Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۲؛ ۹(۲): ۱۹۱-۱۷۳

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.9.2.388

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله پژوهشی

شناسایی منشاء ذخایر رسی خشت‌های ایلامی چغازنبیل در راستای بهینه‌سازی خشت‌های مرمتی

سهیلا ذکوی[۱*]، افشین ابراهیمی[۲]

۱. کارشناس بخش شناخت مواد و مصالح و مطالعات آزمایشگاهی پایگاه میراث جهانی چغازنبیل و هفت‌تپه، خوزستان، ایران

۲. استادیار پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

چکیده

شهر دورانتاش دارای سه حصار متحدالمرکز است که با دروازه‌های متعددی به یکدیگر راه داشته‌اند. این حصارها شهر را به ۳ حوزه تقسیم کرده‌اند. در مرکز محدوده حصار درونی بنایی موسوم به زیگورات به صورت معبدی مطبق، بر پا شده است. مشخصاً در محوطه تاریخی چغازنبیل بیشترین حجم مصرف مصالح را خشت تشکیل داده است که عنصر اصلی در برپایی سازه‌های معماری به استثنای مخزن آب و مقابر زیرزمینی است. با آنکه سطح عمده خشت‌های تاریخی چغازنبیل با اندود کاهگل و یا دیواره‌های خشتی مرمتی، در مرمت‌های گذشته پوشیده شده است؛ اما بر اثر گذشت زمان و شسته شدن توسط آب باران آسیب دیده‌اند. در نتیجه آسیب‌دیدگی خشت‌ها قسمت‌های زیادی از بنا تخریب گردیده و بخش‌های وسیع‌تری در شرف نابودی قرار دارند که باید مرمت و حفاظت شوند.

آنچه در این تحقیق به عنوان محور مطالعات مورد توجه قرار گرفته است شناسایی منشأ ذخایر رسی مورد استفاده در خشت‌های تاریخی محوطه چغازنبیل است تا با حفظ اصالت و یکپارچگی در مواد و مصالح بنا از این ذخایر برای تهیه خشت خام به عنوان راهکار منطقی حفاظت، با هدف کاربرد مستقیم در امر مرمت، استفاده شود. در این راستا از خشت‌های اصلی نمونه‌برداری شد. نمونه‌های برداشت شده مورد آزمایش (XRF،XRD، دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود آتربرگ) قرارگرفتند. در نهایت مشخص شد که ایلامیان برای ساخت خشت‌های تاریخی چغازنبیل هم از خاک‌های سازندی و هم آبرفتی استفاده نموده‌اند.

واژگان کلیدی: چغازنبیل، خشت تاریخی، ذخایر رسی، XRD، XRF

* نویسندهٔ مسئول مکاتبات:Zakavi105@gmail.com

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

۱. مقدمه

شهر باستانی دورانتاش یا چغازنبیل در خوزستان و در بخش جنوب شرقی شهرستان شوش و بر روی بخشی از امتداد چین‌خوردگی پهنه ساختاری از رشته‌کوه‌های زاگرس (طاقدیس سردارآباد) واقع شده است. فاصله این محوطه از شهرستان شوش در حدود ۳۵ کیلومتر و تا مرکز استان (اهواز) ۱۲۰ کیلومتر است. چغازنبیل در سال ۱۹۷۹ م با توجه به ارزش‌های بسیار ویژه‌اش در فهرست محوطه‌های میراث جهانی ثبت شد. این شهر با وسعتی حدود ۱۰۰ هکتار در اواخر قرن ۱۴ ق. م طی یک دوره بیش از ۴۰ سال توسط پادشاه ایلامی اونتاش ناپریشا ساخته شد (Talbian, 2006, p. 17,18).

فضاهای این شهر را سه حصار متحدالمرکز تفکیک می‌کنند که در مرکز آنها یک معبد مطبق یا به اصطلاح باستان «ذیقورات» جای دارد. در طراحی شهر، فضای بین حصارهای بیرونی و میانی عمدتاً به کاخ‌ها و خانه‌های شهر اختصاص داشته است. در حدفاصل بین حصارهای میانی و درونی که به محله مقدس معروف است و برای معابد خدایان مختلف در نظر گرفته شده است، ساختارهای معماری زیادی وجود دارد که بر اثر گذشت زمان و شسته شدن توسط آب باران آسیب دیده‌اند.

خشت، عنصر اصلی و بیشترین حجم مصرف مصالح را، در ساخت بنای زیگورات و دیگر ساختارهای معماری موجود در مجموعه تاریخی چغازنبیل به خود اختصاص داده است (Ebrahimi, 2003, p. 32). معماران ایلامی برای حفاظت هسته خشتی زیگورات از گزند رطوبت و باران‌های سیل‌آسای منطقه، دور تا دور آن را با دیوار آجری قطوری (بیشترین اندازه ضخامت۲ متر) محاط کرده بودند. گرچه در مرمت‌های پس از حفاری، ضخامت این جداره آجری محافظ به اندازه عرض یک آجر تاریخی کاهش یافته و به همان نسبت زمینه را برای آسیب‌پذیری بیشتر خشت‌ها فراهم آورده است. با آنکه سطح عمده خشت‌های تاریخی با اندود کاهگل و یا دیواره‌های خشتی مرمتی، در مرمت‌های گذشته پوشیده شده است؛ لیکن در نتیجه آسیب‌دیدگی خشت‌ها قسمت‌های زیادی از بنا تخریب گردیده و بخش‌های وسیع‌تری در شرف نابودی قرار دارند که باید مرمت و حفاظت شوند. این کار مستلزم ساخت خشت‌های جدیدی است که حتی‌المقدور علاوه بر دارا بودن کیفیت لازم و ویژگی‌های کلی خشت‌های تاریخی، برخی از خواص آنها نیز با اجرای بهترین شرایط ساخت و عمل‌آوری، اصلاح گردیده باشد (Zakavi, 2019A, p. 36, 37).

لازم به ذکر است در سال‌های گذشته تا قبل از شروع فعالیت پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل و راه‌اندازی بخش شناخت مواد و مصالح و مطالعات آزمایشگاهی آن، گر چه تلاش‌هایی در جهت شناسایی خشت‌های ایلامی محوطه چغازنبیل و منشأ ذخایر رسی مورد استفاده برای آن‌ها انجام شده است ولی نتوانستند آن‌چنان که باید مثمر ثمر واقع شوند.

از این رو هدف مقاله پیش رو، ارائه و بررسی نتایج آزمایشات انجام شده روی تعدادی خشت ایلامی انتخابی از محوطه چغازنبیل، با رویکرد شناسایی منشأ ذخایر رسی مورد استفاده ایلامیان برای ساخت خشت و چگونگی ساخت آنان است تا با حفظ اصالت و یکپارچگی در مواد و مصالح بنا از این ذخایر برای تهیه خشت خام به عنوان راهکار منطقی حفاظت، با هدف کاربرد مستقیم در امر مرمت، استفاده شود.

۲. پیشینه پژوهش

در راستای امر حفاظت و مرمت چغازنبیل از زمان حفاری تا کنون مطالعاتی با هدف شناسایی خشت‌های تاریخی و منشأ ذخایر رسی استفاده شده در آنها و تهیه خشت مرمتی به انجام رسیده است؛ اما اوج این تلاش‌ها کوششی است که از زمان شکل‌گیری پروژه بین‌المللی حفاظت و مرمت چغازنبیل (طرح مشترک سازمان میراث فرهنگی کشور، یونسکو، بنیاد اعتباری ژاپن) از سال ۱۳۷۷ تا به امروز در قالب مطالعات آزمایشگاهی ـ میدانی صورت گرفته است. ولی قبل از هر چیز باید گفت که برای مشخص شدن تمام خصلت‌های فیزیکی و شیمیایی مصالح، به نمونه‌های بسیار و آزمایش‌های فراوان با شرایط مشخص مورد نیاز است. معمولاً با تعداد اندک، نمی‌توان به نتیجه دلخواه دست یافت.

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

آنچه در این قسمت بدان اشاره شده است، معرفی اقداماتی است که در سال‌های گذشته به انجام رسیده و به مطالعات اخیر منتهی شده است. بر اساس تقاضای گیرشمن (حفار چغازنبیل) از پرفسور آدامز، مدیر انجمن شرقی شیکاگو در زمان حفاری چغازنبیل، تعدادی از خشت‌ها آنالیز می‌شوند. آقای گیرشمن در کتاب چغازنبیل می‌نویسد: «... امتیازات مساعدی نیز برای ایجاد یک شهر در این ناحیه وجود داشته است: در سواحل رودی که مقدار آب آن نامحدود بود، چوب برای سوزاندن و ایجاد حرارت لازم و همچنین خاک بسیار خوبی برای زدن خشت در اختیار داشته‌اند. امروزه نیز همین امکانات در سواحل آن وجود دارد. پرفسور آدامز، مدیر انجمن شرقی شیکاگو گذری بر چغازنبیل داشت و نمونه‌هایی از این خشت‌ها را با خود برد و آنالیز کرد. بر اساس گفته ایشان می‌دانیم که تمام خشت‌ها باید از خاکی زده شده باشند که از ساحل همین رودی برداشته شده است که در فاصله دو کیلومتری این شهر جاری است...» (Ghirshman, 1994, p. 23).

در سال‌های گذشته که سازمان زمین‌شناسی کشور عهده‌دار بررسی‌های مربوط به شناسایی ذخایر مناسب منطقه خوزستان بود، مطالعاتی نیز بر روی بناهای گلی کهن منطقه به منظور ردیابی ذخایر رسی مناسب و پی بردن به عملکرد مصالح تهیه شده از آنها در طی قرون صورت گرفت. از جمله این بناها، زیگورات عظیم چغازنبیل بود چرا که هسته مرکزی آن تماماً از خشت‌های خام ساخته شده است و نزدیکی آن به رسوبات آبرفتی رودخانه دز، نظر کارشناسان را به خود معطوف داشته بود. آنچه ذیلاً اشاره شده است، نتایج مطالعات انجام گرفته در این مورد است.

جهت ساختن خشت مرغوب، از ریزترین ذرات خاک رس استفاده کرده و آن‌را به خوبی عمل می‌آورده‌اند.

برای تهیه خمیر گل از مقداری آب آهک استفاده می‌کرده‌اند تا هم مقاومت خشت را افزایش دهند و هم از ایجاد ترک ممانعت به عمل آورند. خواص خشک‌شدگی نامناسب رس‌ها را با افزودن مقداری ماسه تصحیح می‌کرده‌اند. مواد اولیه به کار رفته جهت تهیه خشت، شامل ذرات هموژن (یکنواخت) بوده‌اند. از مواد آلی گیاهی مانند سبوس برنج برای ساخت خشت‌ها استفاده کرده‌اند. مصالح تهیه شده بسته به شرایط مصرف از مرغوبیت متفاوتی برخوردار هستند. مثلاً در لوحه‌ها و خشت‌های به کار رفته در اماکن مقدس از مواد ریزدانه و هموژن و افزودنی‌های آلی نظیر سفیده تخم‌مرغ بهره گرفته‌اند برای تهیه خشت‌ها گاه از رس‌هایی استفاده کرده‌اند که تا ۳۰ درصد کربنات دارند.(Ebrahimi, 2001, p. 144, 145)

بر اساس تقاضای سازمان میراث فرهنگی کشور و با همکاری بنیاد یونسکو، در تاریخ ۶ تا ۲۲ نوامبر ۱۹۹۵ م، پروفسور واتانابه مطالعاتی را با هدف شناسایی مصالح خشتی و گلی در زیگورات چغازنبیل به انجام رساندند. آنچه در این قسمت بدان اشاره شده است، ترجمه و برداشت از مقاله‌ای است که ایشان پس از انجام و تکمیل آزمایش‌های مورد نیاز بر روی نمونه‌های ارسالی به ژاپن، در اختیار پایگاه میراث جهانی چغازنبیل قرار داده‌اند.

«از نتایج این مطالعه چنین استنباط می‌شود که تفاوت فاحشی بین نمونه‌های MB-2 و MB-3 که در واقع خشت‌های به کار رفته در بنای زیگورات و دیوار محیطی آن هستند وجود دارد. برخی باستان‌شناسان عنوان کرده‌اند که حصار پیرامون زیگورات حدود یک‌صد سال زودتر از زیگورات ساخته شده است. تفاوت موجود بین نمونه‌های MB-2 و MB-3 در آزمون‌های دانه‌بندی، رطوبت‌دهی و ترکیبات شیمیایی صحت چنین فرضیه‌ای را قوت می‌بخشد. با این وجود برای اطمینان از نتایج آزمون‌ها نیاز است تعداد نمونه‌های بیشتری مورد مطالعه قرار گیرند» (Zakavi, 2019B, p. 35, 36).

از زمان شروع فعالیت پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل مطالعات آزمایشگاهی- میدانی مصالح گلین آغاز و همچنان ادامه دارد. از این رو مبحث شناسایی منشأ ذخایر رسی مورد استفاده ایلامیان برای تهیه خشت‌های محوطه چغازنبیل کوششی است که در جهت شناخت کامل‌تر معماری خشتی ایلامیان انجام گرفته است.

۳. بررسی ذخایر رسی در اطراف محوطه تاریخی چغازنبیل

ذخایر رسی استان خوزستان را می‌توان به دو دسته رس‌های دامنه‌ای (سازند آغا جاری، عضو لهبری) و رس‌های آبرفتی (حمل شده توسط رودخانه‌ها) تفکیک نمود. رس‌های دامنه‌ای از فرسایش شیمیایی سنگ‌ها به وجود آمده‌اند و رسوبات

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

حاصل از آنها در دامنه کوه‌ها و تپه‌ها انباشته گردیده‌اند. این رس‌ها به لحاظ دانه‌بندی، ناهمگون‌تر و درشت‌تر از سایر خاک‌های رسی بوده و در استان ذخایر قابل ملاحظه‌ای ندارند و معمولاً برای مصارف ساختمانی مناسب نیستند. رس‌های آبرفتی قسمت اعظم ذخایر خاک رس دشت خوزستان را تشکیل می‌دهند و عمدتاً توسط سه رودخانه کارون، دز و کرخه به حوزه رسوب‌گذاری انتقال یافته‌اند. این رس‌ها از بافتی ریز و همگن برخوردار هستند و برای مصارف ساختمانی از جمله تهیه خشت و آجر، مناسب تشخیص داده شده‌اند (Zakavi, 2019A, p. 36, 37).

٤. مواد و روش‌های مطالعاتی

به منظور مطالعه خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناختی خشت‌های تاریخی به کار رفته در محوطه چغازنبیل با هدف شناسایی منشأ ذخایر رسی استفاده شده در خشت‌های تاریخی، اقدام به نمونه‌برداری از مکان‌هایی گردید که حتی‌المقدور در معرض مستقیم عوامل فرساینده محیطی قرار نداشتند و یا اینکه کمترین فرسایش را پذیرا شده‌اند.

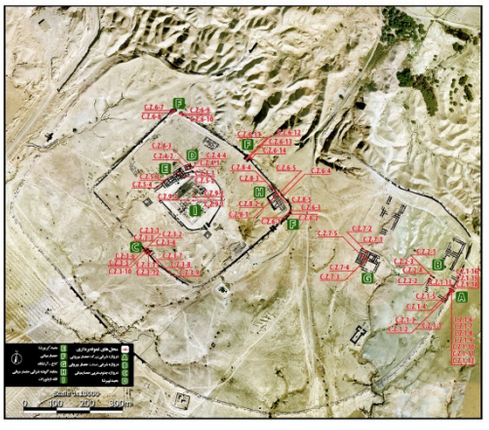
از آنجایی که برای مشخص شدن تمام خصلت‌های فیزیکی و شیمیایی مصالح، به نمونه‌های بسیار و آزمایش‌های فراوان نیاز است، از ۷۴ خشت ایلامی نمونه‌برداری (بیشتر نمونه‌ها در زمان پی‌گردی برداشت شده‌اند) شد.

روش پژوهش به صورت میدانی (نمونه‌برداری) از خشت‌های ایلامی محوطه برای تعیین منشأ خشت خام، کتابخانه‌ای (مطالعه منابع مرتبط) و آزمایشگاهی (انجام آزمایشات XRF،XRD، دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود آتربرگ) انجام گرفته است.

در همین راستا آزمایش‌های فیزیکی، دانه‌بندی[1] (استفاده از الک‌های سایز ۳۰- ۵۰- ۱۰۰- ۲۰۰) هیدرومتری (استفاده از هیدرومتر) و حدود آتربرگ (استفاده از دستگاه کاساگرانده) بر روی ۷۴ نمونه خشت تاریخی، در آزمایشگاه میراث جهانی چغازنبیل و آزمایش‌های شناسایی ترکیبات شیمیایی XRF (به روش پودری استفاده از دستگاه طیف‌سنجی فلوئورسانس اشعه ایکس مدل PW 1410 از کمپانی PHILIPS) و XRD (به روش پودری از دستگاه پراش‌سنج پرتو ایکس مدل PW 1730 از کمپانی PHILIPS با تیوب مس با حداکثر اختلاف پتانسیل 40Kv و حداکثر جریان 30mA و با استفاده از نرم‌افزار X'Pert HighScore) بر روی۲۰ نمونه خشت تاریخی در آزمایشگاه شرکت دانش‌بنیان «بیم‌گستر تابان» انجام گرفت. آنالیز این نـمونه‌ها کمک نمود تا شناسایی لازم از خشت‌ها به عمل آید.

لازم به ذکر است، ۲۰ نمونه از بین کل نمونه‌های برداشت شده، با توجه به تفاوت در بافت، رنگ و میزان ذرات در بخش رسی (آزمون هیدرومتری) انتخاب و در این مقاله آورده شده است.به منظور سهولت در دسترسی به اطلاعات، نمونه‌های خشت تاریخی برداشته شده از مجموعه تاریخی چغازنبیل (زیگورات، حصارها، دروازه‌ها، معابد، کاخ آرامگاه‌ها) و مکان‌یابی هر خشت، (جدول ۱) طراحی و همچنین محل نمونه‌ها روی (شکل ۱) مشخص گردید.

مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها به صورت مختصر در (جدول ۲) معرفی گردیده است.



شکل ۱: نمایش محل‌های نمونه‌برداری و نام‌گذاری نمونه‌ها

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

جدول ۱: نمونه‌های انتخابی برای مطالعات

کد نمونه	موقعیت	ارتفاع از سطح زمین	رنگ	بافت
C.Z-1.10	دروازه بزرگ	۹۰ سانتی‌متر	مایل به قرمز	همگن
C.Z-1.12	دروازه بزرگ	۷۰ سانتی‌متر	مایل به قرمز	همگن
C.Z-1.15	دروازه بزرگ	۲۰ سانتی‌متر	زرد مایل به قهوه‌ای	همگن
C.Z-2.2	دروازه عدالت	۲۰ سانتی‌متر	مایل به قرمز	همگن
C.Z-2.3	دروازه عدالت	۴۰ سانتی‌متر	مایل به قرمز	همگن
C.Z-3.3	دروازه شوش	۵۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ خاکستری	همگن
C.Z-3.4	دروازه شوش	۳۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ خاکستری	همگن
C.Z -4.3	معبد گال	۳۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ سبز	همگن
C.Z -4.4	معبد گال	۶۰ سانتی‌متر	زرد مایل به قهوه‌ای	همگن
C.Z -5.3	معبد ایشنی کاراب	۱۳۵ سانتی‌متر	مایل به قرمز	همگن
C.Z-6.1	حصار میانی گوشه شرقی	۹۵ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ خاکستری	همگن
C.Z-6.7	حصار میانی گوشه شمالی	۴۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ خاکستری	همگن
C.Z-6.11	دروازه شمال شرقی	۱۰۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ سبز	ناهمگن همراه با خرده آجر
C.Z-6.13	دروازه شمال شرقی	۱۵۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ سبز	ناهمگن همراه با خرده آجر
C.Z -7.1	کاخ آرامگاه	۱۲۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ خاکستری	همگن
C.Z-7.2	کاخ آرامگاه	۱۱۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ خاکستری	ناهمگن همراه با خرده آجر
C.Z-7.5	کاخ آرامگاه	۱۵۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ سبز	همگن
C.Z -8.2	معبد شیموت وبلت الی	۱۲۰ سانتی‌متر	قهوه‌ای با ته‌رنگ سبز	همگن
C.Z -9.1	شمال قله زیگورات	سطح قله زیگورات	مایل به قرمز	همگن
C.Z -9.3	مرکز قله زیگورات	سطح قله زیگورات	قهوه‌ای با ته‌رنگ سبز	همگن

جدول ۲: روش‌های مورد استفاده در تحقیق

(Pedram & Ebrahimi, 2017; Aflaki, 1995; Eftekharhan et al, 1998; Hadian Dehkordi, 2009)

عنوان آزمایش	روش آماده‌سازی نمونه	هدف	استاندارد	وسایل مورد نیاز
اندازه‌گیری حدود آتربرگ	مطابق با استاندارد مربوطه	تخمین پتانسیل تورم	AASHTO T89-68 ASTM D423-66 AASHTO T90-70 ASTN D424-59	دستگاه کاساگرانده دستگاه اون
توزیع دانه‌بندی به روش تر	مطابق با استاندارد مربوطه	اندازه‌گیری بخش ماسه‌ای و غیرماسه‌ای به صورت توأمان	ASTM D 422-87 AASHTO 88-81	الک‌های مش ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ دستگاه اون
توزیع دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری	مطابق با استاندارد مربوطه	جداسازی بخش ماسه‌ای و غیرماسه‌ای (رس و سیلت) به تفکیک s	ASTM D 421-58 & D 422-63 AASHTO T 87-86 & T 88-90	الک‌های مش ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ دستگاه اون هیدرومتر
تعیین ترکیب فازی یا بلورین به روش XRD	آسیاب کردن نمونه، تهیه قرص و آرد کردن در دستگاه	شناسایی فازهای اصلی و فرعی به صورت نیمه کمی	–	PHILIPS PW 1730 and SEIFERT 3000T2T
تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF	آسیاب کردن نمونه، تهیه قرص و آرد کردن در دستگاه	شناخت ترکیب شیمیایی عنصری به صورت کمی	–	PHILIPS PW 1410

۵. ریخت‌شناسی خشت‌های تاریخی محوطه چغازنبیل

هدف از ریخت‌شناسی، شناخت خصوصیات مایکروسکوپی (ابعاد، رنگ، بافت، فرم و نحوه کاربرد) خشت‌های تاریخی به کار رفته در محوطه چغازنبیل است. نتایج ریخت‌شناسی خشت‌های تاریخی چغازنبیل به شرح زیر است.

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

ابعاد خشت‌های تاریخی استفاده شده در محوطه چغازنبیل عبارت‌اند از: ۱۰×۴۱×۴۱، ۱۰×۴۰×۴۰، ۸/۵×۳۹×۳۹، ۸×۳۸×۳۸، ۸×۲۳×۲۳ سانتی‌متر.

خشت‌های تاریخی از تنوع رنگی محسوسی برخوردارند که شامل متمایل به قرمز، زرد مایل به قهوه‌ای، قهوه‌ای روشن با ته‌رنگ سبز، قهوه‌ای روشن با ته‌رنگ خاکستری (شکل ۲).

خشت‌های تاریخی از لحاظ بافت به دو دسته تقسیم می‌شوند: خشت‌های همگن و یک‌دست بدون مواد افزودنی (شکل ۳)، خشت‌های ناهمگن و همراه با خرده آجر (شکل ۴).

خشت‌های تاریخی به چند فرم متفاوت دیده می‌شوند. حجم‌های فرسایش یافته با فرم معماری نامشخص بعضاً همراه با قطعات آجر، سطوح فرسایش یافته با بافتی متلاشی شده و ترک خورده، نمای هشت و گیر خشتی و آجری به صورت ردیف‌های یک در میان (شکل ۵).

خشت‌های تاریخی در محوطه چغازنبیل در برپاسازی حصارها و هسته مرکزی معابد در قالب سازه‌های تخت و بعضاً قوس‌دار استفاده شده‌اند.

شکل ۲: تنوع رنگی خشت‌های مورد استفاده

شکل ۳: خشت‌های همگن

شکل ۴: خشت‌های ناهمگن و همراه با خرده آجر

شکل ۵: نمای هشت و گیر آجری

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

٦. نتایج

از مجموع مطالعات و آزمایشات انجام گرفته، نتایج زیر حاصل شده است.

۱) خشت‌های استفاده شده در محوطه تاریخی چغازنبیل از تنوع رنگی محسوسی برخوردارند. این تنوع رنگی می‌تواند به نوعی نشان دهنده بهره‌گیری از خاک‌های مختلف به لحاظ ساختاری و یا محل تأمین برای ساخت خشت‌ها باشد.

۲) در توزیع دانه‌بندی خشت‌ها تفاوت‌هایی دیده می‌شود. به طوری که خشت، نمونه C.Z -4.3 ریزدانه‌تر از نمونه‌های دیگر است (جدول ۳) و (جدول ۴).

وزن‌های مورد اشاره در ۱۰۰ g از خاک خشک شده هر نمونه به دست آمده‌اند. در این روش دانه‌بندی تنها از الک استفاده می‌شود و بنابراین تنها دو بخش کلی غیرماسه‌ای و ماسه‌ای به صورت تفکیک شده است.

جدول ۳: توزیع دانه‌بندی به روش تر

جمع کل	درصد ماسه(درصد مانده روی الک):				درصد رس و سیلت	کد نمونه
	مش ۲۰۰	مش ۱۰۰	مش ۵۰	مش ۳۰		
۱۰۰	۱۸/۲۵	۱۴/۸۸	۴/۷۹	۵/۲۴	۵۶/۸۴	C.Z-1.10
۱۰۰	۱۱/۹۱	۱۶/۰۴	۴/۱۲	۷/۳۵	۶۰/۵۸	C.Z-1.12
۱۰۰	۱۵/۳۴	۱۴/۷۹	۴/۵۹	۲/۸۹	۶۲/۴۲	C.Z-1.15
۱۰۰	۸/۷۵	۶/۹۶	۲/۴۶	۱/۹۱	۷۹/۹۲	C.Z-2.2
۱۰۰	۵	۴/۵۵	۱/۹۰	۵/۵۳	۸۳/۰۲	C.Z-2.3
۱۰۰	۱۰/۶۲	۲۳/۱۷	۵/۷۸	۴/۱۸	۵۶/۲۵	C.Z-3.3
۱۰۰	۱۲/۲۱	۱۵/۰۲	۳/۳۷	۲/۱۵	۶۷/۲۵	C.Z-3.4
۱۰۰	۲/۰۹	۰/۷۹	۰/۲۳	۰/۱۲	۹۶/۷۷	C.Z -4.3
۱۰۰	۳/۴۵	۱/۷۳	۰/۵۲	۰/۳۰	۹۴	C.Z -4.4
۱۰۰	۶/۸۲	۱۳/۹۵	۴/۹۳	۱/۶۲	۷۲/۶۸	C.Z -5.3
۱۰۰	۱۸/۶۱	۲۹/۶۹	۱۵/۹۳	۵/۱۳	۳۰/۶۴	C.Z-6.1
۱۰۰	۲۶/۳۰	۱۹/۴۰	۴/۳۲	۱/۲۶	۴۸/۷۲	C.Z-6.7
۱۰۰	۱۴/۶۱	۱۸/۵۹	۵/۲۷	۴/۵۸	۵۶/۹۵	C.Z-6.11
۱۰۰	۳/۸۳	۸/۹۷	۶/۲۵	۱۲/۹۷	۶۷/۹۸	C.Z-6.13
۱۰۰	۱۰/۶۰	۱۰/۴۴	۲/۳۷	۲/۰۲	۷۴/۵۷	C.Z -7.1
۱۰۰	۱۳/۲۵	۱۳/۸۶	۴/۸۷	۷/۲۸	۶۰/۷۴	C.Z-7.2
۱۰۰	۶/۳۶	۲/۹۱	۱/۱۶	۲/۴۲	۸۷/۱۵	C.Z-7.5
۱۰۰	۸/۵۷	۱۱/۸۳	۳/۲۶	۲/۲۲	۷۴/۱۲	C.Z -8.2
۱۰۰	۱۰/۶۶	۱۰/۲۷	۳/۱۱	۲/۰۷	۷۳/۸۹	C.Z -9.1
۱۰۰	۱۳/۱۶	۱۶/۵۰	۵/۵۵	۲/۰۷	۶۲/۷۲	C.Z -9.3

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

جدول ۴: توزیع دانه‌بندی به روش الک/ هیدرومتری

کد نمونه	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۳ میلی‌متر	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۰۱ میلی‌متر
C.Z-1.10	۱۸	۲۲	۴۸	۶۲
C.Z-1.12	۱۲	۲۸	۶۲	۸۱
C.Z-1.15	۱۵	۲۶	۵۰	۷۰
C.Z-2.2	۷	۹	۵۲	۷۲
C.Z-2.3	۵	۳۰	۴۹	۵۵
C.Z-3.3	۱۰/۶۰	۲۷/۹۰	۶۵	۷۳/۷۰
C.Z-3.4	۱۲/۲۰	۲۵	۵۱	۸۰/۳۰
C.Z -4.3	۲/۰۹	۱۱	۵۵	۷۳/۳۳
C.Z -4.4	۳/۴۵	۲۰	۶۰	۷۹
C.Z -5.3	۷	۲۰	۵۱	۸۰/۵
C.Z-6.1	۱۸/۶	۴۵	۶۸	۷۲/۲
C.Z-6.7	۲۶/۳	۵۰	۷۵	۸۰/۹۰
C.Z-6.11	۱۵	۶۲	۸۴	۹۱
C.Z-6.13	۴	۵۳	۸۵	۸۵
C.Z -7.1	۱۱	۲۱	۵۹	۸۵
C.Z-7.2	۱۳/۳	۵۰	۸۱	۸۵/۳
C.Z-7.5	۶/۴	۵۰	۷۵	۸۴/۵
C.Z -8.2	۹	۳۰	۷۱	۷۸
C.Z -9.1	۱۰/۷	۳۱	۶۱	۷۵/۵۴
C.Z -9.3	۱۳/۲	۶۲	۸۵	۹۱/۱۸

بر اساس استاندارد ۱۱۶۲ ایران (ویژگی فیزیکی خاک مناسب برای تهیه خشت) (جدول ۵) در اکثر نمونه‌ها میزان مانده روی الک نمره ۱۰۰ بیشتر از حد مجاز است.

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

جدول ۵: ویژگی فیزیکی خاک مناسب برای تهیه خشت بر اساس استاندارد ایران (Askari, 1993)

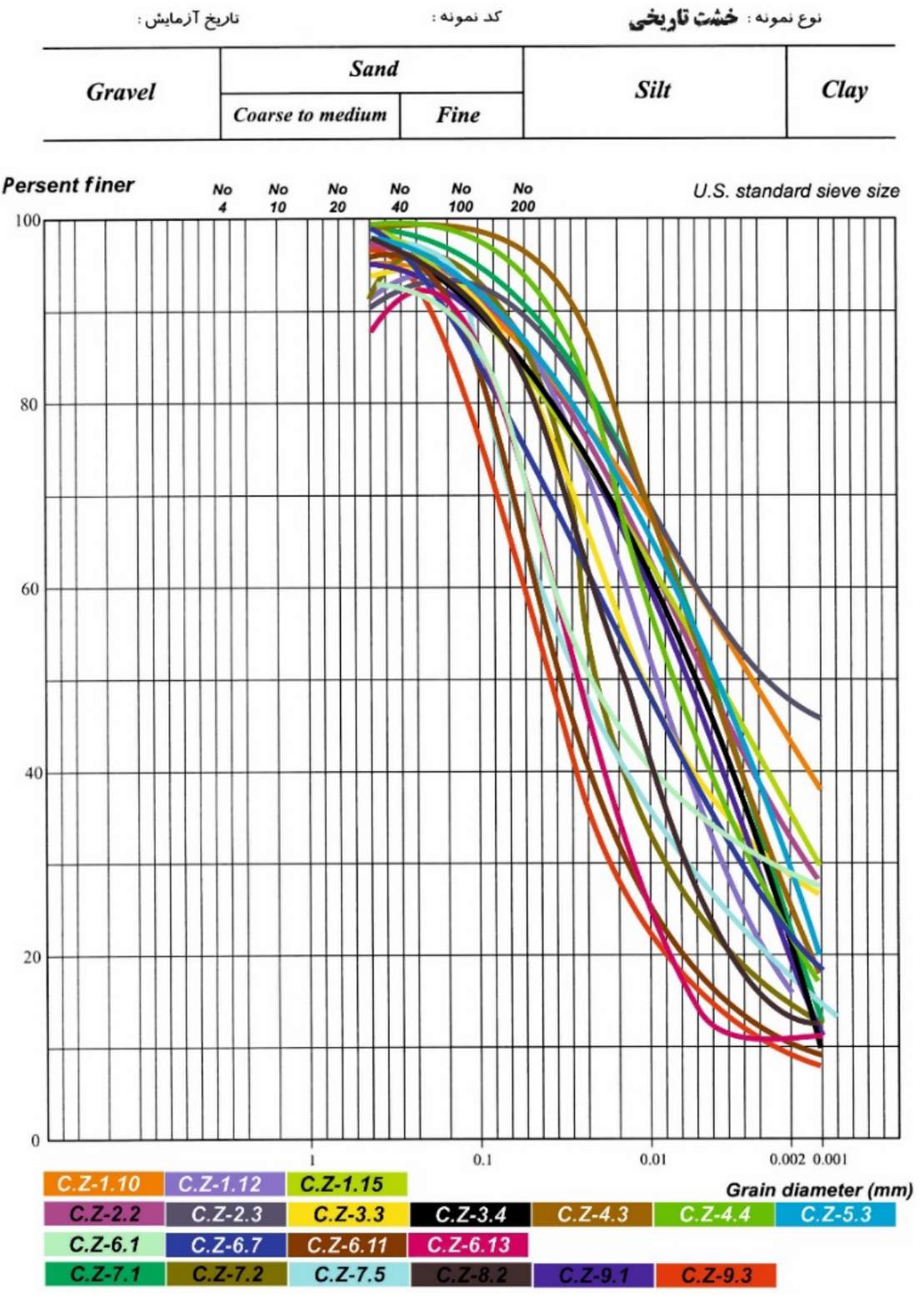
روش آزمایش	حد مطلوب	نوع آزمایش
استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران	ماکزیمم ۷/۵	مانده روی الک ۱۴۹ میکرونی (۱۰۰ مش)
استاندارد ۱۱۶۲ ایران	–	حد حالت روانی[۲]
استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران	۱۷–۳۰	حد حالت خمیری[۳]

جدول ۶: اندازه‌گیری حدود آتربرگ

کد نمونه	حد روانی	حد خمیری	اندیکس خمیری
C.Z-1.10	۲۹/۳۶	۱۹/۶۰	۲/۳۴
C.Z-1.12	۳۱/۹۰	۲۵/۵۲	۶/۳۸
C.Z-1.15	۲۸/۴۵	۲۴/۴۶	۳/۹۹
C.Z-2.2	۳۸/۷۵	۳۲/۳۵	۶/۴
C.Z-2.3	۳۷/۸۵	۳۲/۷۳	۵/۱۲
C.Z-3.3	۳۲/۴۸	۲۷/۲۱	۵/۲۷
C.Z-3.4	۳۵/۱۸	۲۹/۷۹	۵/۳۹
C.Z -4.3	۳۲/۴۵	۲۶/۱۱	۵/۸۹
C.Z -4.4	۳۵/۸۷	۲۸/۴۶	۷/۴۱
C.Z -5.3	۳۰/۵۹	۲۶/۱۳	۴/۴۶
C.Z-6.1	۲۴/۱	۱۶/۷۵	۷/۲۶
C.Z-6.7	۲۸/۵۲	۲۴/۵۶	۳/۹۶
C.Z-6.11	۲۹/۶۰	۲۵/۰۹	۴/۵۱
C.Z-6.13	۴۳/۳۶	۳۲/۲۸	۱۱/۰۸
C.Z -7.1	**۳۲/۱۳**	**۲۱/۱۱**	**۱۱/۰۲**
C.Z-7.2	۲۴/۵۶	۱۵/۹۶	۸/۶
C.Z-7.5	۲۸/۷۴	۲۰/۲	۸/۵۴
C.Z -8.2	۳۵/۳۸	۲۳/۲۱	۱۲/۷
C.Z -9.1	۳۵/۵۱	۲۹/۲۸	۶/۲۳
C.Z -9.3	۲۳/۷۲	۲۵/۸۶	۶/۸۶

۳) نتایج مربوط به اندازه‌گیری حدود آتربرگ و دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری برای خشت‌ها نشان می‌دهد که در همه‌ی نمونه‌ها درصد ذرات رس (کوچکتر از ۲ میکرون) بسیار اندک است (جدول ۶) یا به تعبیر دیگر، بخش غیرماسه‌ای خاک‌ها را بیشتر ریزدانه‌های سیلت شامل می‌شوند (شکل ۶).

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026



شکل ۶: دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری برای نمونه‌های مورد مطالعه (Pedram & Ebrahimi, 2017)

پپتانسیل تورم نیز با استناد به اندیکس خمیری[۴] (جدول ۷)، در خشت‌های تاریخی C.Z -7.1, C.Z-6.13 ,C.Z -8.2 در حد متوسط و در سایر نمونه‌ها، پتانسیل تورم در حد پایین است.

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

جدول ۷: طبقه‌بندی پتانسیل تورم با نشانه خمیری (Askari, 1993)

پتانسیل تورم	شاخص خمیری
پائین	۰-۱۵
متوسط	۱۰-۳۵
زیاد	۲۰-۵۵
خیلی زیاد	بیش از ۳۵

۴) بر اساس نتایج به دست آمده، اجزای اصلی خشت‌ها را کلسیت و کوارتز تشکیل داده‌اند. هر چه مقدار کلسیت در خاک کمتر باشد برای تهیه خشت و آجر مناسب‌تر خواهد بود. با این وجود چنانچه کلسیت به صورت پودر و به طور یکنواخت در خاک پخش شده باشد، حتی در نسبت‌های زیاد هم (گاه تا ۳۰ درصد) مشکل خاصی را برای تهیه خشت ایجاد نمی‌کند. این در حالی است که اگر کلسیت در خاک به صورت کلوخه‌ای وجود داشته باشد، در حضور رطوبت دردسرساز خواهد بود. ضمناً وجود کلسیت زیاد در نمونه‌ها می‌تواند به عنوان یک عامل بازدارنده تورم و واگرایی ناشی از حضور کانی رسی (مونتموریونیت به علت فضای زیادی که در بین فضای شبکه‌ای این کانی وجود دارد قابلیت تورم بالایی دارد) قلمداد شود. برخی از خاک‌های رس در طبیعت در تماس با آب به سرعت شسته شده و فرسایش می‌یابند. وجود یون‌های سدیم در لایه‌های میانی کانی‌های مونتموریونیت در خاک‌های واگرا یکی از مهمترین ویژگی‌های آنها شناخته شده است. ضمناً وجه اشتراک نتایج کانی‌شناسی در این است که همه خشت‌ها از لحاظ دارا بودن کانی رسی مرغوب و مناسب (کائولینیت)، فقیر هستند (جدول ۸) و (جدول ۹).

۵) وجود کانی باسانیت در نمونه C.Z-7.2، که در بافت آن از خرده آجر به عنوان پر کننده استفاده شده است، نشان دهنده ژیپس با نیم مولکول آب (H1 Ca1 O4.5 S1) است. ژیپس در دمای بین ۱۷۰- ۱۱۰ درجه به باسانیت و در دمای بین ۲۰۰- ۱۷۵ درجه به ژیپس بدون آب یا انیدریت تبدیل می‌شود.

در زمان ساخت چغازنبیل، آجرهای مرغوب، با اهداف ساختمانی، پوششی یا تزیینی در قالب انواع آجرهای ساده، ویژه، کتیبه‌دار و لعاب‌دار استفاده شده‌اند و آجرهای با مرغوبیت کمتر که پخت ناقص داشتند در عمق پوشش آجری زیگورات، بعضی از کف‌سازی‌ها و موارد کم اهمیت‌تر دیگر به کار گرفته شده‌اند. در این بین، بعد از هر بار پخت آجر و پس از سرد شدن کوره و در حین تخلیه و جابجایی آجرها، تعدادی از آنها به دلیل پخت ناقص یا وجود ناخالصی در آجر از هم پاشیده می‌شدند و قابلیت مصرف ساختمانی نداشتند. اینها را یا به همان شکل کلوخه‌ای یا بعد از کوبیدن و خرد کردن با خمیره گل به عنوان پر کننده (کنترل ترک‌خوردگی و اصلاح رفتار خشک شدن) در خشت‌ها، جهت صرفه‌جویی در مصرف خاک و الیاف گیاهی و همچنین استفاده از حداکثر پرت تولیدات آجری، مخلوط می‌کردند و خشت می‌زدند. (جدول ۸).

۶) وجود کانی کلینوکلر در خشت‌ها را که یکی از شناخته‌ترین کانی‌های رسی کلریت است، می‌توان به ارث رسیده از مواد مادری دانست.

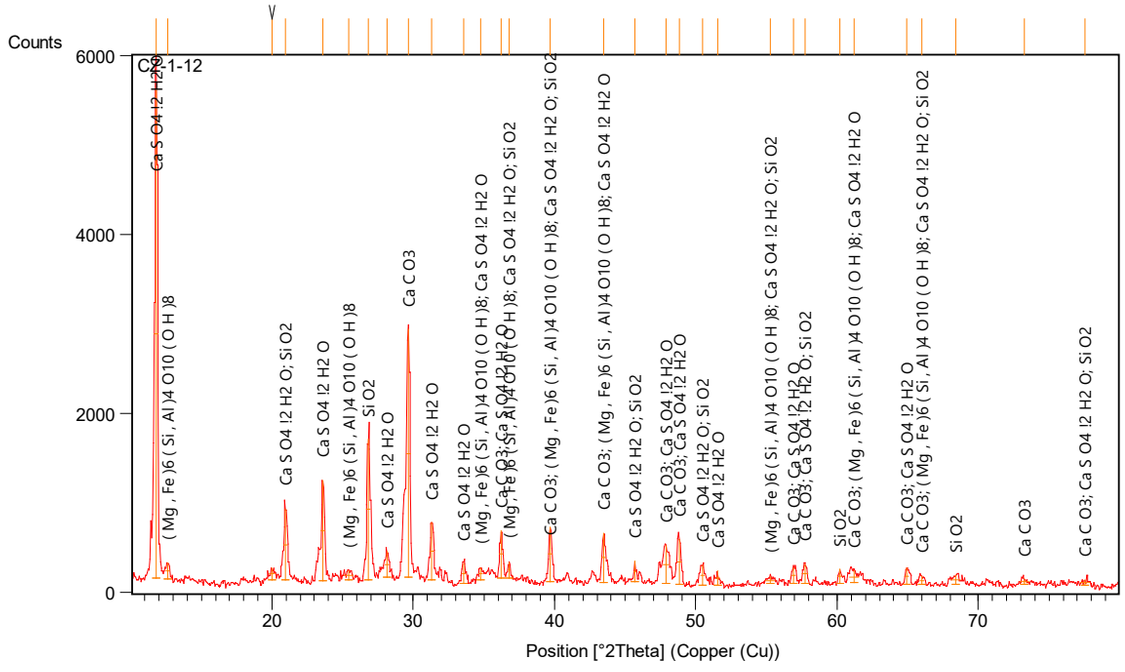
۷) وجود پیک گچ اولیه و گچ ثانویه در نمودارهای XRD خشت‌های محوطه تاریخی چغازنبیل نشان دهنده استفاده از ذخایر رسی متفاوت برای تهیه آنها است (شکل ۷) و (شکل ۸).

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

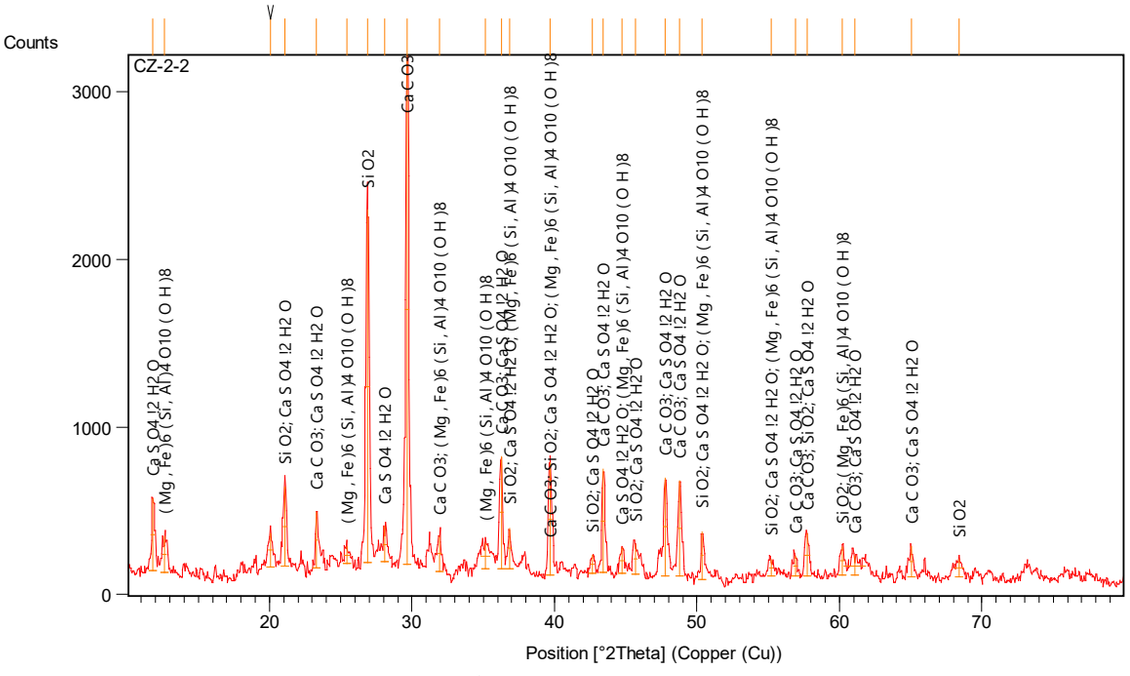
جدول ۸: تعیین ترکیب فازی یا بلورین به روش XRD

کد نمونه	ترکیب شیمیایی
C.Z-1.10	کلسیت، کوارتز، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس
C.Z-1.12	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z-1.15	کوارتز، کلسیت، ژیپس، کلینو کلر (کلریت)
C.Z-2.2	کلسیت، کوارتز، ژیپس، کلینوکلر (کلریت)
C.Z-2.3	کلسیت، کوارتز، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس
C.Z-3.3	کلسیت، کوارتز، ژیپس، کلینوکلر (کلریت)
C.Z-3.4	کوارتز، کلسیت، ژیپس، کلینوکلر (کلریت)
C.Z -4.3	کلسیت، کوارتز، دولومیت
C.Z -4.4	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z -5.3	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z-6.1	کوارتز، کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس
C.Z-6.7	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز، آراگونیت
C.Z-6.11	کوارتز، کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس
C.Z-6.13	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z -7.1	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z-7.2	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز، باسانیت
C.Z-7.5	کلسیت، کوارتز، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس
C.Z -8.2	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z -9.1	کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس، کوارتز
C.Z -9.3	کوارتز، کلسیت، کلینوکلر (کلریت)، ژیپس

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026



شکل ۷: نمودار خشت تاریخی C.Z-1.12، ساخته شده با خاک سازندی (دارای پیک گچ اولیه)



شکل ۸: نمودار خشت تاریخی C.Z-2.2، ساخته شده با خاک آبرفتی (دارای پیک گچ ثانویه)

۸) مقایسه نتایج آزمایش‌های تعیین ترکیبی XRF خشت‌های تاریخی با ویژگی‌های ارائه شده در استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران (میزان مناسب ترکیب شیمیایی خاک برای تهیه خشت) (جدول ۱۰) نشان می‌دهد که در خاک‌های استفاده شده برای خشت‌های تاریخی، میزان سیلیس و آلومین کمتر از حد مجاز و میزان آهک (کلسیم اکسید) و یون کلر و سولفات بیشتر از حد مجاز است (جدول ۹).

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

جدول ۹: تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-1.10	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-1.12	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-1.15	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-2.2	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-2.3
SiO2	۲۸/۶۴۸	۲۵/۰۴۴	۳۰/۵۳۹	۳۱/۸۴۴	۳۱/۰۳۷
Al2O3	۶/۲۲	۶/۶۱	۶/۲۷	۸/۲	۶/۹
Fe2O3	۴/۲۳۳	۳/۲۲۷	۳/۸۶۲	۵/۲۸۲	۴/۵۳۲
CaO	۲۲/۳۸۵	۲۳/۰۱۹	۲۱/۳۷	۱۸/۶	۲۰/۴۴۴
K_2O	۱/۵۶۳	۱/۳۸۱	۱/۵۹۴	۱/۹۸۷	۱/۶۵۷
MgO	۴/۷۱۹	۴/۸۸۸	۴/۶۱۹	۵/۰۸۵	۴/۵۱۶
TiO_2	۰/۴۷۴	۰/۴۰۶	۰/۴۶۷	۰/۵۳۴	۰/۵۰۵
MnO	۰/۰۶۸	۰/۰۵۳	۰/۰۶۲	۰/۰۷۶	۰/۰۶۹
P_2O_5	۰/۱۱۳	۰/۱۰۱	۰/۱۱۴	۰/۱۲۱	۰/۱۰۶
Na_2O	۱/۳۹۹	۱/۲۲۵	۱/۷۶	۱/۳۴۷	۱/۰۷۴
SO3	۱/۱۱	۸/۷۳	۱/۸۷	۱/۰۱	۹
Cl	۱/۴۹	۰/۹۶	۱/۵۴	۱/۲۳	۱/۲۷
L.O.I	۲۶/۷۸	۴۲/۲	۲۵/۱۶	۲۴/۱۹	۲۶/۲۲

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی کد نمونه: C.Z- 3.3	درصد وزنی کد نمونه: C.Z- 3.4	درصد وزنی کد نمونه: C.Z- 4.3	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-4.4	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-5.3
SiO2	۳۳/۵۱	۳۲/۳۱۶	۳۳/۴۶۴	۳۱/۷۸۵	۳۲/۰۳۲
Al2O3	۶/۵۴	۸/۵۹	۶/۹۸	۶/۳۴	۸/۲۴
Fe2O3	۴/۱۳۱	۵/۵۶۸	۵/۰۶۱	۴/۹۶	۵/۵۴۴
CaO	۲۱/۴۰۲	۱۸/۴۲	۱۹/۹۲۳	۲۰/۳۵۶	۱۹/۲۷۲
K_2O	۱/۴۷۵	۱/۹۰۳	۱/۶۷	۱/۵۲۱	۱/۸۸۵
MgO	۴/۶۲۵	۵/۵۲۹	۵/۸۸۴	۶/۲۰۴	۵/۲۰۹
TiO_2	۰/۴۸۱	۰/۵۵۱	۰/۶۳۴	۰/۶۰۲	۰/۵۷۶
MnO	۰/۰۶۸	۰/۰۸۳	۰/۰۷۹	۰/۰۸۳	۰/۰۷۶
P_2O_5	۰/۱۰۵	۰/۱۱۱	۰/۱۴۲	۰/۱۲۷	۰/۱۱۴
Na_2O	۱/۴۸۲	۱/۷۶	۰/۹۱۵	۱/۲۹۸	۱/۳۱۹
SO3	۱/۸۵	۰/۵۹	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۲۸
Cl	۰/۷۰	۰/۸۸	۰/۸۵	۱/۰۰	۱/۲۳
L.O.I	۲۲/۷۳	۲۳/۱۴	۲۴/۲۱	۲۵/۰۸	۲۴

ترکیب شیمیایی	درصد وزنی کد نمونه C.Z- 6.1	درصد وزنی کد نمونه: C.Z- 6.7	درصد وزنی کد نمونه: C.Z- 6.11	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-6.13	درصد وزنی کد نمونه: C.Z-7.1
SiO2	۳۱/۴۰۵	۳۴/۹۲۵	۲۹/۷۸۶	۲۹/۳۶۷	۲۸/۰۳۶
Al2O3	۵/۳	۷/۷۵	۵/۶۸	۶/۴۳	۸/۲۶
Fe2O3	۳/۴۳۴	۵/۳۱۶	۳/۲۶	۴/۴۶۵	۵/۴۸۵
CaO	۲۱/۸۴۶	۱۷/۹۹۳	۲۱/۹۹۵	۱۹/۶۳	۱۷/۲۵۷
K_2O	۱/۰۶۳	1.741	1.298	1.587	1.883
MgO	۳/۷۰۹	۵/۲۴	۴/۵۵۹	۴/۱۹۶	۵/۴۶۷

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

TiO_2	۰/۳۵۷	۰/۵۱۴	۰/۴۲۸	۰/۴۷۸	۰/۵۴
MnO	۰/۰۵۶	۰/۰۸۳	۰/۰۵۵	۰/۰۶۸	۰/۰۸۱
P_2O_5	۰/۰۸۷	۰/۱۰۵	۰/۱۰۸	۰/۰۹۵	۰/۱۱۴
Na_2O	۱/۳۹۳	۰/۷۵۷	۱/۷۹۵	۱/۳۴۷	۲/۱۵۷
SO3	۷/۸۷	۳/۰۷	۳/۳۲	۵/۶۰	۱/۱۱
Cl	۰/۸۶	۰/۴۹	۲/۰۷	۱/۳۷	۱/۷۵
L.O.I	۲۲/۳۹	۲۱/۲۲	۲۴/۹۱	۲۴/۲۵	۲۷/۷۵

ترکیب شیمیایی	**درصد وزنی کد نمونه:** C.Z- 7.2	**درصد وزنی کد نمونه:** C.Z- 7.5	**درصد وزنی کد نمونه:** C.Z- 8.2	**درصد وزنی کد نمونه:** C.Z-9.1	**درصد وزنی کد نمونه:** C.Z-9.3
SiO2	۳۱/۱۲۸	۳۳/۰۸۹	۳۱/۲۴۲	۳۲/۶۱۴	۳۶/۰۶۵
Al2O3	۷/۴۱	۷/۱۹	۷/۲۱	۷/۵۴	۷/۶۲
Fe2O3	۴/۳۰۶	۵/۹۵۷	۴/۷۶۴	۴/۴۸۷	۴/۸۷۴
CaO	۱۹/۲۴۹	۱۸/۷۴۴	۲۱/۵۲۴	۱۸/۹۷۹	۱۸/۹۶۹
K_2O	۱/۶۹۲	۱/۶۱۷	۱/۶۱۳	۱/۷۵۷	۱/۷۰۷
MgO	۵/۱۴۵	۵/۵۶۷	۵/۷۴۳	۵/۱۴۸	۵/۱۹۶
TiO_2	۰/۴۸۱	۰/۶۵۱	۰/۴۸۹	۰/۵۴۷	۰/۵۵۴
MnO	۰/۰۶۶	۰/۰۹۱	۰/۰۷	۰/۰۶۸	۰/۰۷۴
P_2O_5	۰/۱۲۶	۰/۱۱۶	۰/۱۰۷	۰/۱۰۷	۰/۱۰۹
Na_2O	۲/۴۴۷	۱/۷۸	۰/۲۶۲	۱/۱۶۱	۱/۰۱۲
SO3	۲/۱۲	۰/۵۱	۲/۲۸	۱/۰۱	۰/۲۷
Cl	۲/۱۲	۱/۱۵	۰/۰۳	۰/۹۶	۰/۵۱
L.O.I	۲۳/۲۷	۲۲/۹۹	۲۳/۷۲	۲۴/۶	۲۲/۲۲

به منظور مقایسه نتایج ترکیب شیمیایی خشت‌ها با استانداردهای ایران (میزان مناسب ترکیب شیمیایی خاک برای تهیه خشت) از (جدول ۱۰) استفاده شده است.

جدول ۱۰: میزان مناسب ترکیب شیمیایی خاک برای تهیه خشت بر اساس استانداردهای ایران (Askari, 1993)

شماره	**ترکیب شیمیایی**	**حد مطلوب**	**روش آزمایش**
۱	اکسید سیلیسیم SiO2	٪۶۰- ۴۰	استاندارد شماره ۸۶۱ ایران
۲	اکسید آلومینیم Al2O3	٪۲۱- ۹	استاندارد شماره ۸۴۸ ایران
۳	اکسید آهن Fe2O3	٪۱۲- ۳	استاندارد شماره ۸۴۹ ایران
٤	اکسید کلسیم CaO	ماکزیمم ٪۱۷	استاندارد شماره ۸۵۱ ایران
۵	اکسید منیزیم MgO	ماکزیمم ٪۴	استاندارد شماره ۸۵۱ ایران
٦	انیدرید کربنیک CO2	ماکزیمم ٪۸/۵	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران
۷	انیدرید سولفوریک SO3	ماکزیمم ٪۰/۵	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران
۸	کلریدهای سدیم و پتاسیم	ماکزیمم ٪۰/۱	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران
۹	افت وزن بر اثر سرخ شدن	ماکزیمم ٪۱۶	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

۷. بحث در یافته‌ها

یکی از دلایل تنوع رنگی خشت‌های استفاده شده در محوطه چغازنبیل می‌تواند بهره‌گیری از ذخایر مختلف خاک برای ساخت خشت‌ها باشد (لازم به توضیح است که برای بررسی طیف رنگی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند و رطوبت ظاهری، معیار قضاوت نخواهد بود). البته در صورت استفاده از برخی الیاف گیاهی در ساخت خشت‌ها نیز، تغییر رنگ ایجاد می‌شود. به طور مثال استفاده از الیاف جو و یا ماندگاری طولانی مدت آبخوره‌ای که از الیاف گندم در آن استفاده شده است، می‌تواند خشتی با رنگ متمایل به سبز ایجاد کند. رنگ سبز نشان دهنده احیاء شدن یون‌های آهن سه ظرفیتی در برابر مواد آلی است. یون‌های آزاد شده آهن توسط آب و رطوبت خارج شده و خشت سبز رنگ می‌شود (Zakavi, 2019B, p. 79).

بر اساس نمودارهای دانه‌بندی به دست آمده، بخش غیرماسه‌ای خشت‌ها را بیشتر ریزدانه‌های سیلت شامل می‌شوند (شکل ۶). بالاترین شاخص خمیری یا PI مربوط به نمونه C.Z -8.2 و کم‌ترین میزان PI مربوط به نمونه C.Z-1.10 است (جدول ۶). پتانسیل تورم نیز با استناد به اندیکس خمیری، در همه نمونه‌ها، در حد پایین است (جدول ۷). برخی از خاک‌ها دارای قابلیت تورم هستند به طوری که با جذب مقادیر زیاد آب افزایش حجم پیدا کرده و با از دست دادن آن انقباض شدیدی را به همراه خواهند داشت. پدیده تورم که یک پدیده برگشت‌پذیر است، تحت تأثیر عواملی همچون نوع کانی‌ها، ترکیب شیمیایی، دانه‌بندی، شرایط آب و هوایی محیط و خصوصیات خمیری خاک است (Hadian Dehkordi et al., 2001, p. 3). نتایج آزمایش‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهد که کلسیت و کوارتز بیشترین کانی‌های سازنده خشت‌های مورد مطالعه هستند. وجود کلسیت در خاک علاوه بر اینکه می‌تواند به عنوان یک عامل بازدارنده تورم و واگرایی ناشی از حضور کانی رسی قلمداد شود، می‌تواند موجب افزایش استحکام مصالح گلی نیز شود (Hadian Dehkordi, 2017, p. 93). خاک خشت‌های مورد مطالعه از سنگ مادرهایی منشأ گرفته‌اند که کمتر حاوی کانی‌های رسی هستند (جدول ۸).

وجود کانی باسانیت در نمونه C.Z-7.2، نشان دهنده ژیپس با نیم مولکول آب (H1 Ca1 O4.5 S1) است. این بدان معناست که ژیپس با دو مولکول آب (Ca S O4!2 H2 O) در اثر حرارت (بین ۱۱۰ تا ۱۷۰ درجه) آب خود را از دست داده و تبدیل به ژیپس با نیم مولکول آب شده است و علت آن وجود خرده آجر در بافت خشت است (جدول ۸) (Zakavi, 2019B, p. 82).

وجود کانی کلینوکلر در خشت‌های مورد مطالعه را می‌توان به ارث رسیده از مواد مادری دانست (جدول ۸).

وجود پیک گچ اولیه و گچ ثانویه در نمودارهای XRD خشت‌های محوطه تاریخی چغازنبیل، نشان دهنده استفاده از ذخایر رسی سازندی و آبرفتی برای تهیه آنها است (خاک‌های سازندی دارای پیک گچ اولیه و خاک‌های آبرفتی دارای پیک گچ ثانویه هستند)؛ بنابراین برای ساخت خشت‌ها هم از خاک‌های سازندی و هم از خاک‌های آبرفتی (رودخانه‌ای) استفاده شده است (شکل ۷) و (شکل ۸) (Zakavi, 2019B, p. 79).

نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که مقدار سیلیس و آلومین کمتر از حد مجاز و مقدار اکسید کلسیم بیشتر از حد مجاز استاندارد است (جدول ۱۰)، آنچه موجب چسبندگی و استحکام خشت‌ها شده است، وجود مقادیر قابل توجه کلسیت است. میزان یون کلر و سولفات در اکثر نمونه‌ها بیشتر از حد مجاز است (جدول ۱۰). نمک‌های کلرور (سدیم و پتاسیم) نقش مهمی در تورم و واگرایی خاک رس دارند زیرا یون‌های یک ظرفیتی مانند سدیم آماس بیشتری از یون دو ظرفیتی مثل کلسیم ایجاد می‌کنند. لذا خاک‌های آماس‌پذیر و خاک‌های واگرا، متأثر از وجود نمک در آنها در برابر رطوبت و آب مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند (Hadian Dehkordi, 2017, p. 90)؛ اما وجود کلسیت زیاد در نمونه‌ها می‌تواند به عنوان یک عامل بازدارنده تورم و واگرایی قلمداد شود. نمک‌های سولفات نیز می‌توانند در مجاورت رطوبت و در اثر پدیده نهان‌شکفتگی[5] موجب از بین رفتن چسبندگی و انسجام ساختار خشت شوند. آثار این پدیده و آسیب‌های وارد بر خشت‌های محوطه چغازنبیل مؤید این نکته است (Hadian Dehkordi, 2017, p. 96) (جدول ۹) و (جدول ۱۰).

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

تفاوت کاملاً چشمگیر درصدهای وزنی بخش گچی در خشت‌های محوطه به نوعی حاکی از کاربرد خاک‌های مختلف سازندی و آبرفتی از لحاظ محل تأمین برای ساخت خشت‌های تاریخی است (جدول ۱۰).

با توجه به ذخایر رسی اطراف محوطه تاریخی چغازنبیل و بررسی سطحی و ظاهری مصالح به کار گرفته شده در بنا و از طرفی امکانات حمل و نقل در گذشته، به سادگی می‌توان دریافت که در زمان ساخت این معبد و سازه‌های اطراف آن ایلامیان از خاک اطراف محوطه (خاک سازندی و آبرفتی) استفاده نموده‌اند. رنگ ظاهری و خواصی مثل شوره‌زنی، نرم فرسا بودن و اجزا تشکیل دهنده خاک مصرف شده (رس ـ ماسه) نمایانگر و ثابت کننده این مسئله است (Nabian et al., 2001, p.10).

ضمناً یک اصل منطقی و پذیرفته شده در معماری خشتی و گلی وجود دارد که در گذشته برای تأمین خاک، از نزدیک‌ترین محل، که خود جایگاه بنا بوده است، استفاده می‌کردند؛ بنابراین جغرافیای استفاده از خاک سازندی برای ساخت خشت‌های تاریخی می‌تواند محدوده‌ای به مرکزیت زیگورات تا حوالی حصار سوم باشد؛ اما تکلیف جغرافیای استفاده از خاک آبرفتی مشخص است و بی‌شک حاشیه رودخانه دز بوده است.

۸. نتیجه‌گیری

با شناختی که از خشت‌های تاریخی محوطه چغازنبیل به دست آمده، مشخص شد که تفاوت فاحشی بین نمونه خشت‌های تاریخی است. به طوری که برای ساخت خشت‌ها هم از خاک رودخانه‌ای و هم از خاک سازندی استفاده شده است. همچنین قابل درک است که خشت‌های تاریخی در بعضی از موارد با استانداردهای رایج برای تهیه خشت فاصله دارند؛ اما می‌توان با استفاده از خاک رودخانه‌ای یا خاک سازندی و رعایت قواعد مربوط به آماده‌سازی خاک، عمل‌آوری گل، قالب‌گیری و خشک کردن، به خشت‌های مرمتی بهینه با رفتارهای مکانیکی ارتقاء یافته‌ای رسید. از آنجایی که دانه‌بندی خاک نقش بسزایی در تهیه خشت بهینه دارد، خاک‌های رودخانه‌ای و سازندی با دانه‌بندی مناسب، در صورت اختلاط با ماسه و کاه (برای کنترل ترک‌خوردگی خشت‌ها) که در مجاورت با رطوبت دستخوش تغییرات قابل ملاحظه‌ای نمی‌گردند و با عمل‌آوری مطلوب قادرند رفتارهای مکانیکی خشت مرمتی تهیه شده را بهبود بخشند.

سپاسگزاری

مقاله حاضر نتیجه چند سال تحقیق و پژوهش در پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل است. از این رو از پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل برای در اختیار نهادن شرایط لازم سپاسگزاری می‌شود.

مشارکت نویسندگان

سهیلا ذکوی: مفهوم‌سازی، تحلیل داده‌ها، روش‌شناسی، منابع، نرم‌افزار، تهیه پیش‌نویس اصلی مقاله و بررسی و ویرایش. افشین ابراهیمی: مدیریت پروژه، مدیریت داده‌ها، نظارت و اعتبارسنجی.

پی‌نوشت‌ها

۱. دانه‌بندی: جداسازی دانه‌های خاک در اندازه‌های مختلف، که هر بخش از این دانه‌ها درصدی از کل نمونه است.

۲. حد روانی: حد روانی درصد آب لازم برای قرارگیری خاک بین حالت خمیری و روانی است.

۳. حد خمیری: حد خمیری درصد آب لازم برای قرار گرفتن خاک در حالت خمیری و نیمه جامد است.

۴. اندیکس یا شاخص خمیری: شاخص خمیری اختلاف بین حد روانی و حد خمیری (PI= PL- LL) است که نشانه تمایل خاک به چسبندگی و خمیری شدن خاک است.

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

۵. نهان‌شکفتگی: تبلور نمک‌ها در زیر لایه سطحی یا داخل خلل و فرج مواد را نهان‌شکفتگی می‌گویند. فشار حاصل از این پدیده می‌تواند به جدا شدن لایه‌های سطحی از بدنه یا افزایش تخلخل منجر شود.

References

Aflaki, E. (1995). Soil Mechanic Laboratory. Parham. [in Persian]

افلاکی، اسماعیل. (۱۳۷۴). آزمایشگاه مکانیک خاک. انتشارات پرهام.

Askari, F. (1993). Inflation Divergence of the Soils. Tehran: jahad-e Daneshgahi. [in Persian]

عسکری، فرج‌الله. (۱۳۷۲). تورم و واگرایی خاک‌ها. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.

Ebrahimi, A. (2001). Field-Laboratory Study of the Role of Ecological Products in the Stabilization and Consolidation of Mud brick and Kah-gel plaster (A Case Study of Choghazenbil), p. 144, 145. [in Persian]

ابراهیمی، افشین. (۱۳۸۰). مطالعه میدانی–آزمایشگاهی نقش فرآورده‌های بوم آورد در تثبیت و استحکام‌بخشی خشت خام و اندود کاهگل (مطالعه موردی ذیقورات چغازنبیل)، ص. ۱۴۴ و ۱۴۵.

Ebrahimi, A. (2003). Researches on Mud- Brick and Straw- clay in Choga Zanbil Word Heritage Site. Pre- Print of Papers 9 the International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture. Deputy of Presentation, Iranian Cultural Heritage Organization (ICHO), p. 32. [in Persian]

ابراهیمی، افشین. (۱۳۸۲). مطالعات متمرکز بر خشت خام و اندود کاهگل در محوطه ثبت جهانی چغازنبیل. پیش چاپ مقالات نهمین کنفرانس بین‌المللی مطالعه و حفاظت معماری خشتی. معاونت معرفی و آموزش، سازمان میراث فرهنگی کشور، ص. ۳۲.

Eftekharhan, L., Titidej, O., Khakbaz, B., Sarang, A., Sadeghian, P., MihanRousta, R., & Navari, M. (1998). Soil Mechanic Laboratory. Hormozgan University Press. [in Persian]

افتخاریان، لیلا. تی‌تی‌دژ، امید. خاکباز، بهناز. سارنگ، امین. صادقیان، پدرام. میهن‌روستا، رضا. نواری، مهدی. (۱۳۷۷). آزمایشگاه مکانیک خاک. انتشارات دانشگاه هرمزگان.

Ghirshman, R. (1994). T Choga Zanbil (Dur- Untash). Volume.1 LA Ziggurat. p. 23. [in Persian]

گیرشمن ر. (۱۳۷۳). چغازنبیل (دور– انتاش). جلد اول زیگورات. پاییز، ص. ۲۳.

Hadian Dehkordi, M., Madani, B., Zakavi, S., & Mohzi, M. (2001). Studies on clay soils of the Choghaznil area, p. 30. [in Persian]

هادیان‌دهکردی، منیژه. مدنی، بیگم. ذکوی، سهیلا. مستانه، معزی. (۱۳۸۰). مطالعات انجام شده روی خاک‌های رسی منطقه چغازنبیل، ص. ۳۰.

Hadian Dehkordi, M. (2009). Application of Scientific Investigations in Conservation and Restoration of Historical Buildings (Building Materials). University of Tehran Publications Institute and Institute for Conservation and Restoration of Historical, Cultural Works. [in Persian]

هادیان‌دهکردی، منیژه. (۱۳۸۸). کاربری پژوهش‌های آزمایشگاهی در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی (مواد و مصالح). مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران و پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی، فرهنگی.

Hadian Dehkordi, M. (2017). Pedological Studies on Historical and Ancient Earthen Materials in Different Regions of Iran. Scintific, & Technical and Art Quarterly Athar 75. \p. 90, 93, 96. [in Persian]

هادیان‌دهکردی، منیژه. (۱۳۹۵). مطالعات خاک‌شناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران. فصلنامه علمی فنی، هنری اثر ۷۵. ص. ۹۰، ۹۳، ۹۶.

Nabian, A., Malak Abbasi, A., Hadian Dehkordi, M., & Banae, R. (2001). Soil Studies in the Choghaznebil Area, p.10. [in Persian]

نبیان، احمد. ملک‌عباسی، علی. هادیان‌دهکردی، منیژه. بنا، رحیم. (۱۳۸۰). مطالعات خاک‌شناسی در منطقه چغازنبیل، ص. ۱۰.

Pedram, B., & Ebrahimi, A. (2017). Structural and physical characteristics of the Adobe Bricks Used at the World Heritage Site of Arg-e Bam. Journal of Research on Archaeometry. [in Persian]

پدرام، بهنام. ابراهیمی، افشین. (۱۳۹۶). بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت‌های به کار رفته در محوطه میراث جهانی ارگ

[DOI: 10.52547/jra.9.2.388]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 10:11 +0330 on Wednesday June 10th 2026

بم. پژوهه باستان‌سنجی (علمی- پژوهشی).

Talbian, M. H. (2006). Conservation and Restoration Experiences in Chogazanbil. Proceedings of the Fifth Conference on Conservation and Restoration of Historical-Cultural

Objects and Architectural Decorations 2002, Tehran: Resaneh Pardaz and institute for the preservation and restoration of historical-cultural monuments, p. 17,18. [in Persian]

طالبیان، محمدحسن. (۱۳۸۵). تجارب حفاظت و مرمت در چغازنبیل. مجموعه مقالات پنجمین همایش حفاظت و مرمت اشیاء تاریخی- فرهنگی و تزیینات وابسته به معماری بهمن ۱۳۸۰، تهران: رسانه پرداز و پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی- فرهنگی، ص. ۱۷ و ۱۸.

Zakavi, S. (2019A). Investigtion of the clay resources in chogazanbil area for preparation of the mud bricks optimized for the restoration purposes. Journal of Research on Archaeometry, p.36, 37. [in Persian]

ذکوی سهیلا. (۱۳۹۸). مطالعه و بررسی ذخایر رسی در اطراف منطقه چغازنبیل در راستای تهیه خشت مرمتی بهینه. پژوهه باستان‌سنجی (علمی- پژوهشی)، ص. ۳۶، ۳۷.

Zakavi, S. (2019B). Pathology of mudbrick in Choghazanbil historical area and preparing optimized mudbrick using clay resources in historical mudbricks to restoration the historical area, p.35, 36, 79, 81, 82. [in Persian]

ذکوی سهیلا. (۱۳۹۸). آسیب‌شناسی خشت در محوطه تاریخی چغازنبیل و تهیه خشت بهینه با بکار گیری ذخایر رسی مورد استفاده در خشت‌های تاریخی برای مرمت محوطه تاریخی، ص.۳۵ و ۳۶، ۷۹، ۸۱، ۸۲.