



Original Paper

Investigation of the clay resources in Chogazanbil area for preparation of the mud bricks optimized for the restoration purposes



Soheila Zakavi *

M.A. of Conservation-restoration, Head of laboratory, Choghazanbil and Haft Tappeh world heritage department, Khuzestan, IRAN

Received: 11/06/2019

Accepted: 13/10/2019

Abstract

The largest known architectural work of Ilam civilization is the temple of Choghazanbil from Medieval period, in Southwestern Iran (Khuzestan Province), dated to the 13th century BC. The temple has been made by terrestrial soil that has been taken, along riverbanks whose water content is unlimited, indicating wood for directional burning various uses, especially brick firing (and suitable soil for the production of bricks and mortar). That was done however more or less the same as today. The largest volume consumption of materials in Choghazanbil was based on clay that is a major element in the construction of architectural structures. The major architectural elements of historic site of Choghazanbil were bricks and adobe that have been covered in past marbles, but have become dull as time goes by. This research undertake for identifying appropriate clay reserves for optimal restoration purposes of the monuments. The material has been studied quantitatively and qualitatively by physical and chemical methods, in order to clarify what are the affecting factors for selection the best clay based soil for optimal restoration. In this regard, geological formation around Chogazanbil have been studies based on the previous research and in the highlighted locals as A, B, C, D, E, G. Investigations on alluvial deposits of R1, R2 carried out by XRD, XRF, grading, hydrometric and Aterberg boundary. Based on the obtained diagrams, the non-sandy soils contain most of the silty fine grains. This will assume the highest paste index or PI corresponds to sample C and the lowest PI to sample R1. Inflation potential was also found in pastures B, D, E, R1, R2 based on paste index. However, the swelling potential of C and G3 mines was moderate. The results of mineralogical experiments showed that calcite and quartz are the most minerals in the studied soils samples. Calcite in the soil, besides being a deterrent to inflation and divergence due to the presence of clay minerals, can also increase the strength of clay materials. The soils were poor quality in terms of high quality clay minerals such as kaolinite and montmorillonite. XRD analyses show that the amount of silica, in sample E is optimal for clay preparation. This effect makes the clay with high adhesion and strength coefficient produced by calcite. The amount of chlorine and sulfate ions in the soils of B, C, D, E, and G3 areas were also higher than the permitted amount. Sodium and potassium chloride have an important role in swelling and divergence of clay because of monovalent ions in their crystal chemistry. Indeed the soils were divergent soils, due to their salt content and therefor, show little resistance to humidity and water. Discriminating of that, excessive calcite in the samples can be considered as a deterrent agent for rapid inflation. Sulfate can also cause adhesion in the vicinity of moisture and by the latent phenomenon of fracture. The coherence factor of clay structures can effects of this phenomenon and probably most damages on the clay based structure of the Choghazanbil area are the result of this point. Based on the results obtained, the soils reservoirs around Choghazanbil are far from common daily standards for norm brick making, but after refining and valuable preparation, followed by processing, molding and drying can optimally have better mechanical behavior and

* Corresponding author: zakavi105@gmail.com

might be reused for construction. Moreover, the soils samples from R2 and G3 have appropriate grain size than other soils around the area. In this case of study, the best recipes can be achieved by mixing this kind of soil with sand and straw for avoiding the cracks, which had considerable deterioration factor in the vicinity of the humidity and moisture. Optimum handling and processing of the clays from R2 and G3 areas are capable to improve the mechanical behavior of the repaired clay for reusing in the restoration of Choghazanbil.

Keywords: Choghazanbil, Clay resources, Restoration mud brick, XRD, XRF





CrossMark

مطالعه و بررسی ذخایر رسی در اطراف منطقه چغازنبیل

در راستای تهیه خشت مرمتی بهینه

سهیلا ذکوی*

دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت آثار تاریخی و فرهنگی، آزمایشگاه پایگاه میراث جهانی چغازنبیل، خوزستان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۱

چکیده

برای ساخت مجموعه بناهای محوطه تاریخی چغازنبیل، بزرگ‌ترین اثر معماری شناخته شده از تمدن ایلام میانه در جنوب غربی ایران (استان خوزستان) مربوط به قرن ۱۳ ق. م، امتیازات مساعد محیطی کاملاً به خدمت گرفته شده‌اند، در سواحل رودی که مقدار آب آن نامحدود نشان می‌دهد چوب برای سوزاندن جهت مصارف مختلف (به‌ویژه کوره‌های آجرپزی) و خاک مناسبی برای تولید خشت و آجر و ملات در اختیار بوده است به‌گونه‌ای که امروزه نیز کم‌وبیش چنین است. مشخصاً در محوطه تاریخی چغازنبیل بیشترین حجم مصرف مصالح را خشت تشکیل داده است که عنصر اصلی در برپایی سازه‌های معماری به‌استثنای 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 آسیب‌دیده‌اند. در نتیجه این آسیب‌دیدگی 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. این تحقیق با رویکرد کاربردی به دنبال شناخت ذخایر رسی مناسب برای تهیه خشت مرمتی بهینه در اطراف محوطه چغازنبیل است و می‌کوشد بر پایه روش‌های کمی و کیفی (فیزیکی، شیمیایی) پاسخگوی سؤال اصلی یعنی چستی عوامل مؤثر در انتخاب خاک مناسب برای تهیه خشت مرمتی بهینه باشد. در این راستا ذخایر سازندی اطراف محوطه چغازنبیل که در گذشته بررسی شده بودند مورد مطالعه و بررسی و ذخایر آبرفتی مورد آزمایش (XRF، XRD، دانه‌بندی، هیدرومتری و حدود آتربرگ) قرار گرفتند و مطلوب‌ترین ذخایر (R2 و G3) برای تهیه خشت مرمتی انتخاب شدند.

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

* مسئول مکاتبات، خوزستان، شوش دانیال، هفت‌تپه، موزه هفت‌تپه، بخش شناخت مواد و مصالح و مطالعات آزمایشگاهی

پست الکترونیکی: zakavi105@gmail.com

«این نشریه با احترام به قوانین اخلاق در نشریات تابع قوانین کمیته اخلاق در انتشار (COPE) است و از آیین‌نامه اجرایی قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در آثار علمی پیگیری می‌نماید.»

۱. مقدمه

شهر باستانی دوران‌تاش یا چغازنبیل که از مهم‌ترین شواهد باقی مانده در تمدن ایلام و زیگورات واقع در مرکز آن جزء بزرگ‌ترین زیگورات‌های جهان است، در ۴۰ km جنوب شرقی شوش مشرف به رود دز در استان خوزستان در ایران واقع شده 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 h در اواخر قرن ۱۴ ق. م طی یک دوره بیش از ۴۰ سال توسط پادشاه ایلامی اون‌تاش ناپریشا ساخته شد.

شهر 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، برپا شده است.

در فاصله بین حصار درونی و میانی که گریشمن (کاوشگر چغازنبیل) از آن به عنوان تمنوس یا محله مقدس نام برده است، ساختارهای معماری زیادی وجود دارد که بر اثر گذشت زمان و شسته شدن توسط آب باران آسیب دیده‌اند. بین حصار میانی و بیرونی نیز ساختارهای تاریخی دیده می‌شود [1].

خشت، عنصر اصلی و بیشترین حجم مصرف مصالح راه، در ساخت بنای زیگورات و دیگر ساختارهای معماری موجود در مجموعه تاریخی چغازنبیل به خود اختصاص داده است [2]. با آنکه سطح عمده خشت‌های تاریخی با اندود کاهگل و یا دیواره‌های خشتی مرمتی، در مرمت‌های گذشته پوشیده شده است لیکن در نتیجه آسیب دیدگی 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.

با توجه به ذخایر رسی اطراف محوطه تاریخی چغازنبیل و بررسی سطحی و ظاهری مصالح بکار

گرفته شده در بنا و از طرفی امکانات حمل‌ونقل در گذشته، به‌سادگی می‌توان دریافت که در زمان ساخت این معبد و سازه‌های اطراف آن از خاک اطراف محوطه استفاده نموده‌اند.

لازم به ذکر است که در سال‌های اولیه شروع فعالیت پایگاه میراث جهانی چغازنبیل مطالعات گسترده‌ای در رابطه با خاک‌شناسی منطقه جهت تهیه خشت مرمتی انجام شده، که نتیجه آن انتخاب و معرفی نوعی خاک سازندی است (این معدن در جنوب شرقی زیگورات چغازنبیل و تقریباً در فاصله یک کیلومتری از آن قرار دارد).

اما از آنجایی که ایلامیان برای ساخت خشت‌های تاریخی چغازنبیل هم از خاک‌های سازندی و هم آبرفتی استفاده نموده‌اند، و حفظ اصالت و یکپارچگی در مواد و مصالح بنا مدنظر است، برای بهینه‌سازی خشت خام، به عنوان راهکار منطقی حفاظت، با هدف کاربرد مستقیم در امر مرمت، بررسی خاک‌های آبرفتی نیز امری لازم و ضروری است.

۲. پیشینه پژوهش

تقریباً تمام خشت‌های مرمتی استفاده شده در زمان کاوش بافتی متمایز از نمونه‌های کهن دارند. خشت‌های مرمتی استفاده شده در این دوره نسبت به نمونه‌های به‌کاررفته در سال‌های پس از کاوش (تا قبل از شروع فعالیت پایگاه چغازنبیل)، از کیفیت مرغوب‌تری برخوردارند و در مواجهه با عوامل فرساینده محیطی کمتر متحمل آسیب شده‌اند. در زمان پس از کاوش تا قبل از شروع فعالیت پایگاه میراث جهانی چغازنبیل، گرچه تلاش‌های پراکنده و خیرخواهانه‌ای در خصوص حفاظت و مرمت به‌عمل آمده اما به دلیل آنکه هیچ‌گونه پشتوانه علمی در برنداشتند، نتوانستند آن‌چنان که باید، مثمر ثمر واقع شوند. به همین دلیل یکی از اهداف پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل بر این اصل بنیان نهاده شده که در کنار تجربه‌های محلی سازنده، روش‌های علمی و نوین حفاظت نیز دخالت داده شوند تا از تلفیق آن‌ها با یکدیگر بهترین بازدهی ممکن عاید گردد. اوج

در سال‌های گذشته به منظور رسیدن به خاک مناسب، جهت تولید خشت مرمتی، مناطقی را در اطراف چغازنبیل، که توجیهی جهت نمونه‌برداری آن‌ها بود انتخاب و نمونه‌های لازم تهیه گردید (با تشخیص گروه زمین‌شناسی و بخش شناخت مواد و مصالح و مطالعات آزمایشگاهی پایگاه میراث جهانی چغازنبیل). آنالیز این نمونه‌ها کمک نمود تا شناسایی لازم از خاک موردنیاز به عمل آمده آید. اما نکته حائز اهمیت در آن زمان حد و آستانه اقتصادی معدنی بود که جهت تأمین خاک مصرفی جهت حفاظت و مرمت در چغازنبیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بدان دلیل بود که هدف از آماده‌سازی این معدن جهت برداشت‌های مداوم و طولانی مدت از این خاک بود. یعنی آنکه در درجه اول این خاک می‌بایست به نحوی انتخاب می‌گردید که ذخیره‌ای داشته باشد که در طی چند ده سال آینده نیز توانایی تأمین خاک مصرفی کارگاه مرمت چغازنبیل را دارا بوده و تغییر در کمیت و کیفیت آن مشاهده نگردد. در درجه دوم مراتب و مسائل مالی معدن بود که مهم جلوه می‌نمود.

اگر معدن انتخاب شده در محلی دور از دسترس بود و برای برداشت و حمل آن تا کارگاه مسافت زیادی طی می‌شد، هم از جهت مالی به صرفه نبود و هم از نظر مسائل زیست‌محیطی و ترافیکی توجیه‌پذیر نبود. لذا هر چه این فاصله محدودتر و در نزدیکی اطراف مجموعه تاریخی باشد بهتر و مقرون به صرفه‌تر است. از طرفی نظارت بر کار برداشت معدن، حفاظت از معدن، تأمین راه‌های دسترسی نیز توجیه مسئله نزدیکی به کارگاه را بیشتر می‌نمود. در همین راستا شش معدن مختلف برای نمونه‌برداری در اطراف چغازنبیل انتخاب شد.

از شش معدن انتخاب شده برای نمونه‌برداری، معادن (A، B، C) عضو لهبری و (D، E، G) سازند آغاچاری هستند که همگی جزء خاک‌های دامنه‌ای محسوب می‌شوند.

موقعیت معادن و کد نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است.

از آنجایی که ایلامیان برای ساخت خشت‌های تاریخی چغازنبیل هم از خاک‌های سازندی و هم آبرفتی استفاده نموده‌اند [5] و امکان دسترسی به خاک‌های

این تلاش، کوششی است که در جهت بهینه‌سازی مصالح جدید مرمتی در قالب مطالعات آزمایشگاهی - میدانی عینیت یافته است [3]. از این رو مبحث شناسایی ذخایر رسی در اطراف محوطه تاریخی برای تهیه خشت مرمتی تا قبل از شروع فعالیت پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل به هیچ وجه مورد مطالعه قرار نگرفته است. و نتایج ارائه شده در این مقاله کلیه اطلاعات موجود در این زمینه است.

۳. بررسی ذخایر رسی در اطراف محوطه تاریخی چغازنبیل در راستای تهیه خشت مرمتی

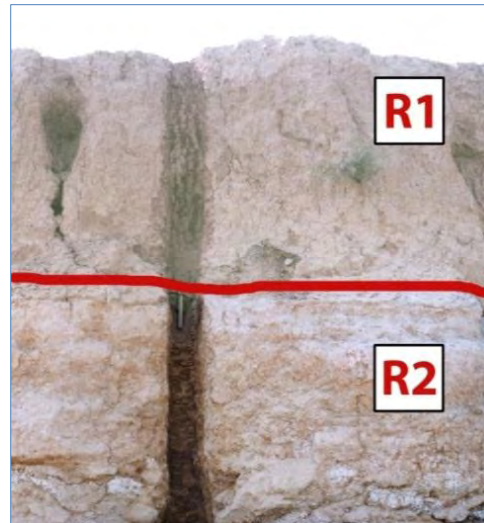
ذخایر رسی استان خوزستان را می‌توان به دو دسته رس‌های دامنه‌ای (سازند آغا جاری، عضو لهبری) و رس‌های آبرفتی (حمل شده توسط رودخانه‌ها) تفکیک نمود. رس‌های دامنه‌ای از فرسایش شیمیایی سنگ‌ها به وجود آمده‌اند و رسوبات حاصل از آن‌ها در دامنه کوه‌ها و تپه‌ها انباشته گردیده‌اند. این رس‌ها به لحاظ دانه‌بندی، ناهمگون‌تر و درشت‌تر از سایر خاک‌های رسی بوده، 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 جابجا شده‌اند. این رس‌ها از بافتی ریز و همگن برخوردار هستند و برای مصارف ساختمانی از جمله تهیه خشت و آجر، مناسب تشخیص داده شده‌اند.

با توجه به ذخایر رسی اطراف محوطه تاریخی چغازنبیل و بررسی سطحی و ظاهری مصالح بکار 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 از خاک اطراف محوطه استفاده نموده‌اند. رنگ ظاهری و خواصی مثل شوره‌زنی، نرم فرسا بودن و اجزا تشکیل دهنده خاک مصرف شده (رس - ماسه) نمایانگر و ثابت کننده این مسئله است. بدین منظور با شناخت از این مقوله شروع به بررسی در محدوده اطراف مجموعه تاریخی چغازنبیل گردید [4].

۴. مواد و روش‌های مطالعاتی

و از آبرفت های جوان این ناحیه که در شمال شرقی

آبرفتی را نیز به راحتی داشته‌اند لذا از حاشیه رودخانه در



نقشه ۱: نقشه پراکندگی معادن بررسی شده، بر روی عکس ماهواره‌ای از منطقه چغازنبیل

Map 1: Dispersion map of the investigated mines, on the satellite image of Chaghazanbil

شکل ۱: معادن R1, R2

Fig. 1: Mines R1, R2

از کمپانی PHILIPS با تیوب مس با حداکثر اختلاف پتانسیل 40Kv و حداکثر جریان 30mA و با استفاده از نرم افزار X'Pert HighScore بر روی دو نمونه خاک در آزمایشگاه شرکت دانش بنیان بیم گستر تابان انجام گرفت. آنالیز این نمونه‌ها کمک به شناسایی خاک‌ها کمک نمود. مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها در جدول ۲ معرفی گردیده است.

۵. نتایج

۱) معدن A در همان ابتدا از دایره انتخاب حذف گردید، به دلیل اینکه برای دسترسی به معدن A می‌بایست تخریب محیط زیست و تغییر شکل در محیط اطراف محوطه تاریخی صورت می‌گرفت.

۲) در توزیع دانه بندی خاک‌ها تفاوت‌هایی دیده می‌شود. به طوری که در خاک‌های سازندی، نمونه G3 و E و در خاک‌های آبرفتی، نمونه R2 ریزدانه تر هستند (جدول ۴، ۳).

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

بر اساس استاندارد ۱۱۶۲ ایران (ویژگی فیزیکی

محوطه چغازنبیل، که حدوداً در فاصله ۱ کیلومتری از محوطه تاریخی قرار دارند نمونه برداری شد. البته به دلیل تفاوت ظاهری مانند: جنس، رنگ و بافت خاک، به دو لایه R1 و R2 تفکیک گردید (شکل ۱). سپس آزمون‌های شیمیایی و فیزیکی بر روی نمونه‌های انتخابی انجام شد.

در همین راستا آزمایش‌های فیزیکی، دانه بندی^۱ (استفاده از الک‌های سایز ۳۰-۵۰-۱۰۰-۲۰۰) هیدرومتری (استفاده از هیدرومتر) و حدود آتبرگ (استفاده از دستگاه کاساگرانده) بر روی ۷ نمونه خاک سازندی و آبرفتی، در آزمایشگاه میراث جهانی چغازنبیل و آزمایش‌های شناسایی ترکیبات شیمیایی نمونه‌های سازندی، آنالیز عنصری و XRD (به روش پودری استفاده از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس مدل 3000T2T از کمپانی SEIFERT با تیوب مس با حداکثر اختلاف پتانسیل 40Kv و حداکثر جریان 30mA) بر روی ۵ نمونه خاک، در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی و آزمایش‌های شناسایی ترکیبات شیمیایی نمونه‌های آبرفتی XRF (به روش پودری استفاده از دستگاه طیف سنجی فلوتورسانس اشعه ایکس مدل PW 1410 از کمپانی PHILIPS) و XRD (به روش پودری از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس مدل PW 1730 از دستگاه پراش سنج پرتو ایکس مدل PW 1730 سال پنجم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۸

خاک مناسب برای تهیه خشت) (جدول ۵) در نمونه B میزان مانده روی الک نمره ۱۰۰ بیشتر از حد مجاز است.

جدول ۱: موقعیت معادن و کد نمونه‌ها [4]

Table 1: Mines location and Samples code

Sample code	Mines location	Mine code
A	در گوشه شرقی حصار بیرونی چغازنبیل، بر روی تپه‌ماهورهای این منطقه واقع شده است It is located on the eastern side of the outside border of Chaghazabil, on the heights of this area	A
B	در قسمت شرق - جنوب شرق محوطه تاریخی چغازنبیل، در حدود ۱ km از آن قرار دارد It is located on the eastern side-the south east of the historical Chaghazanbil area, about 1 km from it	B
C	در جاده سپاه واقع در شمال - شمال غرب حصار بیرونی و مجدداً در بخش تپه ماهوری قرار دارد It is located on the Sepah road in the north-North west of the outside boundary and is also located on the heights.	C
D	در قسمت جنوب - جنوب غربی محوطه تاریخی و در حدود ۱ km از حصار بیرونی قرار دارد It is located on the south- south east of historical area and about 1 km from the outside boundary.	D
E	در جنوب شرقی - جنوب محوطه تاریخی چغازنبیل قرار دارد. فاصله آن تا حصار بیرونی شهر در حدود ۲/۵ km است It is located on the south east- the southern part of the historical Chaghazanbil area. Its distance from the outside boundary of the city is about 2/5 km	E
G3	در حدود ۱ km جنوب شرقی زیگورات و در پشت حصار سوم واقع شده است It is located about 1km from the south east of Zigorat, behind the third boundary	G3
R1	در شمال شرقی چغازنبیل و در حدود ۱ km از محوطه تاریخی قرار دارد It is located on the north eastern part of Chaghazanbil and about 1 km from the historical area	R1
R2	در شمال شرقی چغازنبیل و در حدود ۱ km از محوطه تاریخی قرار دارد It is located on the north eastern part of Chaghazanbil and about 1 km from the historical area	R2

جدول ۲: روش‌های مورد استفاده در تحقیق [6-9]

Table 2: Test methods used in the research

Test sets	Standard	Aim	Sample preparation method	Test title
دستگاه کاساگرانده دستگاه اون Casagrande and oven sets	AASHTO T89-68 ASTM D423-66 AASHTO T90-70 ASTN D424-59	تخمین پتانسیل تورم Estimation of inflation potential	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	اندازه‌گیری حدود آتبرگ Measurement of the Atterberg limits
الک‌های مش ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ دستگاه اون Sieves of 30, 50, 100, 200 Sizes and the oven set	ASTM D 422-87 AASHTO 88-81	اندازه‌گیری بخش ماسه‌ای و غیر ماسه‌ای به صورت توأمان To measure the sand non-sand parts	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	توزیع دانه بندی به روش تر Distribution of the grading by wet method
الک‌های مش ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ دستگاه اون هیدرومتر Sieves of 30, 50, 100, 200 Sizes and the oven set hydrometer	ASTM D 421-58 & D 422-63 AASHTO T 87-86 & T 88-90	جداسازی بخش ماسه‌ای و غیر ماسه‌ای (رس و سیلت) به تفکیک Separation of sand and non-sand (clay) parts	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	توزیع دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری Distribution of the grading by sieve and hydrometric method

Test sets	Standard	Aim	Sample preparation method	Test title
PHILIPS PW 1730 and SEIFERT 3000T2T	-	شناسایی فازهای اصلی و فرعی به صورت نیمه کمی Recognition of the main phases and sub-phases in a semi-quantitative manner	آسیاب کردن نمونه، تهیه قرص و ارد کردن در دستگاه Grinding the sample and creation of a tablet and inputting it into the set	تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRD Adjustment of the chemical component by XRD method
PHILIPS PW 1410	-	شناخت ترکیب شیمیایی عنصری به صورت کمی Recognition of the elements of the chemical component in a quantitative manner	آسیاب کردن نمونه، تهیه قرص و ارد کردن در دستگاه Grinding the sample and creation of a tablet and inputting it into the set	تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF Adjustment of the chemical component by XRF method
دستگاه اون، هیترت، مگنت، کوره الکتریکی Oven, magnet heater, electric furnace	ASTM C471-91 ASTM C114-77	اندازه‌گیری افت حرارتی، درصد اکسید عناصر مختلف و میزان یون کلرور Temperature drop measurement, the percentage of the oxidation of different elements and the amount of chlorine ion	مطابق با استاندارد مربوطه According to the related standards	آنالیز عنصری Adjustment of the chemical components by element method

جدول ۳: توزیع دانه‌بندی به روش تر

Table 3: Grading distribution by wet method

کد نمونه Sample code	درصد رس و سیلت percentage OF Clay and silt	درصد ماسه Percentage of sand (درصد مانده روی الک): (Percentage of remained on the sieve):				جمع کل Total
		مش ۳۰ Mesh 30	مش ۵۰ Mesh 50	مش ۱۰۰ Mesh 100	مش ۲۰۰ Mesh 200	
B	71.02	4.39	3.58	8.30	11.69	98.98
C	83.2	1.37	0.98	5.42	10.61	101.94
D	86.52	0.90	0.48	3.33	9.24	100.47
E	97.15	0.61	0.91	0.20	2.47	101.34
G3	97.59	0.70	1.15	0.38	1.71	101.53
R1	84.79	0.54	0.54	2.99	11.14	100
R2	90.37	0.29	0.63	2.24	6.47	100

جدول ۴: توزیع دانه‌بندی به روش الک/هیدرومتری

Table 4: Grading distribution by sieve/hydrometric method

کد نمونه Sample code	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۷۵mm Percentage of the particles larger then 0.075 mm	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۳mm Percentage of the particles larger then 0.03 mm	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۰۵mm Percentage of the particles larger then 0.005 mm	درصد ذرات بالاتر از ۰/۰۰۱mm Percentage of the particles larger then 0.001
B	11.7	73	88	89/5
C	10.6	35	61	75.8
D	9.2	59	75	83
E	2.5	42	62	70.7
G3	1.7	38	62	73.7
R1	11.1	31	74	82.4
R2	6.5	19	64	77.6

جدول ۵: ویژگی فیزیکی خاک مناسب برای تهیه خشت بر اساس استاندارد ایران [10]

Table 5: physical character of the suitable soil for adobe production on the standard of Iran

نوع آزمایش Test type	حد مطلوب Desired amount	روش آزمایش Examination standard
مانده روی الک ۱۴۹ میکرونی (۱۰۰ مش)، %wt Remained on the 149 micron sieve	Max 7.5	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
حد حالت روانی Liquid limit	-	استاندارد ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
حد حالت خمیری Plastic limit	17- 30	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran

نتایج مربوط به اندازه‌گیری حدود آتربرگ و دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری برای خاک‌ها نشان می‌دهد که در همه‌ی نمونه‌ها درصد ذرات رس (کوچکتر از ۲ میکرون) بسیار اندک است (جدول ۶) یا به تعبیر دیگر، بخش غیر ماسه‌ای خاک‌ها را بیشتر ریز دانه‌های سیلت شامل می‌شوند (شکل ۲). پتانسیل تورم نیز با استناد به اندیکس خمیری^۴ (جدول ۷)، در خاک‌های معادن B, D, E, R1, R2 در حد پایین و پتانسیل تورم خاک‌های معادن C, G3 در حد متوسط است.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، اجزای اصلی خاک‌ها را کلسیت و کوارتز تشکیل داده‌اند. هرچه مقدار کلسیت در خاک کمتر باشد برای تهیه خشت و آجر مناسب‌تر خواهد بود. با این وجود چنانچه کلسیت به‌صورت پودر و به‌طور یکنواخت در خاک پخش شده باشد حتی در نسبت‌های زیاد هم (گاه تا ۳۰ درصد) مشکل خاصی را برای تهیه خشت ایجاد نمی‌کند. به‌عکس زمانی که کلسیت در خاک به‌صورت کلوخه‌ای وجود داشته باشد در حضور رطوبت دردرساز خواهد بود. ضمناً وجود کلسیت زیاد در نمونه‌ها می‌تواند به‌عنوان یک عامل بازدارنده تورم و واگرایی ناشی از حضور کانی رسی قلمداد شود (نمونه: خشت‌های تاریخی چغازنبیل)، (برخی از خاک‌های رس در طبیعت در تماس با آب به‌سرعت شسته شده و فرسایش می‌یابند. وجود یون‌های سدیم در لایه‌های میانی کانی‌های موتتموریونیت در خاک‌های واگرا یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن‌ها شناخته‌شده است). ضمناً وجه اشتراک نتایج کانی‌شناسی در این است که همه خاک‌ها از لحاظ دارا بودن کانی‌های رسی مرغوب و مناسب (کائولینیت و موتتموریونیت)، فقیرند. (جداول ۸، ۹، ۱۰).

جدول ۶: اندازه‌گیری حدود آتربرگ

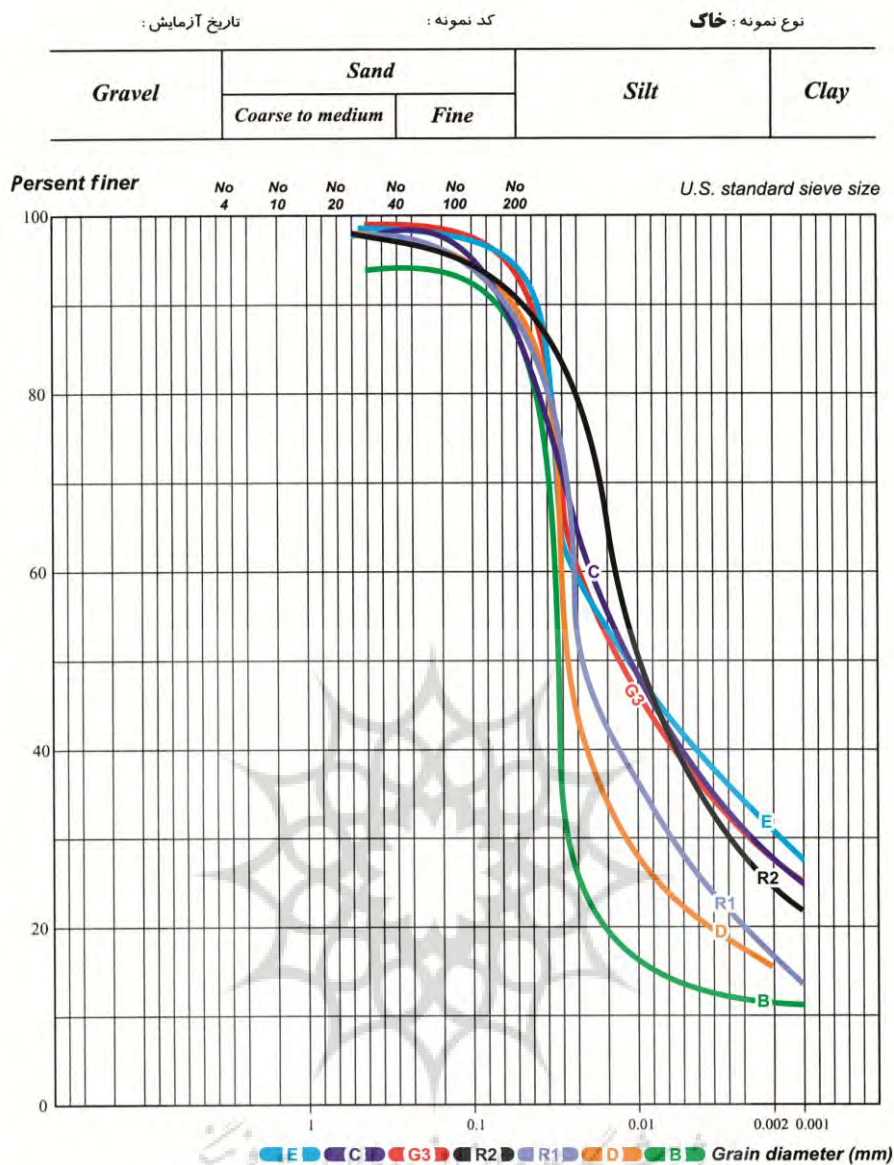
Table 6: Measurement of the Atterberg limits

کد نمونه Sample code	حد روانی Liquid limit	حد خمیری Plastic limit	اندیکس خمیری Plastic index
B	25.22	20.58	4.64
C	40.12	21.33	18.79
D	36.4	27.63	8.77
E	32	24.85	7.15
G3	41.57	28.84	12.73
R1	27.29	22.79	4.5
R2	31.92	25.39	6.53

جدول ۷: طبقه‌بندی پتانسیل تورم با نشانه خمیری [10]

Table 7: Classification of the inflation potential by the plastic index

شاخص خمیری plastic index	پتانسیل تورم inflation potential
0-15	پائین Low
10- 35	متوسط Medium
20- 55	زیاد High
More than 35	خیلی زیاد Very high



شکل ۲: دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری برای نمونه‌های مورد مطالعه [11]
 Fig, 10: Grading by sieve and hydrometric method for the studied samples

جدول ۸: تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRD

Table 8: Adjustment of the chemical components by XRD method

کد نمونه Sample code	ترکیب شیمیایی chemical components
B	Gypsum (Ca S O ₄ 2 H ₂ O), Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Dolomite(C ₂ Ca ₁ Mg ₁ O ₆)
C	Gypsum (Ca S O ₄ 2 H ₂ O), Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Dolomite(C ₂ Ca ₁ Mg ₁ O ₆), Feldespar(Na.Ca)
D	Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Dolomite(C ₂ Ca ₁ Mg ₁ O ₆), Feldespar(Na.Ca)
E	Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Dolomite(C ₂ Ca ₁ Mg ₁ O ₆), Feldespar(Na.Ca)
G3	Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Dolomite(C ₂ Ca ₁ Mg ₁ O ₆), Feldespar(Na.Ca)
R1	Gypsum (Ca S O ₄ 2 H ₂ O), Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Clinochlore ((Mg , Fe) ₆ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (O H) ₈)
R2	Gypsum (Ca S O ₄ 2 H ₂ O), Calcite (Ca C O ₃), Quartz(Si O ₂), Clinochlore ((Mg , Fe) ₆ (Si , Al) ₄ O ₁₀ (O H) ₈)

جدول ۹: تعیین ترکیب شیمیایی به روش عنصری [12]

Table 9: Adjustment of the chemical components by element method

ترکیب شیمیایی chemical material	درصد وزنی کد نمونه: B Weight percentage of the Sample code: B	درصد وزنی کد نمونه: C Weight percentage of the Sample code: C	درصد وزنی کد نمونه: D Weight percentage of the Sample code: D	درصد وزنی کد نمونه: E Weight percentage of the Sample code: E	درصد وزنی کد نمونه: G3 Weight percentage of the Sample code: G3
SiO ₂	25.58	37.26	36.11	40.32	34.40
Al ₂ O ₃	7.58	11.78	14.04	10.75	9.10
CaO	26.56	19.29	20.43	17.73	20.16
MgO	3.39	5.59	4.39	4.49	4.60
Fe ₂ O ₃	1.00	2.00	1.50	5.00	6.00
NaCl	0.23	0.59	0.44	2.46	1.69
SO ₃	14.89	3.12	1.17	0.87	1.37
Cl	0.14	0.36	0.26	1.5	1.03
LOSS	22.80	21.41	21.35	21.48	22.27

جدول ۱۰: تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF

Table 10: Adjustment of the chemical components by XRF method

ترکیب شیمیایی chemical material	درصد وزنی کد نمونه: R1 Weight percentage of the Sample code: R1	درصد وزنی کد نمونه: R2 Weight percentage of the Sample code: R2
SiO ₂	33.386	33.007
Al ₂ O ₃	7.63	7.51
Fe ₂ O ₃	4.209	4.349
CaO	22.123	22.067
K ₂ O	1.586	1.843
MgO	6.039	5.774
TiO ₂	0.654	0.65
MnO	0.07	0.069
P ₂ O ₅	0.173	0.143
Na ₂ O	0.604	0.526
SO ₃	0.28	0.07
Cl	0.10	0.02
L.O.I	23.01	23.49

معادن G3, C در حد متوسط است (جدول ۷). (برخی از خاک‌ها دارای قابلیت تورم یا آماس پذیری هستند بطوریکه 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 برگشت پذیر است تحت تأثیر عواملی همچون نوع کانی‌ها، ترکیب شیمیایی، دانه بندی، شرایط آب و هوایی محیط و خصوصیات خمیری خاک است) [12].

نتایج آزمایش‌های کانی‌شناسی نشان می‌دهد کلسیت و کوارتز بیشترین کانی‌های سازنده خاک‌های مورد مطالعه هستند. وجود کلسیت در خاک علاوه بر این که می‌تواند به عنوان یک عامل بازدارنده تورم و واگرایی ناشی از حضور کانی رسی قلمداد شود، می‌تواند موجب افزایش استحکام مصالح گلی نیز شود [13].

بر اساس استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران (میزان مناسب ترکیب شیمیایی خاک برای تهیه خشت) (جدول ۱۱) میزان سیلیس، در نمونه E، در حد مطلوب است. میزان یون کلر و سولفات در خاک‌های سازندی B, C, D, E, G3 نیز بیشتر از حد مجاز است (جدول ۹، ۱۰).

۶. بحث در یافته‌ها

بر اساس نمودارهای دانه بندی به دست آمده، بخش غیر ماسه‌ای خاک‌ها را بیشتر ریزدانه‌های سیلت شامل می‌شوند (شکل ۲). بالاترین شاخص خمیری یا PI مربوط به نمونه سازندی C و کمترین میزان PI مربوط به نمونه آبرفتی R1 است (جدول ۶). پتانسیل تورم نیز با استناد به اندیکس خمیری، در خاک‌های معادن B, D, E, R1, R2 در حد پایین و پتانسیل تورم خاک‌های

جدول ۱۱: میزان مناسب ترکیب شیمیایی خاک برای تهیه خشت بر اساس استانداردهای ایران [10]

Table 11: The right amount of soil chemical synthesis to make adobe based on the standards of Iran

No.	ترکیب شیمیایی chemical components	حد مطلوب Desired amount	روش آزمایش Examination standard
1	اکسید سیلیسیم Silicon oxide SiO ₂	40- 60%	استاندارد شماره ۸۶۱ ایران Standard number 861 Iran
2	اکسید آلومینیم Aluminum oxide Al ₂ O ₃	9- 21%	استاندارد شماره ۸۴۸ ایران Standard number 848 Iran
3	اکسید آهن Iron oxide Fe ₂ O ₃	3- 12%	استاندارد شماره ۸۴۹ ایران Standard number 849 Iran
4	اکسید کلسیم Calcium oxide CaO	Max 17%	استاندارد شماره ۸۵۱ ایران Standard number 851 Iran
5	اکسید منیزیم Magnesium oxide MgO	Max 4%	استاندارد شماره ۸۵۱ ایران Standard number 851 Iran
6	انیدرید کربنیک Carbon dioxide CO ₂ CO ₂	Max 8.5%	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
7	انیدرید سولفوریک Sulfur trioxide SO ₃ SO ₃	Max 0.5%	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
8	کلریدهای سدیم و پتاسیم Sodium and Potassium chlorides	Max 0.1%	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran
9	افت وزن بر اثر سرخ شدن Weight loss due to the heating	Max 16%	استاندارد شماره ۱۱۶۲ ایران Standard number 1162 Iran

قلمداد شود. نمک‌های سولفات نیز می‌توانند در مجاورت رطوبت و در اثر پدیده نهان شکستگی^۵ موجب از بین رفتن چسبندگی و انسجام ساختار خشت شوند. آثار این پدیده و آسیب‌های وارد بر خشت‌های محوطه چغازنبیل مؤید این نکته است [13] (جدول ۹، ۱۰).

۷. نتیجه‌گیری

با شناختی که از خاک‌های محوطه اطراف چغازنبیل به‌دست آمده، قابل‌درک است که در بعضی از موارد با استانداردهای رایج برای تهیه خشت فاصله دارند، اما می‌توان با رعایت قواعد مربوط به آماده‌سازی خاک، عمل‌آوری گل، قالب‌گیری و خشک‌کردن، به خشت‌های مرمتی بهینه با رفتارهای مکانیکی ارتقاء یافته‌ای رسید. از آنجایی که دانه‌بندی خاک نقش بسزایی در تهیه خشت بهینه دارد و همچنین به دلایل محیطی و اقتصادی لازم است که این خاک از نزدیک بنای تاریخی چغازنبیل تهیه شود، با توجه به نتایج به‌دست آمده، خاک‌های R2 و G3 با دانه‌بندی مناسب نسبت به سایر خاک‌های منطقه، در صورت اختلاط با ماسه و گاه (برای کنترل

خاک‌های مورد مطالعه از لحاظ دارا بودن کانی‌های رسی مرغوب و مناسب (کائولینیت و مونت‌موریلونیت)، فقیرند. این بدان خاطر است که، از سنگ مادرهایی منشأ گرفته‌اند که کمتر حاوی کانی‌های رسی هستند (جدول ۸).

نتایج آنالیز شیمیایی نشان می‌دهد که مقدار سیلیس، فقط در نمونه E، در حد مطلوب، برای تهیه خشت است (جدول ۱۱)، آنچه موجب چسبندگی و استحکام خشت ساخته شده با این خاک‌ها می‌شود وجود مقادیر قابل توجه کلسیت است. میزان یون کلر و سولفات در خاک‌های سازندی B, C, D, E, G3 نیز بیشتر از حد مجاز است (جدول ۱۱). 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 اما وجود کلسیت زیاد در نمونه‌ها می‌تواند به عنوان یک عامل بازدارنده تورم و واگرایی

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.
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

- [1] Talebian M. Conservation and Restoration Experiences in Chogazanbil. In: Proceedings of the Fifth Conference on Conservation and Restoration of Historical-Cultural Objects and Architectural Decorations. Tehran: Resaneh Pardaz and institute for the preservation and restoration of historical-cultural monuments, 2002: 17,18. [in Persian]
- [2] Ebrahimi A. Researches on Mud- Brick and Straw- clay in Choga Zanbil Word Heritage Site. In: Pre- Print of Papers 9 the International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture. Tehran: Iranian Cultural Heritage Organization (ICHO), 2003, p. 32. [in Persian]

ترک‌خوردگی خشت‌ها) که در مجاورت با رطوبت دستخوش تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای نمی‌گردند، و 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 و بخشی از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مصوب در دانشگاه آزاد تهران مرکز با عنوان آسیب‌شناسی خشت در محوطه تاریخی چغازنبیل و تهیه خشت بهینه با بکارگیری ذخایر رسی مورد استفاده در خشت‌های تاریخی برای مرمت محوطه تاریخی است. از این‌رو از پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل برای در اختیار نهادن شرایط لازم سپاسگزاری می‌شود.

- [3] Ebrahimi A, Heidari Zadeh B. Restoration records at Chogazanbil base. Khuzestan: Archived in Chogazanbil Word Heritage base, 2002: 4-7. [in Persian]
- [4] Nabian A, Malak Abbasi A, Hadian Dehkordi M, et al. Soil Studies in the Choghaznebil Area. Khuzestan: Archived in Chogazanbil Word Heritage base, 2001: 9-52. [in Persian]
- [5] Ebrahimi A. 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 Choghaznebil). University of Esfahan, 2001. [in Persian]

- فرآورده های بوم آورد در تثبیت و استحکام بخشی خشت خام و اندود کاهگل (مطالعه موردی ذیقورات چغازنبیل)، دانشگاه هنر اصفهان ۱۳۸۰: ۲۲۵ و ۲۲۶.
- [6] Aflaki E. Soil Mechanic Laboratory. Tehran: Parham, 1995. [in Persian]
[افلاکی اسماعیل. آزمایشگاه مکانیک خاک. تهران: انتشارات پرهام، ۱۳۷۴.]
- [7] Eftekharihan L, Titidej O, Khakbaz B, et al. Soil Mechanic Laboratory. Hormozgan: Hormozgan University Press, 1998. [in Persian]
[افتخاریان لیلا، تی تی دژ امید، خاکباز بهناز، سارنگ امین، صادقیان پدram، میهن روستا رضا، نواری مهدی. آزمایشگاه مکانیک خاک. هرمزگان: انتشارات دانشگاه هرمزگان، ۱۳۷۷.]
- [8] Teutonico Jeanne M. A Laboratory Manual For Architectural Conservators. Institute for Conservation and Restoration of Historical and Cultural Monuments in collaboration with Hadian Publishing, 2006. [in Persian]
[تیتونیکوجین ماری. راهنمای آزمایشگاهی برای حفاظتگران بنا. (ترجمه: هادیان دهکردی منیژه)، پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی - فرهنگی با همکاری نشر هادیان، ۱۳۸۵.]
- [9] Hadian Dehkordi M. Application of Scientific Investigations in Conservation and Restoration of Historical Buildings (Building Materials). Tehran: University of Tehran Publications, 2009. [in Persian]
[هادیان دهکردی منیژه. کاربری پژوهش های آزمایشگاهی در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی (مواد و مصالح). مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران و پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی، فرهنگی، ۱۳۸۸.]
- [10] Askari F. Inflation and Divergence of the Soils. Tehran: Jahad-e Daneshgahi-e, 1993. [in Persian]
[عسکری فرج الله. تورم و واگرایی خاک ها. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران؛ ۱۳۷۲.]
- [11] Pedram B, Ebrahimi A. Structural and Physical Characteristics of the Adobe Bricks Used at the World Heritage Site of Arg-e Bam. JRA. 2017; 3 (2): 81-102. [in Persian] [doi.org/10.29252/jra.3.2.81]
[پدram بهنام، ابراهیمی افشین. بررسی خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خشت های به کار رفته در محوطه میراث جهانی ارگ بم. پژوهش باستان سنجی ۱۳۹۶: ۳ (۲): ۸۱-۱۰۲.]
- [12] Hadian Dehkordi M, Madani B, Zakavi S, et al. Studies on clay soils of the Choghaznil area. Khuzestan: Archived in Chogazanbil Word Heritage base, 2001. [in Persian]
[هادیان دهکردی منیژه، مدنی بیگم. با همکاری ذکوی سهبیلا، مستانه معزی. مطالعات انجام شده روی خاک های رسی منطقه چغازنبیل. خوزستان: آرشیو در پایگاه ثبت جهانی چغازنبیل، ۱۳۸۰.]
- [13] Hadian Dehkordi M. Pedological Studies on Historical and Ancient Earthen Materials in Different Regions of Iran. Athar Journal 2017; 37: 85-96. [in Persian]
[هادیان دهکردی منیژه. مطالعات خاک شناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران. فصلنامه علمی فنی، هنری اثر ۱۳۹۵، ۸۵-۹۶.]