مطالعه باستان‌سنجی و حفاظتی خشت‌های دوره آغاز ایلامی از تپه سفالین، پیشوا*

غلامرضا رحمانی[1*]، نیما نظافتی[2]، مرتضی حصاری[3]

۱. استادیار، پژوهشکده حفاظت و مرمت، پژوهشگاه میراث فرهنگی وگردشگری، تهران

r.rahmani@richt.ir*

۲. استاد، موزه معدن بوخوم آلمان

۳. استاد، پژوهشکده باستان‌شناسی، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲

تعداد صفحات: ۱۳

شناسه دیجیتال(doi): https://10.66224/kcr.8.4.79

فصلنامه علمی- پژوهشی دانش حفاظت و مرمت

شاپای الکترونیکی: ۶۲۱۷-۳۰۶۰

شاپای چاپی: ۶۰۹۳-۲۵۳۸

این نشریه از قوانین Cope پیروی می کند. دسترسی به این مقاله برای همگان آزاد است. هرگونه استفاده غیرتجاری از آن در صورت ارجاع مناسب، مجاز شناخته می شود.

چکیده

تپه سفالین در شمال شهر پیشوا، بر روی تپه‌های طبیعی این شهر که از لایه‌های هولوسن پیشین (آبرفت کهن‌تر از ۴۰۰۰ سال پیش) تشکیل شده‌اند، قرار دارد. کاوش در تپه سفالین در ادامه مطالعات باستان‌شناسی دشت ورامین-پیشوا به‌صورت منظم و پیوسته در چند سال اخیر به مدت هفت فصل انجام گشته است. مواد فرهنگی به‌دست‌آمده از تپه سفالین در شمال مرکز فلات ایران باعث افزایش اطلاعات ما درباره دوره آغاز نگارش، مابین ۳۵۰۰ تا ۲۸۰۰ پیش از میلاد، در حوزه فرهنگی شمال مرکز فلات ایران شده است. در فصل ششم و هفتم کاوش محوطه سفالین، فضاهای معماری از کارگاه شماره ۲۰ کاوش به‌دست آمد. این فضاها با کف قلوه‌سنگی، سکوی خشتی و معماری راست‌گوشه مستند شدند. براساس یافته‌های سفالی (ساده و منقوش)، گل‌مهر و گل‌نوشته شکسته، سکونت در مراحل مختلف دوره فرهنگی آغاز ایلامی مشخص گشت. این پژوهش به مطالعه فنی و آزمایشگاهی براساس روش آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) از بقایای معماری خشتی دوره آغاز ایلامی تپه سفالین و نیز مطالعات شیمیایی جهت ارائه راهکاری حفاظتی می‌پردازد. هدف از انجام این پژوهش، شناخت ساختاری خشت‌های این دوره با یک روش نیمه‌کمّی بوده است تا شناخت ما را از کانی‌شناسی خشت دوره آغاز ایلامی کامل‌تر نماید. این شناخت در خصوص حفاظت مطلوب این محوطه و نیز محوطه‌های خشتی هم‌افق کمک خواهد نمود.

کلیدواژه‌ها: باستان‌سنجی، حفاظت اشیا، آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)، خشت، آغاز ایلامی، تپه سفالین، مرکز فلات ایران

۱. مقدمه

تپه سفالین با وسعت امروزی حدود ۷ هکتار، در شمال شهر پیشوا، استان تهران، بر روی تپه‌های طبیعی این شهر قرار دارد که از لایه‌های هولوسن پیشین (با آبرفت‌های کهن‌تر از ۴۰۰۰ سال پیش) تشکیل شده‌اند (شکل ۱). یافته‌های فرهنگی به‌دست‌آمده از این تپه، باعث افزایش اطلاعات ما درباره دوره آغاز ایلامی در شمال مرکز فلات ایران شده است. شمال مرکز فلات ایران یکی از مناطق کلیدی در خصوص پژوهش دوره‌های مختلف فرهنگی کشور از دوره شکل‌گیری فرهنگ‌ها، به‌ویژه اولین استقرارگاه‌های دوره نوسنگی، تا مراحل مختلف دوره اسلامی است (حصاری و اکبری، ۱۴۰۰؛ حصاری و اکبری، ۱۳۹۹؛ حصاری و یوسفی‌زشک، ۱۳۸۸؛ Zahedi et al., 2024; Bernbeck et al., 2020). طی کاوش فصل‌های ۶ و ۷ از کارگاه ۲۰ تپه سفالین، مهم‌ترین یافته‌ها، فضاهایی با کف قلوه‌سنگی-خشتی از نوع معماری راست‌گوشه خشتی از دوره فرهنگی آغاز ایلامی بودند که مستند گردیدند.

یکی از راه‌های متعارف برای تشخیص وجود یا عدم وجود ارتباط میان جوامع فرهنگی در مناطق همجوار، مطالعه تطبیقی یافته‌های فرهنگی آن‌ها با یکدیگر است. در میان این یافته‌ها، سفال و خشت از جایگاه برجسته‌ای از دوره نوسنگی و بعد از آن برخوردارند. سفال و خشت‌های هر دوره به‌دلیل ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی خاص، در محوطه‌های

*این مقاله برآمده از طرح پژوهشی پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری و مجری طرح نویسنده اول است.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

باستانی یافت می‌شوند و از آنجایی که تولید و مصرف آن ها، به‌ویژه سفال، در فرهنگ‌های گذشته بسیار رایج بوده، تغییرات در آن ها، چه از نظر فنی و چه از نظر تزیینی و سبک‌شناختی، سریع‌تر از سایر آثار فرهنگی رخ داده است.

در کنار مقایسه و تطبیق گونه‌شناسی سفال، بررسی و مقایسه نوع خشت‌های به‌دست‌آمده از تپه سفالین با نمونه‌های محوطه‌های دیگری که در جغرافیای فرهنگی مورد مطالعه (دشت ورامین) واقع شده و توسط بررسی باستان‌شناسی مستند گشته‌اند (حصاری و همکاران، ۱۳۹۳)، می‌تواند بر مبنای مفهوم شباهت همسان (Homologous Similarity) در دوره آغاز ایلامی مورد ارزیابی قرار گیرد. در این خصوص، درک روش‌شناختی مطالعه تطبیقی، تعریف و تمرکز روی دو مفهوم شباهت همسان و شباهت ناهمسان که از مفاهیم مورد توجه در رویکرد باستان‌شناسی تطوری است، مدنظر بود (Lyman and O'Brien, 1998).

شباهت همسان به آن دسته از شباهت‌ها میان دست‌ساخته‌ها گفته می‌شود که حاصل ارتباط‌های تاریخی بوده و ریشه در یک سنت دارند؛ و شباهت‌های ناهمسان شامل آن دسته از شباهت‌ها است که حاصل شیوه‌های پاسخگویی مشابه به شرایط مشابه یا همان همگرایی تطوری (Evolutionary Convergence) است. در این مرحله از مطالعه، خشت‌های این دوره و نمونه‌هایی از خاک تپه توسط روش آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) و آنالیز شیمیایی مورد بررسی قرار گرفتند، تا در مرحله بعدی براساس شناخت ساختاری خشت‌ها، به چگونگی حفاظت چنین نمونه‌های سازه گلی در معماری دوره فرهنگی آغاز ایلامی ایران کمک گردد.

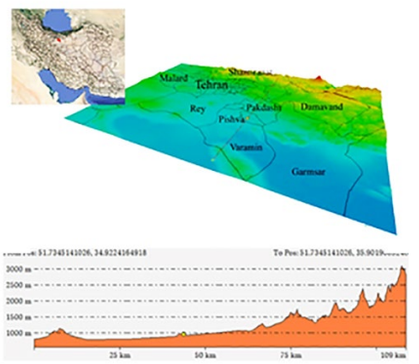
فلات مرکزی ایران نیز سرشار از ذخایر فلزی است (Roustaei, 2004). بر اساس شواهد و یافته‌های باستان‌شناسی، فلات ایران به دلیل غنای مواد اولیه، از خاستگاه‌های مهم متالورژی در جنوب غربی آسیا محسوب می‌گردد (Pigott, 2004, p. 28). مس احتمالاً اولین فلزی است که برای ساخت ابزارها و مصنوعات مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. اولین کاربرد مس برای استفاده به عنوان ابزار اولیه به حدود ۱۰ هزار سال پیش در خاور نزدیک و به ویژه فلات ایران بازمی‌گردد (Oudbashi et al., 2012). کشاورزان ساکن روستاها در دوره نوسنگی غرب ایران –حدود۴۰۰۰ تا۸۵۰۰ سال قبل از میلاد– مس خالص را به عنوان ماده‌ای متمایز شناختند و ابتدا آن را برای اهداف تزئینی جمع‌آوری کردند (Pigott, 2004, p. 28; Hole, 1987). نخستین و معروف‌ترین شواهد استفاده از مس برای ساخت یک اثر هنری در ایران مربوط به یک قطعه مهره مسی خالص است که در محوطه نوسنگی علی کش در جنوب غربی ایران و در دشت دهلران یافت شده است (Pigott, 2004, p. 28) و اخیراً به اواخر هزاره هشتم/ اوایل هزاره هفتم قبل از میلاد تاریخ‌گذاری شده است (Thornton, 2009; Hole, 2000). کاوش‌های اخیر باستان‌شناسی در تپه چمن لیلان در جنوب دریاچه ارومیه، منجر به کشف سه و نیم کیلو مس از یک قبر در سکونت‌گاهی از دوره نوسنگی با قدمت حدود ۹ هزار سال قبل شد (عابدی، ۱۴۰۲).

با ظهور دوره مس‌سنگی در هزاره پنجم قبل از میلاد، کشاورزان به نوعی بر هنر ذوب مس از سنگ معدن آن تسلط یافتند (Pigott, 2004, p.28). مرحله گذار از ذوب و استفاده از مس خالص به ذوب سنگ‌های معدن مس در هزاره پنجم قبل از میلاد انجام شد (Thornton et al., 2002). مواد معدنی حاوی Cu و As در مس خالص بسیار مهم هستند و این امر باعث تولید مس آرسنیکی (آلیاژ تصادفی) شد (Oudbashi et al., 2012). بنابراین آرسنیک در اولین مصنوعات مسی ذوب شده و حتی در اشیاء مسی خالص به عنوان عنصر آلیاژی یا ناخالصی تصادفی یافت شده است (Thornton, 2009). آلیاژ آرسنیک–مس عمدی، مرحله مهمی در گذار از مس ریخته‌گری شده به استفاده از آلیاژ قلع–مس بوده است. اولین تلاش برای ساخت یک آلیاژ ممکن است تولید آلیاژ مس–آرسنیک یا مس آرسنیکی در دوران پیش از تاریخ باشد (Thornton et al., 2002, p. 1452). آلیاژهای مس آرسنیکی در هزاره پنجم قبل از میلاد در فلات ایران استفاده می‌شدند و رایج‌ترین آلیاژ تا عصر آهن بودند (Thornton et al., 2002, p. 1452).

بررسی‌های متالورژیکی یافته‌های عصر آهن از تپه یحیی (Thornton et al., 2002)، گودین تپه (Frame, 2010)، دیلمان و مارلیک (Pigott, 1999, p. 91) نشان داده است که مس آرسنیکی همچنان در این دوره تولید می‌شد. دشت قزوین در بخش شمال غربی فلات مرکزی ایران به دلیل یافته‌های متالورژیکی پیش از تاریخی خود حائز اهمیت فراوان است؛ از جمله اشیاء فلزی، قالب‌ها، بوته‌ها و کارگاه‌های متالورژیکی مکشوفه از تپه قبرستان (اواخر مس‌سنگی، یا هزاره چهارم قبل از میلاد) نشان می‌دهد که این منطقه یکی از اولین مناطق ذوب مس در فلات ایران، و به تبع آن، در کل جنوب غربی آسیا بوده است (Pigott, 1999, p. 77; Pigott 2004, p. 37; Thornton, 2009, p. 312).

مجموعه ابزارهای فلزی از سگزآباد یکی از مهم‌ترین نمونه‌ها برای مطالعات باستان‌متالورژیکی عصر آهن در فلات ایران را تشکیل می‌دهد (Mortazavi et al., 2011). برخی از شواهد مربوط به یافته‌های اولیه مس در تپه زاغه (شمال مرکز ایران) و چغا سفید (غرب ایران) مشاهده شده است (Mortazavi et al., 2011). تجزیه و تحلیل این مصنوعات فلزی نشان داده است که همه آن ها از مس خالص با استفاده از عملیات حرارتی (آنیل کردن) روی فلز بین مراحل تغییر شکل مختلف به منظور جلوگیری از سخت شدن کار ساخته شده‌اند (Pernicka, 2004). یکی دیگر از محوطه‌های مهم در ذوب گسترده مس، محوطه تاریخی اریسمان نزدیکی کاشان در مرکز ایران است که در اواخر هزاره پنجم تا اوایل هزاره سوم قبل از میلاد رونق داشته است (Pernicka, 2004; Chegini, et al., 2004).

بررسی فنی و ساختاری خشت‌های آغاز ایلامی براساس مستندات در دسترس، تاکنون در ایران سابقه نداشته است؛ درحالی‌که لزوم انجام آن به‌ویژه در صورت احتمال تخریب انسانی و عوامل جوی، به‌منظور حفاظت از چنین نوع معماری در کشور احساس می‌شود. طی این پژوهش از طریق مطالعات آزمایشگاهی بر روی خشت‌های تپه سفالین، نخست به بررسی شاخص‌های ساختاری و شناخت فنی یافته‌های خشتی پرداخته شد؛ سپس براساس شناسایی ترکیب و فن‌شناسی خشت‌ها و نیز خاک به‌دست‌آمده از تپه، راهکاری علمی و عملی برای حفظ و نگهداری این یافته‌های معماری در عملیات‌های میدانی و حین کاوش‌های آینده تنظیم گردید.

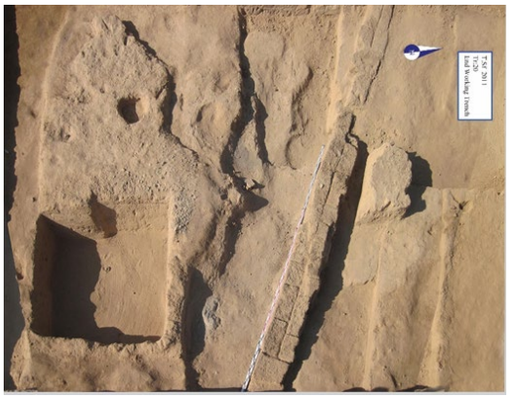


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی تپه سفالین، شهر پیشوا
Figure 1. The geographical location of the Ceramic Mound in Pishva City

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

۲. پیشینه پژوهش

برنامه کاوش‌های تپه سفالین از سال ۱۳۸۵ تاکنون در ۷ فصل انجام گردیده است. از مهم‌ترین یافته‌های این ۷ فصل که به منظور مطالعه جوامع آغاز ایلامی (از مرحله آغازین تا پیشرفته) در دشت ورامین- پیشوا در شمال مرکز فلات ایران انجام گردید، یافته‌های فرهنگی از دوره آغاز ایلامی است (حصاری، ۱۳۹۶ و Dahl et al., 2012) در فصل ششم و هفتم کاوش (نخستین فصل کاوش مشترک با دانشگاه برلین)، در کارگاه شماره ۲۰، فضاهای معماری یافت و مستند گردیدند (شکل ۲) که شامل کف قلوه‌سنگی (شکل ۳) و سکوی خشتی از نوع معماری راست‌گوشه خشتی بودند (شکل ۴).

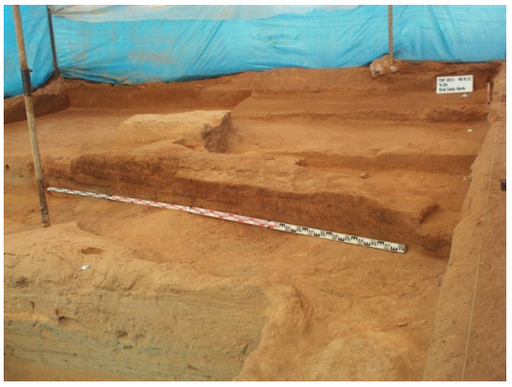


شکل ۲. فضای معماری کارگاه شماره ۲۰

Figure 2. Architectural remains uncovered in Trench 20

شکل ۳. فضای معماری با کف قلوه‌سنگی

Figure 3. Architectural space featuring a cobblestone floor



شکل ۴. فضای معماری کارگاه شماره ۲۰

Figure 4. Architectural remains uncovered in Trench 20

تاکنون راه‌حل‌های بسیاری برای تثبیت ساختارهای گلی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پیشنهاد شده‌اند، ولی هیچ‌یک از آن‌ها راه‌حل قطعی و بدون‌نقص دانسته نشده است. در نمونه‌هایی از منطقه ابوسیر مصر که با آنالیزهای جذب اتمی و XRD مورد آنالیز قرار گرفتند، نتیجه‌گیری شد که به‌کارگیری «تترااتوکسی‌سیلان» در مورد استحکام‌بخشی سطوح گلی موفقیت‌آمیز بوده است. این ماده خلل و فرج داخل مصالح را از بین نمی‌برد و نفوذپذیری را نیز برهم نمی‌زند (Sramek and Loses, 1999). البته به‌طور کلی یکی از مشکلات رزین‌های سنتتیک آن است که فرایند پلیمریزاسیون که بسیاری از خواص این رزین‌ها را باعث می‌شود، مولکول ماده را چنان بزرگ می‌سازد که بر حرکت آن‌ها در خلال حفرات ریز خاک درهم‌فشرده تأثیر می‌گذارد.

یکی دیگر از منومرهایی که در این مورد به‌کار گرفته شده است، «متیل‌متاکریلات» است که به‌وسیله بنزول‌پروکساید پلیمر می‌شود. در مورد برخی اکریلیک‌ها مشکل عمده، حلالیت در آب است. به‌کارگیری امولسیون این مواد در آب باعث می‌شود در رس در هنگام نفوذ، حالت خمیری ایجاد شود. این مسأله به‌خصوص در رس‌های غنی از مونت‌موریلونیت صحت دارد (Warren, 1999). از این رو به‌کارگیری حلال‌هایی از گروه الکل‌ها، کتون‌ها، گزیلن و تولوئن توجه مرمت‌گران را جلب کرده است. در انتخاب این رزین‌ها باید دقت بسیاری به مقاومت رزین در برابر عوامل جوی و شرایط محیطی سطح استحکام‌بخشی‌شده اعمال شود.

برخی دیگر از رزین‌ها از گروه سیلیکون‌ها و سیلان‌ها، مانند «متیل‌تری‌متو کسی‌سیلان»، «متیل‌تری‌اتوکسی‌سیلان» و «متیل‌تری‌تترااتوکسی‌سیلان» که در این مورد استفاده شده‌اند، مشکل پرکردن خلل و فرج و جلوگیری از تنفس بدنه را ندارند (Warren, 1999). « لاتکس» ۳ تا ۱۵ درصد نیز در استحکام‌بخشی خاک به‌کار رفته است. کاربرد موادی مانند پلی‌اولفین‌ها، اتیل و متیل‌اکریلات‌ها، بوتیل‌اکریلات‌ها و بوتیل‌متاکریلات‌ها، پلی‌اتوکسیل‌متانول، پلی‌وینیل‌الکل، پلی‌وینیل‌استات‌ها و پلی‌بوتیل‌متاکریلات‌ها نیز در مراحل اولیه تجربه‌اندوزی است. پلی‌وینیل‌الکل در خاک‌های ماسه‌ای باعث بالا رفتن چسبندگی خاک شده است، اما در حضور آب به‌طور کامل تخریب می‌شود.

بر روی ایزوسیانات‌ها نیز پژوهش‌هایی شده‌است. «هگزامتیلن‌دی‌ایزوسیانات»، «دی‌فنیل‌متان‌دی‌ایزوسیانات» و «دی‌سیکلوهگزیل‌متان‌دی‌ایزوسیانات» از این گروه هستند. دیگر رزین استفاده‌شده «فرفوریل‌الکل» (یک رزین سمی بر پایه فرفورال) است. این رزین مقاومت مکانیکی خاک را هم در حالت خشک و هم در حالت تر ارتقاء می‌دهد و از نفوذ آب جلوگیری می کند. (Houben and Guilud, 1994). از رزین‌های فرمالدئیدی نیز استفاده شده که بیشتر ضدآب‌کننده هستند. «فنول‌فرمالدئید» نتایج راضی‌کننده‌ای داشته است. ملامین‌فرمالدئید در حالت خشک مقاومت خاک را بالا می‌برد، اما در حالت تر تا ۵۰ درصد پایین می‌آورد (Houben and Guilud, 1994).

مشکل دیگر در مورد رزین‌هایی که با تبخیر حلال از سطح عمل می‌کنند و به‌خصوص حلال‌های فرار دارند، عمق نفوذ اندک استحکام‌بخشی است و این‌که در این مورد مشکل تشکیل قشر وجود دارد. مشکل زمانی شکل می‌گیرد که یک لایه ضعیف استحکام‌نیافته با یک لایه غنی از ماده استحکام‌بخش در کنار هم قرار می‌گیرد. کیفیات دمایی و رطوبتی دو لایه با هم متفاوت است و یک مرز تنش و قطع بین آن‌ها به‌وجود می‌آید. فشار بخار آب نیز امکان دارد پشت لایه استحکام‌بخشی‌شده ایجاد مشکل نماید. شیوه اجرای استحکام‌بخشی، دمای هوا در زمان به‌کارگیری استحکام‌بخش، درصد حلال و نوع حلال در این مورد بسیار مؤثر است. «دی‌متیلول‌اوره» بهترین نتایج را در بین رزین‌های برپایه اوره داده است، اما هنوز در حالت

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

تر مقاومت ندارد.
از نمک‌ها نیز برای استحکام‌بخشی استفاده شده است. از کلرید سدیم، کلرید کلسیم به‌عنوان مواد مؤثر در خواص ضدآب‌کنندگی و کلرید آلومینیم به‌عنوان استحکام‌بخش الکتروشیمیایی در منابع نام برده شده است. از این مواد در خاک‌های غیرنمکی استفاده می‌شود. سیلیکات سدیم تا ۵٪ در بهبود خاک‌هایی که چسبندگی کم دارند مؤثر بوده است، البته خواص ضدآب‌کنندگی نیز دارد. گچ یا سولفات کلسیم در خاک‌های غیررسی به‌عنوان چسباننده کمکی استفاده شده است، البته در مقدار کمتر از ۱۵٪ این ماده هیچ تأثیری در مقاومت ملات ندارد.
آهک از دهه ۱۹۲۰ در آمریکا به‌عنوان استحکام‌بخش خاک در راه‌سازی استفاده می‌شود. آهک تأثیر خود را در مقاومت فشاری و کششی و همچنین کاستن از انقباض خاک نشان داده است. اما درصد آهک بسته به خاک هر منطقه بسیار متفاوت است و باید با آزمایش‌های دقیق به‌دست آید. بسیاری از مواد دیگر نیز وجود دارند که در راه‌سازی یا صنایع نظامی برای ساختن باند یا مکان فرود هلیکوپتر در بیابان‌ها در هنگام جنگ استفاده می‌شوند. بسیاری از این مواد در بدنه‌ها به سرعت خواص خود را از دست می‌دهند. این مواد فرمول مشخصی ندارند و توسط شرکت‌ها به‌صورت محلول‌های تجاری عرضه می‌شوند (Houben and Guilud, 1994).

۳. مواد و روش‌ها

۳. ۱. نمونه‌برداری از خشت‌ها و مصالح گلی

نمونه‌برداری از آثار و بقایای تاریخی فرهنگی اقدامی کارا و مؤثر است که امکان به‌سرانجام رساندن پژوهش‌های علمی را فراهم می‌سازد و به پژوهشگران این فرصت را می‌دهد تا فرضیات و گزاره‌های علمی خود را مورد ارزیابی و آزمون قرار دهند و از نتایج آن برای بهبود حفاظت از میراث تاریخی بهره ببرند. رویکرد پژوهشی علمی و کمّی کارآمد در زمینه تحقیقات علوم میراث فرهنگی دهه‌های اخیر ایران، به‌دلیل میان‌رشته‌ای بودن و کثرت موضوعات و توسعه و پیشرفت‌های حاصل در علوم مختلف، به سمت استفاده از دانش مستقر در رشته‌های فنی و مهندسی مختلف ذیل گرایش‌های باستان‌سنجی حرکت می‌کند (رازانی و اقوی، ۱۴۰۳). تحلیل‌های باستان‌سنجی مواد فرهنگی و باستان‌شناختی عمدتاً وابستگی زیادی به نمونه‌برداری، انتخاب فنون و روش‌های آزمایشگاهی، زمان و هزینه‌های تحلیل‌های آزمایشگاهی و پردازش و تفسیر داده‌ها دارند (Artioli, 2010: 15). بدون نمونه‌برداری دقیق، داده‌های باستان‌سنجی ارزش علمی کمی خواهند داشت. نمونه‌برداری صحیح، به اندازه دقت ابزارها اهمیت دارد و این موضوع برای تمام مواد فرهنگی و باستان‌شناسی (اعم از معدنی و آلی) صدق می‌کند (Shackley, 1998).
در این پژوهش، بررسی مقدماتی بر روی نمونه‌های سازه‌های گلی به‌دست‌آمده از ششمین و هفتمین فصل کاوش تپه سفالین انجام گردید. با توجه به تنوع مصالح گلی موجود در کارگاه شماره ۲۰، گام نخست نمونه‌برداری با هدف انتخاب نمونه‌های معرف از طریق مطالعه فضاهای معماری و تعیین انواع مصالح به‌کار رفته انجام شد. بر این اساس، ۴ نمونه با ویژگی‌های ماکروسکوپی متمایز انتخاب شدند که شامل: بخش داخلی یک قطعه خشتی، نمونه‌ای از سطح یک خشت، یک نمونه از دیواره تنور و یک نمونه از ملات گلی مابین خشت‌ها بودند. خشت‌های مورد بررسی ابعادی در حدود ۳۰ در ۱۰ و ۳۵ در ۱۰ سانتی‌متر داشتند که از نوع معماری راست‌گوشه خشتی بودند. هدف از این انتخاب، انعکاس تنوع ساختاری و ترکیبی مصالح گلی برای انجام مطالعات کانی‌شناسی و شیمیایی بود.
تاریخ‌گذاری دوره آغاز ایلامی کارگاه شماره ۲۰، مکانی که نمونه‌های مورد پژوهش این مقاله انتخاب شده بودند، طی روش سن‌سنجی مطلق کربن ۱۴ بر روی نمونه شماره Poz-103643، با تاریخی حد بالا و پایین مابین ۳۳۳۵ و ۳۱۰۲ سال پیش از میلاد تأیید گردید. تاریخ حدواسط این کارگاه ۳۲۳۴ پیش از میلاد است (Hessari et al., 2021: 62-67). علاوه بر این، دو نمونه از خاک کارگاه‌های ۱ و ۲ نیز برای تعیین شاخص‌های شیمیایی و خاک‌شناسی برداشت شد. دو نمونه دیگر از خاک تپه سفالین و یک نمونه خاک از تپه معین‌آباد نیز جهت مطالعات مقایسه‌ای جمع‌آوری گردیدند. در نهایت، نمونه‌ها با دقت کدگذاری و ثبت شدند و برای آنالیزهای آزمایشگاهی به مراکز مربوطه ارسال گردیدند.

۳. ۲. روش‌شناسی و تجهیزات آزمایشگاهی

۳. ۲. ۱. آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD)

نمونه‌های برداشت‌شده توسط روش پراش پرتو ایکس در آزمایشگاه اشعه ایکس دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تهران، با استفاده از دستگاه Bruker AXS مدل Advance-D8 برای تشخیص کانی‌ها و فازهای کانیایی متشکله مورد آزمایش قرار گرفتند. این روش به‌دلیل دقت بالا و توانایی شناسایی دقیق ساختار بلوری کانی‌ها، امکان تعیین ترکیب کانی‌شناسی مصالح گلی را فراهم می‌کند. مطابق توضیح آزمایشگاه، نوع رس، میکا، فلدسپات قلیایی و پلاژیوکلاز به‌طور دقیق قابل شناسایی نبوده است؛ بنابراین نام این کانی‌ها، نشان‌دهنده گروه مربوطه است و الزاماً نشان‌دهنده نام زیرگروه دقیق کانی نیست.

۳. ۲. ۲. آنالیزهای شیمیایی و خاک‌شناسی

دو نمونه از خاک کارگاه‌های ۱ و ۲ جهت تعیین شاخص‌های شیمیایی و خاک‌شناسی در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی فرهنگی مورد آزمایش قرار گرفتند. این آنالیزها شامل تعیین pH، هدایت الکتریکی، درصد مواد آلی، بافت خاک و سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی بود. همچنین، دو نمونه دیگر از خاک تپه سفالین و یک نمونه خاک از تپه معین‌آباد توسط روش‌های XRD و XRF در بنیاد علوم کاربردی رازی تهران مورد آنالیز قرار گرفتند تا ترکیب کانی‌شناسی و عنصری خاک محوطه تعیین شود. این داده‌ها برای درک بهتر منشأ مواد اولیه به‌کار رفته در ساخت خشت‌ها و نیز طراحی راهکارهای حفاظتی مناسب ضروری بود.

۴. نتایج

۴. ۱. نمونه‌های سازه گلی تپه سفالین

نمونه‌های انتخابی جهت مطالعه و ارسال به آزمایشگاه، شامل نمونه خشت (N1B) از کارگاه ۲۰، بستر (لوکوس) شماره ۲۰۰۱ (تصویر ۵)؛ دیواره خشتی از بخش دیوار خشتی (N1D) بستر ۲۰۰۱، کارگاه ۲۰ (تصویر ۶)؛ ملات مابین خشت‌ها (N1M) از بستر ۲۰۰۱ (تصویر ۷) و نمونه دیواره تنور (N1T) از بستر ۲۰۱۷ الف، کارگاه ۲۰ بودند (تصویر ۸). نتایج آزمایش چهار نمونه مذکور در ادامه ارائه شده است.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

شکل ۵. فضای معماری کارگاه شماره ۲۰
Figure 5. Architectural remains uncovered in Trench 20

شکل ۷. نمونه ملات میان خشت‌ها، کارگاه ۲۰
Figure 7. Mortar sample between mudbricks, Trench 20

شکل ۶. نمونه خشت از دیواره کارگاه ۲۰
Figure 6. Mudbrick sample from the wall of Trench 20

شکل ۸. نمونه دیواره تنور، بستر ۲۰۱۷ الف، کارگاه ۲۰
Figure 8. Sample from the wall of a tannur oven, Context 2017A, Trench 20

جدول ۱. نمونه خشت NIB و بافت‌های درون خشت مربوط به دوره آغاز ایلامی
Table 1. NIB mudbrick sample showing internal fabric characteristics from the Early Elamite period

شماره کارت	نام فاز/کانی	فرمول شیمیایی	درصد نیمه‌کمّی	سیستم تبلور
33-0311 ()	Gypsum, syn	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	23.4	Monoclinic
46-1045 ()	Quartz, syn	SiO_2	19.5	Hexagonal
43-0685 (I)	Illite2- [TM RG2	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	19.2	Monoclinic
05-0586 ()	Calcite, syn	$CaCO_3$	15.2	(Hexagonal (Rh

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

جدول ۱. نمونه خشت NIB و بافت‌های درون خشت مربوط به دوره آغاز ایلامی
Table 1. NIB mudbrick sample showing internal fabric characteristics from the Early Elamite period

شماره کارت	نام فاز/کانی	فرمول شیمیایی	درصد نیمه‌کمّی	سیستم تبلور
33-0310 (D)	Bassanite, syn	$CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$	9.8	Orthorhombic
25-0618 ()	Sanidine, disordered	$K(Si_3Al)O_8$	4.1	Monoclinic
19-1184 (I)	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$	2.6	Triclinic
07-0027 (D)	Montmorillonite-chlorite	$Na\text{-}Ca\text{-}Al\text{-}Si_4O_{10}\text{-}O$	2.6	-
26-0920 (D)	Sylvite, sodian, syn	$K_{0.6}Na_{0.4}Cl$	2.3	Cubic
07-0330 (D)	Illite-Montmorillonite, regular	$K\text{-}Al_4(SiAl)_8O_{20}(OH)_4 \cdot xH_2O$	1.2	-

N1B: ماده اولیه تشکیل‌دهنده این نمونه احتمالاً ترکیبی از ژیپس(و باسانیت)، ماسه کوارتز–فلدسپاتی، کلسیت و رس بوده که حاوی مقدار کمی نمک بوده است. وجود سیلویت می‌تواند نتیجه عوامل محیطی در طی زمان بوده باشد یا این‌که مقداری نمک در مواد اولیه مورد استفاده موجود بوده یا اضافه شده باشد. بر اساس ترکیب کانی‌شناسی نمونه، می‌توان نتیجه گرفت که در تهیه این خشت عمدتاً از ترکیبی از گچ، ماسه، آهک و کمی رس استفاده شده و مصالح تولیدشده حرارت بیرونی خاصی ندیده است.

N1D: این نمونه ماهیت سیلیکاته–آهکی دارد که ماده اولیه آن علاوه بر ماسه ریز کوارتزی و تا حدودی فلدسپاتی شامل کلسیت، کمی ژیپس، کمی رس و کانی های ورقه ای (مانند فلوگوپیت و ورمیکولیت) بوده است. وجود هماتیت احتمالا مربوط به حضور کانی های رسی است. وجود نمک (سیلویت) می تواند نتیجه عوامل محیطی در طی زمان بوده باشد یا اینکه مقداری نمک در مواد اولیه ی مورد استفاده موجود بوده یا اضافه شده باشد. بر اساس ترکیب کانی‌شناسی، می‌توان نتیجه گرفت که ماده اولیه متشکله این نمونه عمدتاً شامل ترکیبی از شن و ماسه، آهک، کمی رس و گچ و نیز کانی‌های ورقه‌ای بوده است. در این زمینه، وجود کانی کریستوبالیت در نمونه جالب‌توجه است. کریستوبالیت پلی‌مورفی از کوارتز است که به‌طور طبیعی در سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری و خاک‌های منتج از آن ها دیده می‌شود، ولی در سایر خاک‌ها کمیاب است. (Drees et al., 1989; Cronin et al., 1996; Sommer et al., 2006; Gutiérrez-Castorena and Effland, 2010) این‌که آیا کریستوبالیت در خاک اولیه وجود داشته یا بعد از قالب‌گیری در خشت ایجاد شده، از روی نتایج این آزمایشات قابل تشخیص نمی‌باشد. به‌هرحال، عدم وجود کریستوبالیت در نمونه N1B که از درون خشت بوده، این ظن را به‌وجود می‌آورد که کریستوبالیت بعداً در سطح خشت ایجاد شده باشد که در این‌صورت می‌تواند نشان‌دهنده تحمل یک فاز حرارتی بر روی سطح خشت بوده باشد. ولی از سوی دیگر، می‌دانیم که کریستوبالیت در دماهای بین ۱۰۵۰ تا ۱۳۵۰ درجه سانتی‌گراد ایجاد می‌شود (Gualtieri and Bertolani, 1992)، درحالی‌که کلسیت معمولاً تا دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد پایدار است (Peters and Iberg, 1978; Maggetti, 1982; Pavia, 2006). به این ترتیب وجود هر دوی این کانی‌ها در نمونه، ممکن است نشان‌دهنده عدم اعمال حرارت بر روی خشت و نتیجتاً بیانگر وجود کریستوبالیت در خاک اولیه بوده باشد. به‌هرحال، مطابق نقشه زمین‌شناسی تهران (Haghi Pour, 1986)، بخشی از سنگ‌های اطراف منطقه پیشوا از نوع سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری هستند که ممکن است حاوی کریستوبالیت بوده و در تشکیل خاک‌های منطقه مؤثر بوده باشند. احتمال دارد که کانی‌های ورقه‌ای (فلوگوپیت و ورمیکولیت) به جهت ایجاد ظاهری اکلیلی و درخشنده، عمداً به سطح محصول نهایی اضافه شده باشند. ژیپس، کمی رس و کانی‌های ورقه‌ای (مانند فلوگوپیت و ورمیکولیت) بوده است. وجود هماتیت احتمالاً مربوط به حضور کانی‌های رسی است. وجود نمک (سیلویت) می‌تواند نتیجه عوامل محیطی در طی زمان بوده باشد یا این‌که مقداری نمک در مواد اولیه مورد استفاده موجود بوده یا اضافه شده باشد.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

جدول ۲. نمونه خشت از دیوار خشتی (NID)
Table 2. Mudbrick sample collected from the adobe wall (NID)

شماره کارت	نام فاز/کانی	فرمول شیمیایی	درصد نیمه‌کمّی	سیستم تبلور
46-1045 ()	Quartz, syn	SiO_2	26.5	Hexagonal
39-1425 ()	Cristobalite, syn	SiO_2	21.5	Tetragonal
05-0586 ()	Calcite, syn	$CaCO_3$	13.5	Hexagonal (Rh)
26-0920 (D)	Sylvite, sodian, syn	$K_{0.6}Na_{0.4}Cl$	8.6	Cubic
16-0352 (I)	Phlogopite3- ITT RG, syn	$KMg_3(Si_3AlO_{10})F_2$	7.4	Hexagonal
19-1184 (I)	Albite, ordered	$NaAlSi_3O_8$	4.5	Triclinic
36-0432 (D)	Gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	5.1	Monoclinic
19-0926 ()	Microcline, ordered	$KAlSi_3O_8$	4.5	Triclinic
34-0166 (D)	Vermiculite2- ITM RG	$(Mg,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	3.4	Monoclinic
02-0009 (D)	Montmorillonite	$Si_{3.74}Al_{2.0.3}Fe_{0.03}Mg_{0.02} \cdot O_{11}$	2.2	-
02-0028 (D)	Chlorite	$(Mg,Fe)_5(Al,Si)_5O_{10}(OH)_8$	2	Monoclinic
33-0664 ()	Hematite, syn	Fe_2O_3	0.8	Hexagonal (Rh)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

نمونه ملات گلی N1M: ماده اولیه تشکیل‌دهنده این نمونه احتمالاً ترکیبی از ماسه کوارتز–فلدسپاتی، گچ و آهک و کمی رس بوده است. وجود گوتیت نشان‌دهنده وجود مقداری اکسید آهن در نمونه است که می‌تواند جز ترکیبات اولیه خاک بوده یا این‌که حاصل اضافه‌کردن عمدی رنگدانه به خاک مورد استفاده بوده باشد. مصالح تولیدشده حرارت بیرونی خاصی ندیده‌اند.

نمونه دیواره تنور N1T: ماده اولیه تشکیل‌دهنده این نمونه احتمالاً ترکیبی از گچ، ماسه فلدسپاتی–کوارتزی، آهک و کمی رس بوده است. وجود هماتیت احتمالاً نشان‌دهنده وجود مقداری اکسید آهن در نمونه است که می‌تواند جز ترکیبات اولیه خاک بوده یا این‌که حاصل اضافه‌کردن عمدی رنگدانه به خاک مورد استفاده بوده باشد. مقدار کمی تالک هم در نمونه موجود است. براساس ترکیب کانی‌شناسی، همانند نمونه N1D، وجود کریستوبالیت می‌تواند مرتبط با ترکیب ماسه اولیه و یا مرتبط با اعمال حرارت بوده باشد.

جدول ۳. نمونه ملات گلی (NIM)
Table 3. Earthen (mud) mortar sample (NIM)

سیستم تبلور	درصد نیمه‌کمّی	فرمول شیمیایی	نام فاز/کانی	شماره کارت
Hexagonal	28.7	SiO_2	Quartz, syn	46-1045 ()
Monoclinic	17.9	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	Illite-2 ITM RG2	43-0685 (I)
Monoclinic	15.7	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Gypsum	36-0432 (D)
Hexagonal (Rh)	12.6	$CaCO_3$	Calcite, syn	05-0586 ()
Triclinic	9.9	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$	Albite, calcian, ordered	41-1480 (I)
-	4.2	$Na\text{-}Ca\text{-}Al\text{-}Si_4O_{10}\text{-}O$	Montmorillonite-chlorite	07-0027 (D)
Triclinic	3.7	$KAlSi_3O_8$	Microcline, ordered	19-0926 ()
Monoclinic	2.2	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Kaolinite 1Md	06-0221 (D)
Monoclinic	2.1	$(Mg,Fe)_5(Al,Si)_5O_{10}(OH)_8$	Chlorite	02-0028 (D)
Hexagonal	1.6	$Ca_{0.2}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$	Montmorillonite-15A	13-0135 (N)
-	1.5	$FeO(OH)$	Goethite	03-0251 (D)

جدول ۴. نمونه دیواره تنور (NIT)
Table 4. Sample from the wall of a tannur oven (NIT)

سیستم تبلور	درصد نیمه‌کمّی	فرمول شیمیایی	نام فاز/کانی	شماره کارت
Monoclinic	34.7	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Gypsum	06-0046 (D)
Triclinic	19.5	$CaAl_2Si_2O_8$	Anorthite, ordered	41-1486 ()
Hexagonal	16.8	SiO_2	Quartz, syn	46-1045 ()
Hexagonal (Rh)	16.3	$CaCO_3$	Calcite, syn	05-0586 ()
Tetragonal	3.6	SiO_2	Cristobalite, syn	39-1425 ()
Monoclinic	3.5	$K(Si_3Al)O_8$	Sanidine, disordered	25-0618 ()
-	2.1	$K(AlFe)_2AlSi_3O_{10}(OH)_2 \cdot H_2O$	Illite	15-0603 (D)
Monoclinic	1.6	$(Mg,Fe)_5(Al,Si)_5O_{10}(OH)_8$	Chlorite	02-0028 (D)
-	1	$beta\text{-}Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	Talc	10-0403 (D)
Rhombohedral	1	Fe_2O_3	Hematite, syn	13-0534 (D)

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

۴. ۲. نتایج عنصری از خاک سطحی و کاوش

هفت نمونه خاک در زمان کاوش از عمق ۵/۱ متری کارگاه‌های ۱ و ۲ تپه سفالین، دو نمونه خاک سطحی تپه سفالین و نیز یک نمونه خاک از تپه معین‌آباد، جهت شناخت خصوصیات خاک‌شناسی و تعیین عناصر خاک منطقه پیشوا انتخاب شدند. در ادامه، نتایج حاصل از نمونه‌های خاک ارائه شده است (جداول ۲ تا ۴).

خاک منطقه پیشوا از نظر زراعی جزء خاک‌های آهکی طبقه‌بندی می‌شود و به دلیل گرم و خشک بودن منطقه جزء خاک‌های شور ارزیابی می‌گردند. بنابراین این خاک‌ها برای کشت گیاهانی مناسب بوده‌اند که تا حدودی نسبت به خشکی و شوری مقاومت بالایی داشته باشند (رفیعی‌امام و زهتابیان، ۱۳۸۵: ۲۹۲-۲۹۴). در بخش نمونه‌های خاک کارگاه‌های کاوش البته فسفر قابل‌جذب این خاک‌ها به‌طور غیرطبیعی بالاست (جدول ۲ و ۳) که می‌تواند ناشی از تجزیه بقایای جانوری و انسانی با خاک ارسالی به آزمایشگاه باشد. پتاسیم قابل‌جذب خاک هم از مقادیر فعلی بسیار بالاتر است و این حالت می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که به مرور زمان پتاسیم خاک‌ها که در عمق باشند، متأثر از سیل و رسوب باشد (مهدوی و دیگران، ۱۳۹۵: ۷۰).

pH خاک‌ها بین ۷/۷ تا ۹/۷ بوده (جدول ۲) که بر این اساس جزء خاک‌های قلیایی طبقه‌بندی می‌شوند. از نظر میکروالمنت‌های (ریزمغذی‌های) موجود در خاک هم می‌توان اظهار نمود که میزان مس و روی قابل‌جذب، زیاد بوده است و از این نظر خاک‌ها غنی هستند، اما از نظر آهن قابل‌جذب، خاک‌ها فقیر بوده و میزان منگنز نیز در حد واسط خاک‌های فقیر و غنی قرار دارد. بافت خاک نسبتاً سنگین بوده و جزء خاک‌های رسی لومی است. با توجه به مجموع خصوصیات خاک منطقه، به‌نظر می‌رسد گیاهانی نظیر گندم و جو و برخی حبوبات در منطقه کشت می‌شده است (جدول ۴).

بررسی یک نمونه خاک از تپه معین‌آباد و دو نمونه از سطح تپه سفالین توسط روش‌های XRF و XRD نیز نشان می‌دهد که این خاک‌ها عمدتاً ماهیت ماسه‌ای-گچی-آهکی و تا حدودی رسی دارند که با نتایج حاصل از بررسی نمونه‌های خشتی هم‌خوانی نسبی جالبی دارد (جدول ۵).

جدول ۵. مشخصات هفت نمونه خاک از کارگاه‌های ۱ و ۲ تپه سفالین

Table 5. Physical and compositional characteristics of seven soil samples collected from Trenches 1 and 2 at the Sofalin Mound

مشخصات نمونه Descript شماره آزمایشگاه Lab. No	هدایت الکتریکی ds/m (شوری)	قدرت جذب آب	واکنش گل اشباع PH	مواد خنثی شونده (آهک)٪	کربن آلی OC ٪	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	Fe آهن	Zn روی	Cu مس	Mn منگنز
TR1 T. S. F 08 LN 106 RN 1022	۱۴	۴۰	۷/۸	۱۸/۵	۰/۱۴	۸۰	۳۸۰۰	۳	۱/۰۲	۱/۶	۷/۷
TR1 T. S. F 08 LN 102 RN 1091	۲۲/۱	۳۸	۷/۷	۱۸/۵	۱/۱۲	۸۵/۴	۳۰۰۰	۲/۵	۱/۲	۱/۵	۷/۶
TR1 T. S. F 08 LN 105 RN 1040	۲۱/۳	۳۹	۷/۹	۱۶/۵	۰/۴	۵۶/۲	۱۹۰۰	۲/۸	۱/۸	۱/۷	۸/۸
TR2 T. S. F 08 LN 211 RN 2218	۳۲	۴۴	۷/۷	۱۵/۵	۰/۴۵	۷۲/۸	۲۷۰۰	۳/۶	۱/۹	۰/۹۹	۶/۵
TR2 T. S. F 08 LN 204 RN 2065	۳۹	۴۰	۷/۹	۱۸	۱/۳۲	۴۸/۶	۳۳..	۴/۳	۱/۶	۰/۸۷	۷/۴
TR2 T. S. F 08 LN 210 RN 2217	۱۱/۴۳	۳۸	۷/۹	۱۸/۵	۰/۳۴	۷۲/۶	۲۱۰۰	۴/۲	۱/۲۲	۰/۵۶	۶/۶
TR2 T. S. F 08 LN 207 RN 2175	۲۳/۳	۴۱	۷/۸	۱۷	۱/۶۹	۸۴/۶	۲۸۰۰	۳/۲	۶/۸	۰/۱۶	۸/۲

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

جدول ۶. مشخصات هفت نمونه خاک از کارگاه‌های ۱ و ۲ تپه سفالین
Table 6. Physical and compositional characteristics of seven soil samples collected from Trenches 1 and 2 at the Sofalin Mound

مشخصات نمونه Descript شماره آزمایشگاه Lab. No	هدایت الکتریکی (شوری) ds/m	قدرت جذب آب درصد	PH واکنش گل اشباع	مواد خنثی شونده ٪(اهک)	کربن آلی ٪ O. C	٪ازت کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	٪شن	٪لای	٪رس	بافت
TR1 T. S. F 08 LN 106 RN 1022	۱۴	۴۰	۷/۸	۱۸/۵	۰/۱۴	۰/۰۱۸	۸۰	۳۸۰۰	۳۵	۲۹	۳۶	CL
TR1 T. S. F 08 LN 102 RN 1091	۲۲/۱	۳۸	۷/۷	۱۸/۵	۱/۱۲	۰/۰۹۹	۸۵/۴	۳۰۰۰	۳۸	۳۰	۳۲	CL
TR1 T. S. F 08 LN 105 RN 1040	۲۱/۳	۳۹	۷/۹	۱۶/۵	۰/۴	۰/۰۴۳	۵۶/۲	۱۹۰۰	۳۷	۳۰	۳۳	CL
TR2 T. S. F 08 LN 211 RN 2218	۳۲	۴۴	۷/۷	۱۵/۵	۰/۴۵	۰/۰۴۸	۷۲/۸	۲۷۰۰	۳۶	۲۸	۳۶	CL
TR2 T. S. F 08 LN 204 RN 2065	۳۹	۴۰	۷/۹	۱۸	۱/۳۲	۰/۱۱۳	۴۸/۶	۳۳۰۰	۳۵	۳۱	۳۴	CL
TR2 T. S. F 08 LN 210 RN 2217	۱۱/۴۳	۳۸	۷/۹	۱۸/۵	۰/۳۴	۰/۰۳۷	۷۲/۶	۲۱۰۰	۳۷	۳۱	۳۲	CL
TR2 T. S. F 08 LN 207 RN 2175	۲۳/۳	۴۱	۷/۸	۱۷	۱/۶۹	۰/۱۴۵	۸۴/۶	۲۸۰۰	۳۶	۳۰	۳۴	CL

جدول ۷. ویژگی‌های خاک منطقه در وضعیت کنونی
Table 7. Present-day properties of the regional soil

عمق (Cm)	هدایت الکتریکی	pH	کربن آلی	ازت کل	فسفر قابل جذب (ppm)	پتاسیم قابل جذب (ppm)	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	بافت
۰-۴	۳/۹۱	۷/۲	۰/۷۱	۰/۰۵۹	۱۴/۶۸	۳۵۴	۲۵	۳۵	۳۳	لوم رسی

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

جدول ۸. نتایج آنالیز عنصری (بر حسب درصد وزنی) و کانی‌شناسی نمونه خاک سطحی از تپه معین‌آباد و تپه سفالین
Table 8. Elemental analysis results (weight percent) and mineralogical composition of surface soil samples collected from the Moeinabad and Sofalin mounds

Element/Sample	Moiin Abad	Sofalin 1	Sofalin 2	Element/Sample	Moiin Abad	Sofalin 1	Sofalin 2
Na_2O	0.5	0.4	0.1	V_2O_5	<0.1	<0.1	<0.1
MgO	4.1	5.3	4.4	Cl	<0.1	<0.1	0.2
Al_2O_3	10	7.7	11	NiO	<0.1	<0.1	<0.1
SiO_2	45.9	32.7	44.2	CuO	<0.1	<0.1	<0.1
P_2O_5	0.1	<0.1	<0.1	ZnO	<0.1	<0.1	<0.1
K_2O	1.9	1.3	1.9	As_2O_3	<0.1	<0.1	<0.1
CaO	12.9	13.6	13.6	SrO	<0.1	<0.1	<0.1
Fe_2O_3	4.4	3.4	5.5	ZrO_2	<0.1	<0.1	<0.1
MnO_2	0.1	<0.1	<0.1	BaO	0.1	<0.1	<0.1
TiO_2	0.5	0.4	0.6	PbO	<0.1	<0.1	<0.1
SO_3	5.4	20.6	3.5	LOI	14.1	14.6	14.1

Moiin Abad	Quartz, calcite, gypsum, anorthite, phlogopite, palygorskyte, illite, clinochlore, dolomite
Sofalin 1	Gypsum, quartz, phlogopite, calcite, illite, dolomite, palygorskyte, clinochlore, anorthite
Sofalin 2	Quartz, calcite, gypsum, anorthite, palygorskite, illite, phlogopite, clinochlore

۵. بحث، پیشنهاد حفاظتی و جمع‌بندی

پیداشدن فضای معماری آغاز ایلامی در کارگاه ۲۰ تپه سفالین، یافته پراهمیتی است که دانش ما را درخصوص نوع معماری این دوره فرهنگی در تپه سفالین مستند کرده و ارتقا بخشیده است. براساس مطالعات فنی و نتایج آزمایش انجام‌گرفته بر روی مصالح معماری این محوطه، می‌توان نتیجه گرفت که مواد مورد استفاده در ساخت خشت‌ها اساساً از نوع ماسه‌ای-گچی همراه با آهک و مقداری رس بوده است. اگرچه ترکیب کلی کانی‌شناسی در هر چهار نمونه خشتی کم‌وبیش مشابه است، ولی تفاوت‌هایی نیز در ترکیب آن‌ها دیده می‌شود؛ از جمله این‌که نمک (سیلویت) فقط در دو نمونه خشت مشاهده می‌شود و در ملات و دیواره تنور اثری از آن نیست. این می‌تواند نشانه افزودن تعمدی نمک به ماده تولیدکننده خشت بوده باشد. یا این‌که کریستوبالیت در نمونه دیواره تنور و نیز نمونه سطح خشت دیده می‌شود، ولی در نمونه گرفته‌شده از مغز خشت گزارش نشده است که می‌تواند نشان‌دهنده به‌کارگیری خاک‌هایی از منشأ متفاوت یا با ترکیب متفاوت برای سطح و درون خشت باشد تا بخش بیرونی خشت جلا و نمای بهتری پیدا کند.

بخش عمده ماده اولیه نمونه خشت و نیز دیواره تنور نیز از گچ تشکیل‌شده بوده است، درحالی‌که در دو نمونه دیگر (دیواره تنور و سطح خشت) مقدار گچ در این حد نیست. احتمال دارد که کانی‌های ورقه‌ای نیز به منظور ایجاد ظاهر یا جلای بهتر به پوشش رویه خشت اضافه شده باشند. مقدار و نوع کانی‌های رسی در نمونه‌های خشتی مورد مطالعه متغیر است و در نمونه ملات حداکثر به حدود بیست‌وهشت درصد می‌رسد. کانی رسی اصلی در نمونه‌های گرفته‌شده از درون خشت و ملات (N1B, N1M) ایلیت است، ولی کانی‌های مونتموریلونیت، کلریت و کائولینیت هم به مقدار کم در هر چهار نمونه وجود دارند. مقدار کل کانی‌های رسی در نمونه‌های سطح خشت و تنور (N1D, N1T) اما کمتر از پنج درصد است.

از سویی دیگر، مطالعه کانی‌شناسی سه نمونه خاک گرفته‌شده از سطح تپه سفالین و تپه معین‌آباد اگرچه به شکل جالبی ترکیب مشابهی را به نمایش می‌گذارد که می‌تواند بیانگر منشأ مواد مورد استفاده خشت‌ها از خود این دو تپه بوده باشد، ولی تفاوت‌های مشخص کانی‌شناسی نیز به‌خصوص در مورد کانی‌های رسی در بین این دو گروه دیده می‌شود. از جمله این‌که از طرفی کانی پالیگورسکایت که در نمونه خاک‌های معین‌آباد و سفالین گزارش شده‌اند، در نمونه‌های خشت، تنور و ملات مشاهده نشده‌اند؛ یا این‌که مونتموریلونیت و کائولینیت از نمونه خاک‌های تپه گزارش نشده است. این خود می‌تواند دلیلی بر افزودن خاک‌هایی علاوه بر خاک‌های تپه به مواد اولیه خشت‌ها بوده باشد. این‌که خاک‌های اطراف این دو تپه نیز ترکیب کانی‌شناسی مشابهی با آن‌ها داشته باشند، به بررسی کانی‌شناسی و شیمیایی جداگانه‌ای نیاز دارد.

به‌هرحال، تعداد کم نمونه‌ها و نیز پیچیدگی‌های تشخیص کانی‌های رسی توسط روش XRD، از جمله موانع ارائه یک نتیجه‌گیری نهایی درباره نوع و منشأ مواد اولیه تهیه خشت‌ها می‌باشند. در هر صورت، وجود حجم قابل‌توجه گچ (که امروز به شکل ژیپس و باسانیت در نمونه‌ها قابل مشاهده است) در نمونه خشت‌ها جالب‌توجه است، ولی این‌که آیا تمام گچ در خاک اولیه مورد استفاده موجود بوده یا این‌که مقادیری گچ به مصالح اولیه اضافه شده باشد، از روی نتایج این مطالعه قابل تشخیص نمی‌باشد. قدیمی‌ترین شواهد به‌کارگیری گچ و آهک و اندود آن‌ها در مصالح معماری از غرب آسیا به قدمت هزاره هشتم پیش از میلاد گزارش شده است (Aurenche, pp. 503 ff.; Kingery, pp. 219 ff.; Rehhoff, pp. 79 ff.; Huff, 2012). پوشش کف صیقل‌داده‌شده از گچ و آهک از دوره نوسنگی پیش‌سفال B از محوطه عین‌غزل در اردن (Rollefson, pp. 36; Huff, 2012) یا اریحا در فلسطین (Kenyon, 1957, pp. 55; Huff, 2012) و یا سنگ‌های ساختمانی دست‌ساز گچی از اوروک هزاره چهارم پیش از میلاد (Schmidt, pp. 18-20; Huff, 2012) مثال‌هایی از این دست هستند که در آن‌ها گچ یا آهک به‌عنوان مصالح ساختمانی مورد استفاده بوده‌اند. با این حال، وجود گچ در خشت‌های به‌کاررفته در بازه زمانی آغاز ایلامی در مرزهای جغرافیایی امروز ایران تاکنون گزارش نشده است.

به‌هرحال، بایستی توجه داشت که ساختار متفاوت کانی‌های رسی مختلف موجود در خاک‌های سازنده مصالح خشتی در مقایسه با یکدیگر، رفتارهای

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]
[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

فیزیکی و مکانیکی متفاوتی را موجب می‌شوند. کائولینیت یکی از مهم‌ترین کانی‌های رسی است که بیشتر در خاک‌های نواحی مرطوب و زمین‌های اسیدی یافت می‌شود و مقدار آن در خاک‌های خنثی و قلیایی مناطق خشک و نیمه‌خشک کم است. این رس غیرقابل‌اتساع است و قدرت جذب کاتیونی ناچیزی دارد؛ بنابراین ثبات بیشتری در برابر چرخه‌های تر و خشک دارد. گروه مونت‌موریلونیت فعال‌ترین کانی رسی در جذب و تبادل کاتیون است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قلیایی و یا گرم و مرطوب همراه با سایر رس‌ها به مقدار قابل‌توجهی یافت می‌شود. این گروه از کانی‌های رسی قابلیت جذب آب و تورم زیاد دارند. تورم شدید لایه‌های این رس‌ها به دلیل پیوند ضعیف بین لایه‌های مجاور با یکدیگر و همچنین وجود بارهای منفی آزاد و فراوان در سطوح داخلی (بین‌لایه‌ای) آن‌ها است که قابلیت جذب و نگهداری کاتیون‌های محلول و آزاد در خاک را ممکن می‌سازد.

واگرایی یکی دیگر از خواص ذرات رس است و از واکنش آن‌ها نسبت به آب ناشی می‌شود. این نوع خاک‌ها در صورت قرار گرفتن در معرض جریان آب، حتی اگر سرعت جریان کم باشد، به سهولت شسته شده و فرسایش می‌یابند. شسته شدن خاک‌های واگرا با جریان آب از درزها و ترک‌ها آغاز و سرعت فرسایش به‌تدریج اضافه می‌شود (عسگری و فاخر، ۱۳۷۲: ۲۲–۲۵).

۶. نتیجه گیری

با توجه به نتایج مطالعات آزمایشگاهی به روش XRD بر روی خشت‌ها و خاک منطقه در تپه سفالین، به‌خوبی قابل مشاهده است که خاک (رس) مورد استفاده در ساخت خشت‌ها واگرا بوده که بر اساس بررسی‌های میدانی و نوع فرسایش خشت‌ها، علاوه بر کاهش چسبندگی ذرات رس و فقدان انسجام خشت طی چرخه‌های تر و خشک، از طریق فرایندهای فیزیکی و شیمیایی موجب واگرایی ساختار رس می‌شوند. بر همین اساس، به منظور استحکام‌بخشی خشت‌های دیواره‌ها و کف محوطه سفالین و ساخت خشت‌ها و ملات مورد نیاز جهت انجام اقدامات حفاظتی و مرمتی در محوطه، لازم است مواد افزودنی به خاک برای بالا بردن مقاومت آن در برابر عوامل مخرب محیطی اضافه شود.

هدف از اضافه کردن مواد افزودنی استحکام‌بخش در واقع تثبیت خاک است و هدف از تثبیت خاک، افزایش مقاومت آن در برابر عوامل تخریبی محیطی مانند رطوبت و تأثیرات آن است. این هدف با استفاده از راه‌هایی چون افزایش مقاومت و قابلیت چسبندگی ذرات خاک و کاهش جابه‌جایی رطوبتی خاک و نفوذناپذیر کردن خاک در مقابل آب به ثمر می‌رسد که معمول‌ترین مواد تثبیت‌کننده، ماسه و رس، کاه، سیمان پرتلند و آهک می‌باشد (رضازاده اردبیلی، ۱۳۹۰: ۱۱۵).

بر اساس آزمایشات و مطالعات صورت گرفته بر روی خاک، به منظور بهینه کردن خصوصیات فیزیکی و شیمیایی، لازم است افزودنی‌هایی به خاک اضافه شود. در زمینه افزودنی‌های خاک، خصوصاً آهک، می‌توان از ترکیب مختلف برای ساخت خشت‌های مرمتی استفاده کرد. لازم به ذکر است بر اساس برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده، در همه ترکیب‌ها میزان آهک با درصدهای مختلف اضافه می‌شود. خشت‌های مرمتی پس از برش بر اساس استانداردهای موجود، ازجمله استانداردهای ASTM، مورد بررسی قرار خواهند گرفت. مطالعات مکانیک‌خاک نیز جهت شناخت مقاومت فشاری، جذب آب (مویینگی)، غوطه‌وری در آب، مقاومت سایشی و بررسی ویژگی‌های کیفی در ملات و اندودهای مرمتی کمک خواهد بود.

به جهت شناخت دقیق‌تر ترکیب خشت‌ها و نحوه ساخت آن‌ها، انجام مطالعات پتروگرافی و میکروآنالیز نیز برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان از داوران محترم مقاله به‌خاطر ارائه دیدگاه‌ها و نکته‌نظرات ارزشمند که موجب بهبود کیفیت مقاله شد، صمیمانه سپاسگزارند.

منابع / References

حصاری، مرتضی. (۱۳۹۶). بررسی تعدادی از اثر مهرهای حیوانی دوره آغاز ایلامی محوطه سفالین پیشوا، استان تهران. مطالعات باستان‌شناسی، ۹(۲)، ۱۳–۲۸.

حصاری، مرتضی و اکبری، حسن. (۱۴۰۰). الگوی مکان‌گزینی فرهنگ چشمه‌علی در دشت ورامین. مجله جستارهای باستان‌شناسی پیش از اسلام، ۶(۲)، ۳۰–۱۷.

حصاری، مرتضی و اکبری، حسن. (۱۳۹۹). بررسی انسان‌نگاری سفال معین‌آباد در میان نخستین نمونه‌های ایران باستان. هنرهای زیبا– هنرهای تجسمی، ۲۷(۳)، ۳۶–۲۷.

حصاری، مرتضی و یوسفی‌زشک، روح‌الله. (۱۳۸۸). پیدایش نهادهای پیش‌حکومتی در فلات مرکزی ایران؛ خان‌سالارهای آغاز ایلامی در تپه سفالین پیشوا. مطالعات باستان‌شناسی دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه تهران، (۲)، ۲۱–۱.

رضازاده اردبیلی، مجتبی. (۱۳۹۰). مرمت آثار معماری: شناخت، آسیب‌شناسی، فن‌شناسی. انتشارات دانشگاه تهران.

رفیعی‌امام، عمار و زهتابیان، غلامرضا. (۱۳۸۵). بررسی عوامل مؤثر بر تخریب اراضی در دشت ورامین. مجله منابع طبیعی ایران، ۵۹(۲)، ۲۸۹– ۲۹۹.

عسگری، فرج‌الله و فاخر، علی. (۱۳۷۲). تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک. انتشارات جهاد دانشگاهی تهران.

مهدوی، سیده خدیجه؛ آذریان، احمد؛ جوادی، محمدرضا و احمدی، جلال. (۱۳۹۵). بررسی اثر پخش سیلاب بر برخی از خصوصیات فیزیکی–شیمیایی و حاصلخیزی خاک (مطالعه موردی: منطقه بند علی‌خان ورامین). نشریه مرتع، (۱)، ۸۱–۶۸.

Aurenche, O. (1981). Répartition chronologique et spatiale de quelques traits architecturaux du Proche Orient ancien. In Préhistoire du Levant (pp. 503–). Éditions du CNRS.

Bernbeck, R., Hessari, M., Pollock, S., Rol, N., & Akbari, H. (2020). Soundings at three Chalcolithic sites in the Varamin Plain, 2018. Archäologische Mitteilungen aus Iran und Turan, 49, 51–77.

Cronin, J. S., Neall, V. E., & Palmer, A. S. (1996). Investigation of an aggrading paleosol developed into andesitic ring-plain deposits, Ruapehu volcano, New Zealand. Geoderma, 69(1–3), 119–135.

Dahl, J., Hessari, M., & Yousefi, R. (2013). The proto-Elamite tablets from Tepe Sofalin. Iranian Journal of Archaeological Studies, 2(1), 57–73.

Drees, L. R., Wilding, L. P., Smeck, N. E., & Senkayi, A. L. (1989). Silica in soils: Quartz and disordered silica polymorphs. In J. B. Dixon & S. W. Buol (Eds.), Minerals in soil environments (2nd ed., pp. 913–974). Soil Science Society of America.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

Gualtieri, A., & Bertolani, M. (1992). Mullite and cristobalite formation in fired products starting from halloysitic clay. Applied Clay Science, 7(4), 251–262.

Gutiérrez-Castorena, M. del C., & Effland, W. R. (2021). Pedogenic and biogenic siliceous features. In Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths (2nd ed., Chapter 21). Elsevier.

Haghi-Pour, A. (1986). The 1:250,000 geologic map of Tehran. Geological Survey of Iran.

Hessari, M., Bernbeck, R., & Pollock, S. (2021). A brief report on new radiocarbon dates from Tappeh Sofalin, Pishva, Iran. Journal of Archaeological Studies, 12(4), 49–60.

Huff, D. (2012). Gypsum. In Encyclopaedia Iranica (Vol. XI, Fasc. 4, pp. 411–412). https://www.iranicaonline.org/articles/gypsum

Kenyon, K. (1957). Digging up Jericho. Ernest Benn.

Kingery, W. D., Vandiver, P. B., & Prickett, M. (1988). The beginnings of pyrotechnology, Part II: Production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East. Journal of Field Archaeology, 15(2), 219–244.

Maggetti, M. (1982). Phase analysis and its significance for technology and origin. In J. S. Olin & A. D. Franklin (Eds.), Archaeological ceramics (pp. 121–133). Smithsonian Institution Press.

Pavía, S. (2006). The determination of brick provenance and technology using analytical techniques from the physical sciences. Archaeometry, 48(2), 201–218.

Peters, T., & Iberg, R. (1978). Mineralogical changes during firing of calcium-rich brick clays. American Ceramic Society Bulletin, 57(5), 503–509.

Rehhoff, L., Akkermans, P., Leonardsen, E., & Thuesen, I. (1990). Plasters: Gypsum or calcite? A preliminary case study of Syrian plasters. Paléorient, 16(2), 79–.

Rollefson, G. (1989). The uses of plaster at Neolithic ʿAin Ghazal, Jordan. Archeomaterials, 3(1), 33–.

Schmidt, J. (1972). 26. und 27. vorläufiger Bericht über die Ausgrabungen in Uruk-Warka 1968-1969. Gebr. Mann.

Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., & Breuer, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes A review. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 169(3), 310–329.

Zahedi, M., Hessari, M., Amiri, M., & Derakhshi, H. (2024). Recognizing the Sassanid era of Varamin, archaeological evidence. Journal of Archaeological Studies, (8), 1–17.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

Archaeometric and Conservation Study of Early Elamite Mudbricks from the Sofalin Mound, Pishva

Gholamreza Rahmani[*1], Nima Nezafati[2], Morteza Hessari[3]

1. Research Center for Restoration and Conservation, Richt, Tehran Iran,

r.rahmani@richt.ir[*]

2. Deutsches Bergbau-Museum Bochum, Germany

3. Iranian Center for Archaeological Research, Richt, Tehran Iran

Received: 2025.10.14

Accepted: 2026.02.21

https://10.66224/kcr.8.4.79

Knowledge of Conservation and Restoration

pISSN: 2538-6093 eISSN: 3060-6217

This journal adheres to COPE guidelines. Access to this article is free for all. Any non-commercial use of it is permitted, provided appropriate attribution is given.

The Sofalin Mound is located north of the city of Pishva, on natural hills formed by early Holocene deposits (alluvial sediments older than 4,000 years). Systematic and continuous excavations at the Sofalin Mound have been carried out over the past several years in seven seasons as part of broader archaeological investigations in the Varamin–Pishva Plain. Cultural materials recovered from the Sofalin Mound in the north-central Iranian Plateau have significantly enhanced our understanding of the proto-literate period, dated between 3500 and 2800 BCE, within the cultural sphere of the north-central plateau of Iran. During the sixth and seventh excavation seasons at the Sofalin site, architectural spaces were uncovered in Trench 20. These spaces were documented as featuring cobblestone floors, mudbrick platforms, and rectilinear architectural layouts. Based on ceramic assemblages (plain and painted), clay sealings, and fragmented clay tablets, occupation during different phases of the Early Elamite cultural period was identified. This research focuses on the technical and laboratory investigation of Early Elamite mudbrick architectural remains from the Sofalin Mound using X-ray diffraction (XRD) analysis, complemented by chemical studies aimed at proposing appropriate conservation strategies. The primary objective of this study is to achieve a semi-quantitative structural characterization of mudbricks from this period in order to enhance our understanding of their mineralogical composition. Such knowledge contributes to the development of effective conservation approaches for the Sofalin Mound as well as other contemporaneous mudbrick archaeological sites.

Keywords: Archaeometry; Object Conservation; X-ray Diffraction Analysis (XRD); Mudbrick; Early Elamite; Sofalin Mound; Central Iranian Plateau

Introduction

The Proto-Elamite period represents a critical juncture in the development of complex societies in ancient Iran, marked by the emergence of writing systems, administrative practices, and sophisticated architectural traditions. North-central Iran, particularly the Varamin-Pishva Plain, serves as a key region for investigating cultural developments from the Neolithic

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

through Islamic periods. Tepe Sofalin, situated on early Holocene terraces in northern Pishva, has yielded significant Proto-Elamite architectural remains that illuminate construction technologies and settlement patterns of this era. The mud-brick architecture recovered from Trench 20 includes rectilinear structures with cobblestone foundations, representing advanced construction techniques employed during the Proto-Elamite period. Understanding the technical characteristics and compositional properties of these ancient building materials is essential for developing appropriate conservation strategies and comprehending past construction practices. Despite numerous excavations of Proto-Elamite sites across Iran, systematic technical analyses of mud-brick composition remain limited. This study addresses this gap through mineralogical and chemical characterization of mud bricks and associated materials from Tepe Sofalin using X-ray Diffraction (XRD) analysis. The research examines four samples representing different architectural contexts to identify raw material sources, manufacturing techniques, and deterioration mechanisms. These findings provide crucial baseline data for conservation planning and contribute to broader understanding of Proto-Elamite technological practices.

Materials and Methods

Four samples were collected from sixth and seventh season excavations at Trench 20, Tepe Sofalin: interior brick section (N1B), brick surface (N1D), mortar (N1M), and oven wall (N1T). Brick dimensions measured approximately 10×30 cm and 10×35 cm, representing rectilinear construction techniques. Radiocarbon dating (sample Poz103643-) established occupation between 3102-3335 BCE, with a median date of 3234 BCE.

Mineralogical analysis employed X-ray Diffraction (XRD) using a Bruker AXS D-8Advance diffractometer at Tehran University›s Mining Engineering Department. Additional soil samples from Trenches 1 and 2, plus comparative samples from Tepe Sofalin surface and Tepe Moinabad, underwent chemical and pedological analysis at the Research Institute for Cultural Heritage and Tourism. Two further soil samples were analyzed using XRD and XRF at Razi Applied Sciences Foundation, Tehran. Semi-quantitative phase identification followed standard protocols, though precise clay mineral, mica, alkali feldspar, and plagioclase identification remained limited by analytical constraints.

Results and Discussion

XRD analysis revealed that mud-brick raw materials primarily comprised sandy-gypseous composition with calcite and minor clay content. While overall mineralogical compositions showed similarities across all four samples, notable differences emerged. Sylvite (halite) appeared only in two brick samples (N1B, N1D) but not in mortar or oven wall samples, suggesting intentional salt addition to brick-manufacturing materials for improved properties. Cristobalite, a high-temperature silica polymorph naturally occurring in volcanic rocks, was detected in brick surface (N1D) and oven wall (N1T) samples but absent from brick interior (N1B). This distribution suggests either differential raw material sources for surface versus interior components, or surface exposure to thermal conditions. However, cristobalite formation typically requires temperatures between -1050 °1350C, while calcite remains stable only to °850C. The coexistence of both minerals likely indicates cristobalite presence in original soil rather than post-firing formation, consistent with volcanic and pyroclastic rocks identified in Tehran geological maps surrounding Pishva. Gypsum (and bassanite) constituted major components in brick and oven wall samples, while mortar and brick surface samples contained lower proportions. Clay minerals varied across samples, reaching maximum %28 in mortar. Illite predominated in brick interior and mortar samples (N1B, N1M), with montmorillonite, chlorite, and kaolinite present in minor amounts. Total clay mineral content in brick surface and oven samples (N1D, N1T) remained below %5.

Comparative soil analysis from Tepe Sofalin and Tepe Moinabad surfaces showed intriguing compositional similarities, suggesting local raw material sourcing. However, significant mineralogical differences emerged, particularly in clay minerals. Palygorskite, identified in both site soils, was absent from architectural samples, while montmorillonite and kaolinite detected in bricks were not reported from site soils. These discrepancies indicate raw material mixing from multiple sources beyond immediate site contexts.

The substantial gypsum content in brick samples proves particularly noteworthy. While gypsum and lime use in architectural materials dates to the 8th millennium BCE in western Asia, gypsum-containing mud bricks from Proto-Elamite period contexts within modern Iran›s borders remain previously unreported, representing a significant finding for understanding ancient Iranian construction technologies.

Conclusion

XRD analysis conclusively demonstrates that Tepe Sofalin Proto-Elamite mud bricks utilized dispersive soils (clays) characterized by montmorillonite and related expandable clay minerals. These materials exhibit poor cohesion and high susceptibility to wet-dry cycling deterioration through physical and chemical weathering processes. Field observations confirmed progressive structural disaggregation and particle separation consistent with dispersive soil behavior. Effective conservation of Tepe Sofalin›s mud-brick walls and

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]

floors requires soil stabilization through appropriate additive incorporation to enhance resistance against environmental degradation, particularly moisture-related damage. Stabilization objectives include increasing soil strength, improving particle cohesion, reducing moisture migration, and enhancing water resistance. Common stabilizing additives include sand and clay, straw, Portland cement, and lime. Based on experimental results, lime addition at varying percentages is recommended for manufacturing conservation-compatible mud bricks. Post-production bricks should undergo standard testing following ASTM protocols, including compressive strength, water absorption (capillarity), water immersion resistance, and abrasion resistance assessments. Soil mechanics studies will further inform quality specifications for repair mortars and plasters. Future research should incorporate petrographic analysis and microanalysis to refine compositional understanding and manufacturing technique reconstruction. This integrated approach will enhance conservation strategies for Tepe Sofalin and comparable Proto-Elamite mud-brick sites, ensuring long-term preservation of these irreplaceable archaeological resources representing early Iranian architectural traditions.

Acknowledgments
The authors sincerely thank the reviewers for their valuable comments and insights, which helped improve the quality of the manuscript.

[Downloaded from kcr.richt.ir on 2026-10-13]

[DOI: 10.66224/kcr.8.4.79]