقیقه)	۱	۲	۳	۴	۵	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰
میزان کشش موئینگی (mm)	۳	۳/۴	۳/۷	۳/۷	۳/۹	۴/۲۳	۴/۳۷	۴/۵	۴/۵	۴/۶۳

ادامه از جدول ۵

زمان (دقیقه)	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۸۰	۲۱۰	۲۴۰	۲۷۰
میزان کشش موئینگی (mm)	۴/۸	۵/۰۳	۵/۲	۵/۶	۵/۹	۶/۱۵	۶/۳	۶/۴

۳-۵- آزمایشات XRD و XRF

آجر را باید از خانوادهٔ سرامیک‌ها به حساب آورد و عمدتاً از سیلیس SiO_2 (معمولاً بین ۵۵ تا ۶۵ درصد وزنی) و آلومینا (۱۰ تا ۱۵ درصد وزنی) تشکیل شده که با بیش از ۲۵ درصد از سایر تشکیل‌دهنده‌ها ترکیب شده‌اند. آجر رسی با شکل‌دادن به رس‌ها در قالب‌هایی با اندازه‌های مناسب و پخت آن در کوره ساخته می‌شود. تفاوت خصوصیات آجر به مواد اولیه مورد استفاده و روش تولید آن بستگی دارد (ویسه، ۱۳۷۳: ۳). بدنه‌های آجری تل آجری، برای شناسایی ترکیبات تشکیل‌دهنده به روش فلورسانس و پراش پرتو ایکس XRF و XRD مورد بررسی قرار گرفتند (Cardiano, 2004: 103-111)، (Cultrone, 2005: 297-308) مطابق جدول ۶ اکسیدهای اصلی ساختار آجر به ترتیب فراوانی عبارتند از: K_2O ، MgO ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 ، CaO ، SiO_2 که نشان از ساختار رسی آجرها دارد، نتایج پراش پرتو X در دو نمونهٔ تل آجری مطابق با جداول ۸ و ۹ کانی‌های رسی

همانند مونتموریونیت، هالوزیت و کلریت، فلدسپارها شامل میکروکلین، ارتوکلاز، آنورتیت، سانیدین را معرفی می‌کند. لازم به ذکر است که وجود فاز کلسیت می‌تواند ناشی از تشکیل ثانویه آن در طی زمان و یا باقی‌مانده از مواد اولیه آجر بر اثر عدم تجزیه کامل حین پخت باشد. آزمایش پراش پرتو ایکس انجام گرفته بر روی لعاب علاوه بر زمینه آمورف ساختار شیشه‌ای فازهای معدنی تشکیل یافته بر اثر فرایندهای فرسایش را نشان می‌دهد (شکل ۷، جدول ۱۰). نتایج تجزیه XRF نمونه لعاب تل آجری در جدول ۷ با مشخص کردن اکسیدهای قلیایی و قلیایی خاکی در نمونه مورد مطالعه نشان از ماهیت قلیایی لعاب دارد.

جدول ۶- نتایج آزمایش XRF بدنه آجری PE1

اکسیدهای سازنده بدنه آجری	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO
PE1 (Wt%)	۰/۷	۳/۷۲	۹/۲	۴۰/۶	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۱۵	۱/۹۶	۱۷/۸

ادامه جدول ۶

اکسیدهای سازنده بدنه آجری	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	L.O.I
PE1 (Wt%)	۰/۷۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۱۳	۶/۵	۰/۰۱	۰/۰۹	۱۷/۸

جدول ۷- نتایج آزمایش XRF لعاب نمونه PE1

اکسیدهای سازنده لعاب	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	L.O.I
PE1 (Wt%)	۱/۳۷	۶/۲۳	۲/۵۶	۵۴	۰/۰۷	۰/۹۸	۰/۵۱	۷/۲۸	۰/۲۳	۰/۰۲	۵/۹۹	۱۸/۴

جدول ۸ - نتایج تجزیه XRD نمونه PE2

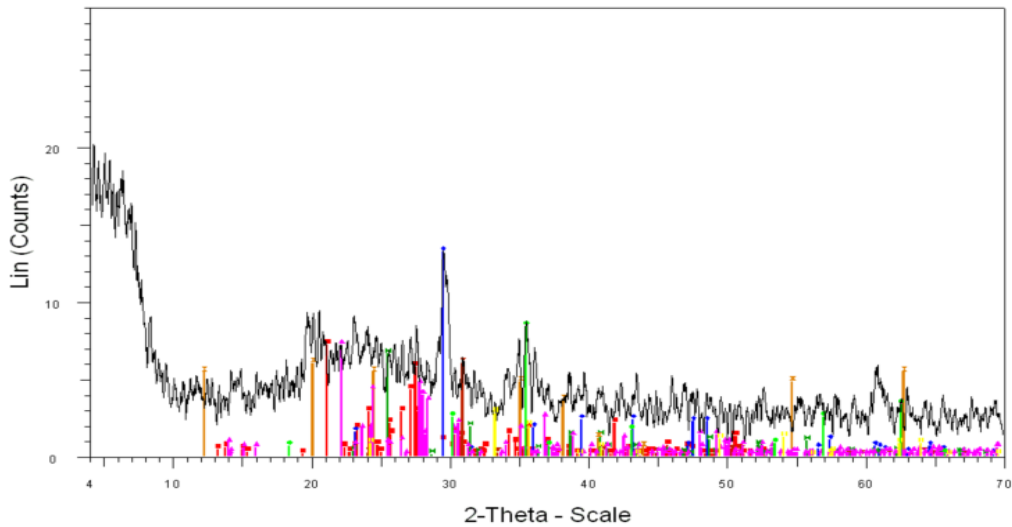
نام ترکیب	فرمول شیمیایی	مقدار (نیمه کمی)	سیستم تبلور
Calcite	CaCO ₃	۳۲/۶	Hexagonal (Rh)
Quartz, syn	SiO ₂	۲۵/۵	Hexagonal
Anorthite, ordered	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	۸/۶	Triclinic8
Microcline, ordered	KAlSi ₃ O ₈	۷/۲	Triclinic
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	۷/۲	Monoclinic
Dolomite, ferroan	Ca(Mg,Fe)(CO ₃) ₂	۶/۶	Hexagonal (Rh)
Magnetite	Fe ₃ O ₄	۶	
Albite, ordered	NaAlSi ₃ O ₈	۲/۶	Triclinic
Glaucophane	Na ₂ (Mg,Fe,Al)5Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	۱/۲	Monoclinic
Anhydrite, syn	CaSO ₄	۱/۶	Orthorhombic

وجود حدود ۱/۵٪ سولفات کلسیم در نتایج گزارش شده توسط پراش پرتو X، می‌تواند نشان‌گر تشکیل این فاز در محیط دفن بر اثر عوامل فرساینده از قبیل واکنش سولفات‌ها با کربنات کلسیم در حضور رطوبت باشد همچنین عملکرد میکروارگانیسم‌های خاک از جمله باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد S.O.B می‌تواند در ایجاد ترکیبات سولفات مؤثر بوده باشد (May, 2006: 220, 226).

جدول ۹ - نتایج تجزیه XRD نمونه PE1

نام ترکیب	فرمول شیمیایی	مقدار (نیمه کمی)	سیستم تبلور
Calcite	CaCO ₃	۲۳/۳	Hexagonal (Rh)
Quartz, syn	SiO ₂	۱۹/۴	Hexagonal
Microcline, ordered	KAlSi ₃ O ₈	۸/۷	Triclinic
Orthoclase	KAlSi ₃ O ₈	۸/۷	Monoclinic
Montmorillonite-14A	Na _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·xH ₂ O	۵/۸	
Anorthite, ordered	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	۵/۸	Triclinic
Sanidine	(K,Na)(Si ₃ Al)O ₈	۵/۵	Monoclinic
Magnetite	(Fe,Mg)(Al,Cr,Fe,Ti) ₂ O ₄	۵/۳	Cubic
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	۴/۷	Hexagonal (Rh)
Montmorillonite-chlorite	Na-Ca-Al-Si ₄ O ₁₀ -O	۳/۹	
Halloysite-10A	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ ·2H ₂ O	۳	Hexagonal
Chlorite	(Mg,Fe)5(Al,Si)5O ₁₀ (OH) ₈	۲/۷	Monoclinic
Albite, ordered	NaAlSi ₃ O ₈	۱/۵	Triclinic
Anhydrite, syn	CaSO ₄	۱/۵	Orthorhombic

شکل ۷- طیف XRD و فازها در لعاب فرسوده از نمونه تل آجری PE1



جدول ۱۰- نتایج XRD و فازهای تشکیل‌یافته لعاب فرسوده از نمونه تل آجری

نام ترکیب	فرمول شیمیایی	مقدار (نیمه کمی)	سیستم تبلور
Microcline, ordere	$KAlSi_3O_8$	۱۸/۲	Triclinic
Calcite, syn	$CaCO_3$	۱۶/۷	Hexagonal (Rh)
Anhydrite, syn	$CaSO_4$	۱۶/۷	Orthorhombic
Dolomite, ferroan	$Ca(Mg,Fe)(CO_3)_2$	۱۵/۲	Hexagonal (Rh)
Halloysite-7A	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	۱۵/۲	Hexagonal
Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$	۸/۷	Triclinic
Magnetite, syn	$FeFe_2O_4$	۴/۳	Cubic
Hematite, syn	Fe_2O_3	۳	Hexagonal (Rh)
Rutile, syn	TiO_2	۲	Tetragonal

نتیجه

بر اساس نتایج آزمایشات پرتو X، آجرهای لعاب‌دار تل آجری دارای لعاب قلیایی و بدنه‌های رسی می‌باشند که پس از قالب‌گیری و خشک‌شدن، لعاب بر روی بدنه‌های آجری اعمال شده و در کوره در حرارتی کمتر از $1000^{\circ}C$ پخت شده‌اند. نتایج تجزیه پلاسمای القایی جفت‌شده ICP (با دقت ppm) با شناسایی عناصر مس و کبالت به عنوان یون‌های رنگ‌ساز آبی، نشان داد که نمونه آجر لعاب‌دار به‌ظاهر سفید، دارای نقوش رنگی بوده است و با گذر زمانی طولانی و پیشرفت فرایندهای فرسایش در محیط غیرخنثی و مرطوب دفن، لعاب رنگ باخته و پودری شده است؛ در نمونه‌های زردرنگ، عناصر سرب و آنتیموان به عنوان عوامل رنگ‌ساز و در نمونه سفید شوش، آنتیموان و کلسیم گزارش شده است. مقایسه نتایج تجزیه عنصری لعاب‌های هخامنشی تل

آجری و کاخ آپادانا در شوش نشان از شباهت عناصر واسطه رنگ‌ساز به کاررفته در لعاب‌ها دارد. رطوبت باعث پیشرفت واکنش‌های فرسایشی از قبیل فرایند تعویض یونی و همچنین تبلور نمک‌ها در آجرهای لعاب‌دار می‌گردد که این نیز خود به آسیب‌های بیشتر لعاب و بدنه آجری منجر می‌گردد، بنابراین اولین گام در نگهداری این یادمان ارزشمند تاریخی ایجاد یک سقف حفاظتی مناسب و کنترل رطوبت است.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از مدیریت و کارشناسان محترم گروه مرمت و دفتر پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی و بنیاد پژوهشی پارسه و پاسارگاد، مسئولین کاوش‌های باستان‌شناسی محوطه تل آجری جناب آقای دکتر علیرضا عسکری چاوردی و جناب آقای دکتر پیر فرانچسکو کالیری، بانک سفال و کتابخانه تخت‌جمشید، مدیریت و کارشناسان محترم پایگاه میراث فرهنگی چغازنبیل و هفت‌تپه و موزه شوش و همچنین کارشناسان محترم دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی، سرکار خانم مهندس جوزانی کهن کارشناس آزمایشگاه اشعه X دانشکده فنی دانشگاه تهران، جناب آقای مهندس وارطان کارشناس آزمایشگاه اشعه X دانشگاه صنعتی امیرکبیر، جناب آقای مهندس رحمانی کارشناس آزمایشگاه SEM مرکز پژوهش متالورژی رازی، سرکار خانم مهندس امیرشکاری کارشناس آزمایشگاه SEM دانشگاه علم و صنعت ایران، جناب آقای مهندس شکوریان، مدیر عامل و سرکارخانم شهرجردی کارشناس شرکت مطالعات مواد معدنی زرآما که این پژوهش با همکاری صمیمانه ایشان به انجام رسید تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

- آجرهای رسی، ۱۳۶۲، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ سوم.
- آجررسی ویژگی و روش آزمون، تجدید نظر دوم، ۱۳۷۱، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ ششم.
- بریان؛ پیر، امپراطوری هخامنشی جلد اول، ۱۳۸۰، ترجمه ناهید فروغان، نشر و پژوهش فرزاد روز، نشر قطره.
- زارع؛ اعظم، ۱۳۸۳، بررسی زمین‌شناختی و هیدرولوژی محوطه میراث جهانی تخت‌جمشید، بنیاد پژوهشی پارسه - پاسارگاد.
- گیرشمن؛ رومن، ۱۳۷۳، زیگورات چغازنبیل، جلد اول، ترجمه اصغر کریمی، سازمان میراث فرهنگی کشور.
- گیرشمن؛ رومن، ۱۳۷۱، هنر ایران در دوران ماد و هخامنشی، ترجمه دکتر عیسی بهنام، مرکز انتشارات علمی و فرهنگی.
- عسکری چاوردی؛ علیرضا، کالیری، پیر فرانچسکو، ۱۳۹۰، نگرش یکپارچه چندرشته‌ای به تختگاه تخت‌جمشید و شهرپارسه، پژوهشگاه، پژوهشکده باستان‌شناسی، بنیاد پژوهشی پارسه - پاسارگاد، دانشگاه بولونیا، مؤسسه ایزمئو ایتالیا. (منتشر نشده).
- مورتگات؛ آنتوان، ۱۳۸۷، هنر بین‌النهرین باستان (هنر کلاسیک خاور نزدیک) مترجم انگلیسی: جودیت فیلسون مترجمان فارسی: زهرا باستی، دکتر محمدرحیم صراف، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت)
- وست؛ اسکوگ، داگلاس، ۱۳۷۶، مبانی شیمی تجزیه، جلد دوم، ترجمه: عبدالرضا سلاجقه، ابوالقاسم نجفی، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.
- ویسه؛ سهراب، ۱۳۷۳، آجر رسی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.
- هرتسفلد؛ ارنست، امیل، ۱۳۵۵، اتلال شهر پارسه (پرسپولیس)، ترجمه: مجتبی مینوی طهرانی، برلین.

Cardiano, Paola, 2004. Study and characterization of the ancient bricks of monastery of "San Fillipo di Frazzano (Sicily), *Analytica Chemica Acta*, 519: 103-111.

Caubet A. Kaczmarczyk A., 1998. Les briques glacées du palais Darius, *Techné: La science au service de l'histoire de l'art et des civilisations* No.7.

Cultrone Guiseppe, Sidraba Inese, Sebastina Eduardo, 2005. Mineralogical and physical characterization of the bricks used in the construction of the "Triangul Bastion" Riga (Latvia), *Applied clay science* 289: 297-308.

Eppler, Richard A. 1998. *Glazes and glass coatings* / by Richard A. Eppler and Douglas R. Eppler. The American Ceramic Society 735 Ceramic Place Westerville, Ohio USA.

Harper Oliver, Aruz Joan and Tallon Françoise, 1993. The Royal city of Susa: ancient Near Eastern treasure in the Louvre. *Metropolitan Museum* 223-225.

Holakooei, P. 2013. A Technological study of the Elamite polychrome Glazed Bricks at Susa, South-Western Iran. *Archaeometry*, DOI: 10.1111/arc.12030.

May, E. Jones, M.. 2006. *Conservation science heritage materials*, The Royal Society of Chemistry, UK.

Reade, J.E. 1963. A glazed panel from Nimrud, Iraq, Vol. 25.No.1, *British Institute for the Study of Iraq*.

Teutonico, J.M. 1988. *A laboratory manual for architectural conservators*, ICCROM, Rome.

White, William B. 1980. *Theory of corrosion of glass and ceramics*, Material Research Laboratory, Pennsylvania State University, 2-6.