مطالعات خاک‌شناسی مصالح خشتی تاریخی و باستانی در مناطق مختلف ایران

منیژه هادیان دهکردی
دکترای مرمت آثار و اشیاء فرهنگی و تاریخی، پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی
m_hadian@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۲۵ /۱ / ۹۵
تاریخ پذیرش: ۲۴ / ۱۱ / ۹۵

چکیده
خشت یکی از انواع مصالح گلین و اصلی در بناها و آثار معماری گلی به‌جامانده از دوران پیش از تاریخ در مناطق مختلف ایران است. به همین دلیل مطالعه روی این مصالح و فرایندهای فرسودگی آنها همواره مورد توجه متخصصان حفاظت و مرمت بوده است. کیفیت این مصالح ـ که مفهومی نسبی دارد ـ صرف‌نظر از کاربرد و نحوهٔ ساخت و عمل‌آوری، تابعی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد سازنده همچون دانه‌بندی و میزان چسبندگی خاک مورد استفاده و همچنین نوع کانی‌های رسی و نمک‌های محلول و غیر محلول در آنهاست. بر این اساس و با توجه به مناطق مختلف جغرافیایی و پراکندگی آثار خشتی در ایران، در یک طرح تحقیقاتی نمونه‌هایی از خشت‌های استفاده‌شده در محوطه‌های باستانی و بناهای تاریخی مورد مطالعات شیمیایی (XRF)، کانی‌شناسی (XRD)، و مکانیکی (دانه‌بندی و شاخص خمیری) قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که خاک استفاده‌شده در ساخت خشت‌ها اساساً از نوع رسی‌ـماسه‌ای و گاه همراه سیلت است. بیشترین اجزای ریزدانه و شبه‌رسی در آنها کلریت و موسکویت و ایلیت هستند. همچنین بیشترین کانی‌های رسی کائولینیت در مناطق شمالی دیده می‌شود، در حالی که در مناطق جنوب شرقی و فلات مرکزی [کانی‌ها] بیشتر از نوع مونت‌موری یونیت است. کائولینیت‌ها به سبب جذبِ کم آب، ساختار پایدارتری دارند و در عوض مونت‌مورینیت‌ها آب بیشتری جذب می‌کنند و خاصیت آماس‌پذیری دارند. بنابراین نوع و میزان کانی‌های رسی در کیفیت مصالح گلی نقش مهمی ایفا می‌کند. وجود نمک‌های محلول کلرور در مناطق شمال شرقی و فلات مرکزی و جنوب شرقی، علاوه بر کاهش چسبندگی ذرات رس و از بین بردن انسجام خشت طی چرخه‌های تر و خشک، از طریق فرایند فیزیکی و شیمیایی موجب واگرایی ساختار رس می‌شود. آب شستگی‌ها و شیارهای عمیق در آثار گلین مناطق فوق از نشانه‌های این پدیده هستند. ذرات کلوئیدی اکسیدهای آهن آب‌دار یا لیمونیت ($Fe_2O_3 . H_2O$) موجود در خاکِ منطقهٔ فلات مرکزی (ابیانه) باعث زردی رنگ و چسبندگی این خاک شده و به همین سبب برای ساخت اندود کاهگل از آن بسیار استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی:
خاک، خشت، کانی رسی، آنالیز شیمیایی، شاخص خمیری، دانه‌بندی.

مقدمه

کشور ایران با وجود مناطق اقلیمی و جغرافیایی متنوع، هزاران سال است که از مصالح گلین (خشت و چینه و کاهگل) به مثابه یکی از اصلی‌ترین مصالح در آثار معماری، بناهای تاریخی و مسکونی به‌خصوص خانه‌های روستایی استفاده کرده است (کسایی: ۱۳۵۵: ۱ـ ۹). معماری گلین از منطقهٔ شمالی کشور با آب و هوای مرطوب گرفته تا حاشیهٔ کویر و مناطق کوهستانی و سرد در تمام پهنهٔ این کشور به چشم می‌خورد.

خشت به عنوان یکی از مصالح اصلی گلین با جا دادن گل تر به کمک دست در قالب ساخته می‌شود که پس از خارج کردن آن از قالب و قبل از به کار بردن، آن را زیر نور خورشید خشک می‌کنند (ولفسکیل و دیگران، ۱۳۶۶: ۴). گل مورد استفاده برای ساخت خشت معمولاً از مخلوط آب و خاک‌های رسی‌ـماسه‌ای یا ماسه‌ـرسی به دست می‌آید. گاهی اوقات موادی مثل پرکننده‌های لیفی از جمله کاه و مو نیز برای جلوگیری از ترک‌خوردگی به آن اضافه می‌شود.

یکی از سؤالات اصلی و متداول مطرح میان متخصصان حفاظت و مرمت آثار و بناهای خشتی، علت فرسایش زیاد برخی از این نوع آثار و یا استحکام بالا و بقای آنها در موارد مشابه با توجه به منطقه یا آب و هوا و... بوده است. استحکام خشت از دید حفاظت و مرمت آثار، مفهومی نسبی است که به معنای دوام یا مقاومت در برابر فرسایش[1] و آسیب‌های سازه‌ای[2] است. از آنجا که استحکام خشت به عوامل مختلفی همچون ترکیبات سازنده (خاک و مواد افزودنی آن)، نحوهٔ عمل‌آوری و ساخت، کاربری، شکل و ابعاد آن و بالاخره شرایط محیطی بستگی دارد، لذا یافتن پاسخ دقیق و روشن به سؤالات مطرح در این زمینه بدون آگاهی کامل از هر یک از عوامل مؤثر فوق و میزان نقش آنها در استحکام مصالح، کار دشواری است یا با ابهام زیادی همراه خواهد بود. در این باره مقایسهٔ کیفیت خشت‌های تاریخی به لحاظ ویژگی ترکیبات سازنده یا خاک مورد استفاده در ساخت آنها نیازمند دسترسی به منابع خاک اولیه در گذشته است که اگر نگوییم غیر ممکن، مستلزم سال‌ها تحقیق و تفحص زمین‌شناسی روی معادن مختلف خاک در مناطق مورد نظر است.

برای حل این مشکل می‌توان به این نکته اشاره کرد که مادهٔ اولیهٔ خشت که همان خاک است و طی هزاران یا میلیون‌ها سال از فرسایش سنگ‌های هر منطقه به وجود می‌آید، بسته به منشأ یا سنگ مادر اولیه، دارای ویژگی‌های خاک‌شناسی همان منطقه است. از سوی دیگر خشت‌هایی که در معرض شرایط محیطی خشنی قرار نگرفته باشند و هوازدگی در آنها اتفاق نیفتاده باشد به دلیل ماهیت معدنی و مقاومت بالایشان در برابر فرسایش، ترکیب کلی خود را حفظ می‌کنند و می‌توانند نمونه‌ای از خاک اولیهٔ منطقه در ساخت مصالح گلی باشند. لذا با توجه به توضیحات فوق خشت‌های سالم و دست نخوردهٔ به‌کاررفته در هر بنای گلی، صرفِ نظر از زمان و دورهٔ تاریخی آن گویای ویژگی خاک مورد استفاده از منطقهٔ مربوطه هستند. فرضیات فوق اساسِ کارِ پژوهشی شد که مقالهٔ حاضر بخشی از نتایج آن است. هدف از این پژوهش که برای اولین بار با چنین گستردگی‌ای صورت گرفته، دستیابی به اطلاعات خاک‌شناسی مناطق مختلف ایران بود که در طول تاریخ برای ساخت مصالح گلین مورد استفاده قرار گرفته اند. این اطلاعات به متخصصان حفاظت و مرمت کمک می‌کند تا با توجه به وضع موجود هر بنا نه تنها در زمینهٔ آسیب‌شناسی بناهای گلی بلکه در ارتباط با مطالعات فن‌شناسی و تکنولوژی ساخت مصالح از نظر ترکیبات سازنده و میزان اثرگذاری آنها بر استحکام خشت‌های نهایی، داده‌های علمی در اختیار داشته باشند. شایان ذکر است که با توجه به پراکندگی آثار در مناطق مختلف ایران به لحاظ اقلیمی و زمین‌شناسی و همچنین امکان دسترسی به نمونه‌های مناسب و دست‌نخورده، تعدادی از این بناها و بقایای معماری برای انجام مطالعه انتخاب شدند.

در این مقاله خواص فیزیکی و شیمیایی خاک سازندهٔ نمونهٔ خشت یا خاک به‌کاررفته در بناها و آثار معماری خشتیِ منتخب، آزمایش و مقایسه شده است.

ارتباط مطالعات خاک‌شناسی با کیفیت مصالح گلین

نتیجهٔ پژوهش‌های انجام‌شده حاکی از آن است که فرسایش‌پذیری خشت تابعی از دانه‌بندی و میزان چسبندگی خاک مورد استفاده و همچنین نوع کانی‌های رسی[3] و نمک‌های محلول و غیر محلول در آن است (هادیان: ۱۳۸۲: ۴۰ـ ۵۵؛ Watanabe and Vatandoust and Okada, ۲۰۰۳: ۶۵۶-۶۶۶). بر این اساس ذراتی که بتوانند به هنگام خشک شدن به هم نزدیک‌تر شوند، پیوند محکم‌تر و استحکام بیشتری ایجاد می‌کنند. وجود دانه‌های ریز (کوچک‌تر از ۲ میکرون) و مسطح مثل کانی‌های رسی (بهنیا و طباطبایی، ۱۳۷۷) یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در بالا بردن استحکام خشک خشت است. علاوه بر این نتایج تحقیقات انجام‌شده روی خشت‌های تاریخی نشان داده است که

بعضی از مواد افزودنی مانند خرده‌های آجر به سبب وجود سیلیس آمورف (بیشکل) و پیوند شیمیایی با ترکیبات کربناتی در طول زمان می‌توانند استحکام خشت را بالا ببرند. در حالی که رس موجود در خاک، در مجاورت رطوبت افزایش حجم می‌یابد، به آرامی چسبندگی و مقاومت کششی و فشاری خود را از دست می‌دهد و در نهایت با افزایش رطوبت می‌تواند در میان آبی که پیرامون آن را فرا گرفته پخش شود. جذب رطوبت به داخل خشت باعث می‌شود خشت مقاومت کششی خود را از دست بدهد و نیز مقاومتش در برابر فشار تا حد زیادی کاهش یابد. به همین دلیل علاوه بر زمین‌لرزه، بیشترین خسارت وارده بر خشت به آب مربوط می‌شود (بالدراما و کیاری، ۱۳۷۷).

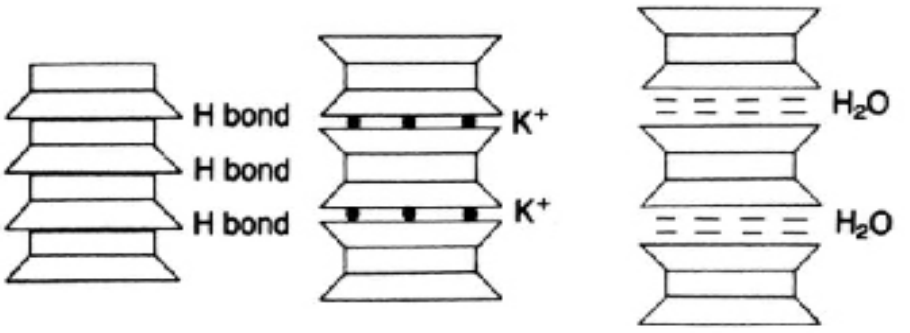
با این وجود، ساختار متفاوت کانی‌های رسی مختلف موجود در خاک‌های سازندهٔ مصالح خشتی در مقایسه با یکدیگر رفتارهای فیزیکی و مکانیکی متفاوتی دارند. کائولینیت یکی از مهم‌ترین کانی‌های رسی است که در خاک‌های نواحی مرطوب و زمین‌های اسیدی بیشتر یافت می‌شود و مقدار آن در خاک‌های خنثی و قلیایی مناطق خشک و نیمه‌خشک کم است. این رس غیر قابل اتساع است و قدرت جذب کاتیونی ناچیزی دارد. بنابراین از ثبات بیشتری در برابر چرخه‌های تر و خشک دارد.

گروه مونت‌موری یونیت، فعال‌ترین کانی رسی در جذب و تبادل کاتیون است (عسگری و فاخر، ۱۳۷۲: ۲۲) که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قلیایی و یا گرم و مرطوب همراه سایر رس‌ها به مقدار قابل توجهی یافت می‌شود. این گروه از کانی‌های رسی قابلیت جذب آب و تورم[۴] 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[۵] یکی دیگر از خواص ذرات رس است و از واکنش آنها نسبت به آب ناشی می‌شود. بالا بودن در صد یون سدیم در آب منفذی از خصوصیات اصلی خاک‌های واگراست است. 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: ۲۳ـ ۲۵).

ایلیت‌ها گروه دیگری از کانی‌های شبه‌رسی هستند که در اکثر خاک‌ها به وفور یافت می‌شوند. وضع و شرایط خاک‌های آهکی و اسیدی ضعیف از مناسب‌ترین محیط‌های تشکیل رس‌های ایلیتی به شمار می‌رود. این رس‌ها از لحاظ ساختمانی شبیه مونتموری یونیت‌ها هستند (وارن، ۱۳۸۷: ۷۶) اما قابلیت اتساع آنها کمتر است (تصویر ۱). رس‌های کلریتی که در محیط اسیدی و مرطوب تشکیل می‌شوند از نوع کانی‌ها سیلیکات‌های آهن و منیزیم هستند و عموماً مشخصات فیزیکی مشابه ایلیت دارند. کلریت‌ها اغلب همراه سایر کانی‌های رسی در خاک‌های حاصل از سنگ‌های آذرین و دگرگونی دیده می‌شوند و علی‌رغم نامی که دارند عنصر کلر در آنها وجود ندارد (وارن، ۱۳۸۷: ۷۶ و ۹۱).

مطالعات خاک‌شناسی

در این تحقیق نمونه‌هایی (به طور متوسط حدود ۱ کیلوگرم) از خشت و خاک استفاده‌شده در ساخت مصالحِ آثار معماری خشتی



تصویر ۱. ساختار شماتیک کانی‌های رسی، این کانی‌ها از لایه‌های مسطح سیلیکا (اوکتاهیدرال) و ژیپسیت (تتراهیدرال) تشکیل شده اند (مأخذ: بهنیا و طباطبایی، ۱۳۷۷: ۴).

در مناطق مختلف آب و هوایی ایران برداشته شد (تصویرهای ۲ـ ۱۲) (جدول ۱). سپس برای انجام آزمایش‌های مختلف، روش چهارقسمتی برای نمونه‌گیری هر یک از نمونه‌های اولیه به کار گرفته شد (ولفسکیل و دیگران، ۱۳۶۶: ۷). آزمایش‌های زیر برای مقایسه خواص فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های مطالعاتی انجام شد:

- آنالیز شیمیایی نیمه کمی نمونه‌ها با روش دستگاهی فلورسانس اشعهٔ ایکس (XRF, ARL ۸۴۲۰ با نرم‌افزار UniQuant جهت کالیبراسیون)، و روش شیمی تر (جهت آزمایش یون کلر)؛

تصویر ۲و ۳. قلعه دختر (بم) (عکس از: نگارنده).

- کانی‌شناسی با روش پراش‌سنجی اشعهٔ ایکس (XRD, PHILIPS PW1800, kV=40, mA= 30 , Ka. Cu)؛

- دانه‌بندی (الک و هیدرومتری) (تیتونیکو، ۱۳۸۵: ۷۷ـ ۱۰۲)، (ASTM D422-63)؛

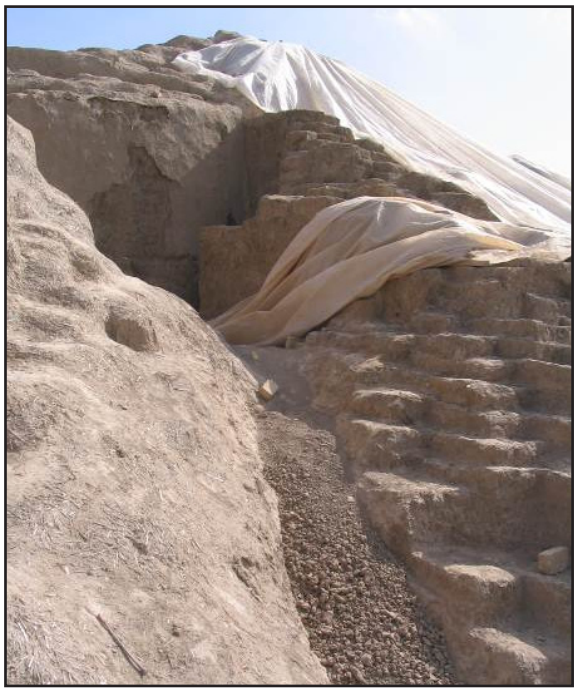
- شاخص خمیری (تعیین حدود اتربرگ) (تیتونیکو، ۱۳۸۵: ۱۰۳ـ ۱۱۷)، (ASTM D4318-84)؛

لازم به توضیح است که در برخی موارد به دلیل کافی نبودن مقدار نمونه‌ها و یا محدودیت در نمونه‌برداری، انجام بعضی از آزمایش‌ها امکان‌پذیر نبوده است.

تصویر ۴ و ۵. قلعهٔ بلقیس (اسفراین)، شمال شرق (عکس از: نگارنده).

تصویر ۶ و ۷. تپهٔ نوشیجان (همدان)، غرب (عکس از:

تصویر ۸. آتشگاه اصفهان، فلات مرکزی (عکس از: نگارنده).



تصویر ۹. کنار صندل (جیرفت)، جنوب شرق (عکس از: نگارنده).

تصویر ۱۰. تپهٔ زیویه (کردستان)، غرب (عکس از: نگارنده).

تصویر ۱۱ و ۱۲. روستای ماسوله، شمال (عکس از: نگارنده).

بحث و بررسی در بارهٔ داده‌های آزمایشگاهی

الف. آنالیز شیمیایی

نتایج آنالیز شیمیایی (جدول ۲) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر سیلیس و آلومینیم و کمترین مقدار یون کلسیم مربوطه به خاک‌های منطقهٔ شمال کشور مانند ماسوله و خانه‌های روستایی رشت است که همین امر موجب اسیدی شدن خاک منطقه می‌شود. در خاک‌های اسیدی که آلومینیم فراوان‌تر است، آماس یا تورم خاک نیز کم‌تر دیده می‌شود. در این نوع خشت‌ها رس عامل استحکام خشت می‌شود؛ در حالی که در خاک مناطق جنوب غرب (چغازنبیل)، جنوب شرق (قلعه دختر و کوشک رحیم‌آباد بم و جیرفت)، و مناطق دیگر کشور یعنی شمال شرق (قلعهٔ بلقیس)، غرب (هگمتانه، تپهٔ نوشیجان، و زیویه) و فلات مرکزی (آتشگاه اصفهان، سیلک، و ابیانه) مقادیر قابل توجهی کلسیت وجود دارد و در عوض مقدار آلومینیم آنها کمتر است. به عبارت دیگر خاک این مناطق رس کمتری دارند و آنچه موجب چسبندگی و استحکام خشت‌ها شده است وجود ترکیبات آهکی است.

طبق نتایج تست کلر بر روی نمونه‌ها بیشترین مقادیر یون کلر در خاک‌های جنوب شرق (جیرفت و قلعه دختر و کوشک رحیم‌آباد) و شمال شرق (قلعهٔ بلقیس) دیده می‌شود. منشأ این نمک‌ها در منطقهٔ شمال شرق می‌تواند دریا و در نمونه‌های دیگر کویر باشد. نمک‌های کلرور (سدیم و پتاسیم) نقش مهمی در تورم و واگرایی خاک رس دارند (هادیان و دیگران، ۲۰۰۸: ۱۸۳ـ ۱۸۸).

زیرا یون‌های یک‌ظرفیتی مانند سدیم آماس بیشتری از یون دوظرفیتی مثل کلسیم ایجاد می‌کنند (عسگری و فاخر، ۱۳۷۲). لذا خاک‌های آماس‌پذیر و خاک‌های واگرا، متأثر از وجود نمک در آنها در برابر رطوبت و آب مقاومت کمی از خود نشان می‌دهند.

بیشترین مقدار یون آهن در خاک زرد ابیانه (Abi 3)، خاک خاکستری‌رنگ ماسوله (Mas 3) و خشت زیویه (Ziv 1) به ترتیب با مقادیر حدود ۱۰، ۱۰ و ۹ درصد دیده می‌شود. خاک ابیانه و خشت زیویه بر خلاف خاک خاکستری ماسوله چسبندگی بالاتری دارند (جدول ۴). اکسیدهای آهن آب‌دار یا لیمونیت ($Fe_2O_3 . H_2O$) موجب زرد شدن رنگ خاک می‌شود. ذرات کلوئیدی[۶] این کانی باعث افزایش چسبندگی بیشتر خاک می‌شوند (معتمد، ۱۳۶۸). بنابراین آنچه که موجب شده است تا خاک زرد ابیانه چسبندگی زیادی داشته باشد و برای اندود دیوارها مورد استفاده قرار گیرد، وجود همین ترکیبات آهنی با دانه‌بندی بسیار ریز (کلوئیدی) است.

بیشترین درصد نمک‌های سولفات در نمونه‌های مربوط به تپهٔ سیلک و ابیانه در فلات مرکزی، و جیرفت در جنوب شرق و چغازنبیل در غرب دیده می‌شود. این نمک‌ها می‌توانند در مجاورت رطوبت و در اثر پدیدهٔ نهان‌ـشکفتگی[۷] موجب از بین رفتن چسبندگی و انسجام ساختار خشت شوند. آثار این پدیده و آسیب‌های وارد بر خشت‌های محوطه‌های جیرفت و چغازنبیل مؤید این نکته است.

جدول ۱. فهرست نمونه‌های خشت و خاک مطالعه‌شده.

ردیف	کد نمونه	نمونه	موقعیت جغرافیایی
۱	Abi 1	خشت ـ روستای ابیانه	فلات مرکزی
۲	Abi 2	خاک (سرخ) ـ روستای ابیانه	فلات مرکزی
۳	Abi 3	خاک (زرد) ـ روستای ابیانه	فلات مرکزی
۴	Bel 1	خشت ـ قلعهٔ بلقیس (اسفراین)	شمال ـ شرق
۵	Bel 2	خشت ـ قلعهٔ بلقیس (اسفراین)	شمال ـ شرق
۶	Bel 3	خشت ـ قلعهٔ بلقیس (اسفراین)	شمال ـ شرق
۷	Qal 1	خشت ـ قلعه دختر (بم)	جنوب ـ شرق
۸	Cho 1	خشت ـ ذیقورات چغازنبیل	جنوب ـ غرب
۹	Cho 2	خشت ـ ذیقورات چغازنبیل	جنوب ـ غرب
۱۰	Cho 3	خشت ـ ذیقورات چغازنبیل	جنوب ـ غرب
۱۱	Heg 1	خشت ـ هگمتانه (همدان)	غرب
۱۲	Heg 2	خشت ـ هگمتانه (همدان)	غرب
۱۳	Heg 3	خشت ـ هگمتانه (همدان)	غرب
۱۴	Heg 4	خشت ـ هگمتانه (همدان)	غرب
۱۵	Isf 2	خشت ـ آتشگاه اصفهان	فلات مرکزی
۱۶	Jir 1	خشت ـ کنارصندل (جیرفت)	جنوب ـ شرق
۱۷	Jir 2	خشت ـ کنارصندل (جیرفت)	جنوب ـ شرق
۱۸	Kus 1	خشت ـ کوشک رحیم آباد (بم)	جنوب ـ شرق
۱۹	Mas 1	خشت ـ روستای ماسوله	شمال
۲۰	Mas 2	خشت ـ روستای ماسوله	شمال
۲۱	Mas 3	خاک (خاکستری) ـ روستای ماسوله	شمال
۲۲	Nou 1	خشت ـ تپه نوشیجان (همدان)	غرب
۲۳	Nou 2	خشت ـ تپه نوشیجان (همدان)	غرب
۲۴	Ros 1	خشت ـ خانهٔ موسوی ـ شلما (رشت)	شمال
۲۵	Ros 2	خشت ـ خانهٔ سنگر (رشت)	شمال
۲۶	Ros 3	خشت ـ خانهٔ موسوی‌زاده ـ تالش ـ رشت	شمال
۲۷	Ros 4	خانهٔ محتشم‌طلب ـ گشت (رشت)	شمال
۲۸	Sia 1	خشت مرمتی ـ تپهٔ سیلک (کاشان)	فلات مرکزی
۲۹	Sia 2	خشت اصلی ـ تپهٔ سیلک (کاشان)	فلات مرکزی
۳۰	Sia 3	خشت اصلی ـ تپهٔ سیلک (کاشان)	فلات مرکزی
۳۱	Ziv 1	خشت ـ قلعهٔ زیویه (سقز)	غرب
۳۲	Ziv 2	خشت ـ قلعهٔ زیویه (سقز)	غرب

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌ها با روش XRF.

ردیف	کد نمونه	٪ اکسید عناصر									
		SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	MnO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl
۱	Abi 1	۴۲/۲	۲۱/۵	۱۱/۰	۷/۵	۱/۹	-	۱/۶	-	-	۰/۲
۲	Abi 2	۴۲/۰	۱۷/۵	۱۱/۷	۵/۱	۱/۸	-	۱/۶	-	-	۰/۰
۳	Abi 3	۴۲/۵	۲۶/۷	۵/۵	۱۰/۳	۲/۴	-	۳/۸	-	-	۰/۱
۴	Bel 1	۴۴/۲	۹/۸	۳۱/۶	۵/۴	۴/۰	۰/۱	-	۲/۹	۱/۱	۰/۲
۵	Bel 2	۴۴/۲	۹/۷	۳۱/۷	۵/۰	۳/۸	۰/۱	-	۲/۸	۱/۳	۰/۵
۶	Bel 3	۴۲/۳	۹/۵	۳۱/۹	۵/۰	۴/۲	۰/۱	-	۳/۴	۱/۴	۰/۹
۷	Qal 1	۵۳/۴	۱۰/۸	۱۱/۵	۶/۲	۳/۴	۰/۱	_	۲/۳	۱/۱	۰/۴
۸	Cho 1	۳۶/۹	۶/۱	۱۸/۲	۳/۸	۲/۳	-	۶/۰	-	-	-
۹	Cho 2	۳۵/۸	۹/۸	۲۲/۸	۲/۶	۳/۰	-	۵/۱	-	-	-
۱۰	Cho 3	۲۵/۵	۶/۱	۲۲/۶	۳/۸	۳/۴	-	۹/۱	-	-	-
۱۱	Heg 1	۵۳/۶	۱۴/۴	۱۵/۳	۷/۱	۳/۲	۰/۱	-	۳/۹	۱/۴	۰/۱
۱۲	Heg 2	۵۳/۴	۱۴/۵	۱۵/۷	۷/۵	۳/۳	۰/۱	-	۳/۱	۱/۴	۰/۲
۱۳	Heg 3	۵۰/۲	۱۴/۳	۲۱/۱	۶/۹	۳/۲	۰/۱	-	۲/۷	۱/۱	۰/۰
۱۴	Heg 4	۴۴/۶	۱۲/۸	۲۵/۶	۷/۸	۳/۶	۰/۲	-	۳/۰	۱/۱	۰/۰
۱۵	Isf 2	۴۱/۸	۱۱/۲	۳۰/۶	۶/۲	۴/۷	۰/۱	۰/۲	۲/۶	۱/۴	۰/۲
۱۶	Jir 1	۴۹/۲	۹/۵	۱۱/۰	۶/۲	۳/۴	-	۵/۴	۲/۹	۲/۰	۵/۰
۱۷	Jir 2	۴۸/۳	۱۱/۲	۲۷/۳	۷/۳	۴/۶	-	۴/۵	۱/۸	۱/۴	۰/۴
۱۸	Kus 1	۵۱/۸	۱۱/۵	۱۱/۵	۶/۴	۳/۴	۰/۱		۲/۵	۱/۳	۰/۴
۱۹	Mas 1	۵۸/۱	۱۸/۴	۵/۲	۹/۱	۲/۵	۰/۲	-	۵/۰	۱/۳	۰/۰
۲۰	Mas 2	۵۸/۲	۲۱/۵	۵/۱	۷/۴	۲/۴	۰/۲	-	۴/۰	۱/۲	۰/۰
۲۱	Mas 3	۵۶/۴	۱۹/۰	۵/۹	۹/۹	۲/۷	۰/۲	-	۳/۹	۱/۳	۰/۰
۲۲	Nou 1	۵۱/۵	۱۴/۵	۱۶/۹	۷/۴	۳/۷	۰/۱	۰/۳	۲/۸	۱/۶	۰/۲
۲۳	Nou 2	۴۵/۱	۱۲/۳	۲۲/۱	۷/۱	۴/۴	۰/۱	۲/۴	۲/۸	۲/۳	۰/۴
۲۴	Ros 1	۶۳/۵	۱۸/۸	۰/۶	۸/۲	۲/۶	۰/۱	-	۳/۵	۱/۷	۰/۰
۲۵	Ros 2	۵۸/۶	۱۶/۰	۷/۸	۷/۵	۳/۸	۰/۲	-	۳/۵	۱/۷	۰/۰
۲۶	Ros 3	۷۱/۴	۱۴/۰	۰/۹	۶/۶	۱/۸	۰/۳	-	۲/۵	۱/۲	۰/۱
۲۷	Ros 4	۶۴/۵	۱۸/۷	۰/۷	۶/۶	۲/۵	۰/۱	-	۲/۸	۲/۷	۰/۱
۲۸	Sia 1	۳۵/۸	۲۲/۰	۱۹/۴	۳/۴	۲/۴	-	۵/۲	-	-	۰/۲
۲۹	Sia 2	۳۹/۴	۱۳/۶	۱۶/۴	۴/۶	۰/۶	-	۷/۸	-	-	۰/۲
۳۰	Sia 3	۳۵/۵	۱۸/۲	۲۰/۱	۳/۵	۱/۲	-	۵/۹	-	-	۰/۲
۳۱	Ziv 1	۴۷/۶	۱۳/۰	۲۲/۵	۸/۷	۴/۰	۰/۲	-	۱/۲	۱/۱	-
۳۲	Ziv 2	۴۹/۲	۱۲/۳	۲۳/۰	۷/۰	۳/۶	۰/۲	-	۲/۳	۱/۴	۰/۳

ب. نتایج کانی‌شناسی

نتایج آزمایش‌های کانی‌شناسی (جدول ۳) نشان می‌دهد که تقریباً در تمامی مناطق، کوارتز و کلسیت بیشترین کانی‌های سازندهٔ خاک‌های مورد استفاده در ساخت مصالح خشتی (به جز شمال کشور مثل ماسوله) هستند. آلبیت، ارتوکلاز و پلاژیوکلاز نیز از انواع فلدسپارهای[۸] موجود در نمونه‌های خشت هستند. همچنین از میان کانی‌های شبه‌رس[۹] یعنی کلریت و مسکویت (میکای سفید) تقریباً در تمامی نمونه‌ها کم و بیش شناسایی شده است. این کانی‌ها اولین محصولات هوازدگی سنگ‌های آذرین هستند که غیر قابل انبساط هستند؛ به این معنا که برای ساخت گل از آنها آب زیادی لازم نیست (وارن: ۱۳۸۷، ص. ۷۶ و ۹۱). کانی رسی مونت‌موری یونیت در مناطق جنوب شرقی ایران (جیرفت،

قلعه دختر و کوشک رحیم‌آباد بم) بیشتر از مناطق دیگر وجود دارد. کانی‌های مونت‌موری یونیت به دلیل ریزدانه بودن بیش‌ترین چسبندگی و همچنین بیشترین میزان جذب آب را در میان کانی‌های رسی دارند. بنابراین وجود مقادیر کمی از این کانی در خاک می‌تواند استحکام خشت را بالا ببرد اما از سوی دیگر در صورت زیاد بودن آن در خاک به دلیل جذب آب زیاد و متورم شدن آن ساختار خشت تضعیف می‌شود.

کانی‌های رسی موجود در منطقهٔ شمال مانند روستای ماسوله و روستاهای رشت به طور نسبی بیشترین کانی‌های رسی را دارند. علاوه بر این، نمونه‌های مربوط به این منطقه دارای کانی رسی کائولینیت نیز هستند. همین امر موجب شده است که خشت‌های روستای ماسوله علی‌رغم بارندگی‌های زیاد منطقه از مقاومت خوبی برخوردار باشند. مقادیر کانی‌های رسی در خشت‌های تپهٔ سیلک، آتشگاه اصفهان و روستای ابیانه یعنی منطقهٔ فلات مرکزی نسبتاً کم است که با مقادیر کم شاخص خمیری (PI) این نمونه‌ها (جدول ۴) به جز خاک زرد ابیانه (Abi 3) مطابقت دارد. همان‌طور که در بخش آنالیز شیمیایی در بالا نیز اشاره شد آنچه که موجب استحکام خشت‌های این منطقه شده است بیشتر از رس، ترکیبات آهکی موجود در خاک آن بوده است.

ج. نتایج دانه‌بندی[10] و شاخص خمیری[11]

بر اساس نمودارهای دانه‌بندی به‌دست‌آمده، خاک سازندهٔ بیشتر خشت‌های مطالعه‌شده از نوع رسی‌ماسه‌ای و گاه سیلتی تعیین می‌شوند (جدول ۴). بالاترین شاخص خمیری یا PI مربوط به نمونه‌های شمال کشور (مثل ماسوله، قلعهٔ بلقیس، و خانه‌های روستایی رشت) است. به جز خاک زردرنگ ابیانه (Abi 3) که شاخص خمیری بالایی دارد، به طور متوسط کم‌ترین میزان PI مربوط به خشت‌های تپهٔ سیلک و روستای ابیانه در مناطق فلات مرکزی است (جدول ۴). همچنین به جز یک نمونه خشت زیویه (Ziv 1) شاخص خمیری نمونه‌های مربوط به مناطق غرب و کوهستانی (هگمتانه، نوشیجان‌تپه) در حد متوسط قرار می‌گیرد. خاک‌های مربوط به فلات مرکزی به دلیل گرم و خشک بودن اقلیم، کانی‌های رسی کمتر و به دنبال آن شاخص کم‌تری دارند.

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، با وجود رس ضعیف و سیلتی بودن خاک استفاده‌شده در ساخت خشت‌ها در بعضی از مناطق خصوصاً فلات مرکزی ایران مانند تپهٔ سیلک، صرفِ نظر از روش عمل‌آوری، وجود ترکیبات کربناتی در خاک این مناطق می‌تواند موجب افزایش استحکام مصالح گلی در طول زمان شده باشد. در حالی که نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهندهٔ قابلیت آماس‌پذیری و واگرایی در خاک‌های رس منطقهٔ جنوب شرق (مثل کنارصندل جیرفت و قلعه دختر بم) است که با وجود رس کافی در بعضی از نمونه خاک‌های این منطقه، مقاومت کمی در برابر آب‌شستگی از خود نشان می‌دهند. وجود نمک‌های سدیم و تبادل یودن در ساختار بلوری رس‌های مونت‌موری یونیت خاک منطقه، موجب واگرایی آنها شده است. در حالی که در رس‌های غیر واگرا جریان آب در آنها یا ثابت می‌ماند یا در اثر تورم و نرم شدن دیواره‌های ترک‌ها، مجرای آب بسته می‌شود (نمونه: خاک‌های منطقهٔ جنوب غرب مانند چغازنبیل).

منطقهٔ شمال کشور جزو اقلیم‌های معتدل و مرطوب محسوب می‌شود که در معرض بارندگی‌های شدید است، با این وجود مصالح گلی خانه‌های روستایی ماسوله و شهرستان رشت دارای استحکام و کیفیت خوبی هستند. ابعاد خشت‌ها بر خلاف سایر مناطق کوچک هستند که همین امر به خشک شدن سریع‌تر آنها کمک می‌کند.

همان‌طور که نتایج آزمایش‌ها نشان داده است، خاک این مصالح، اسیدی (حداقل کلسیت) و دارای کانی‌های رسی از نوع ایلیت و کائولینیت بوده که به هنگام ساخت خشت میزان جذب آب کمتری دارند و از چسبندگی خوبی برخوردار هستند.

روستای ابیانه، تپهٔ سیلک و آتشگاه اصفهان در منطقهٔ فلات مرکزی که جزو مناطق خشک محسوب می‌شود، واقع شده اند. نتایج آزمایش‌های نمونه‌های این منطقه نشان می‌دهد که در مجموع خاک مورد استفاده در تپهٔ سیلک و آتشگاه اصفهان چسبندگی ضعیفی دارد. این خشت‌ها دارای ابعاد بزرگ بوده و یکی از عوامل مهم چسبانندهٔ اجزای خاک در آنها کلسیت است. اما نمونه‌های مربوط به روستای ابیانه همان‌طور که رنگ خاک منطقه نیز نشان می‌دهد، دارای ترکیبات اکسید آهن فراوان هستند. خاک زردرنگ این روستا بر خلاف خاک قرمز آن دارای چسبندگی زیادی است. به همین دلیل برای ساخت ملات از آن بسیار استفاده شده است.

آثار معماری خشتی در منطقهٔ غرب ایران به دلیل سرما و بارندگی در فصل زمستان، روی پی سنگی ساخته شده اند. خاک سازندهٔ خشت‌های این منطقه دارای مقادیر متوسط ترکیبات رسی

جدول ۳. نتایج کانی‌شناسی نمونه‌ها با روش XRD.

ردیف	کد نمونه	کانی*
۱	Abi 1	کوارتز، کلسیت، کانی‌های رسی
۲	Abi 2	کلسیت، کوارتز، فلدسپار
۳	Abi 3	کوارتز، فلدسپار، ایلیت، کلسیت
۴	Bel 1	کوارتز، کلسیت، آلبیت، دولومیت، ارتوکلاز، موسکویت، کلریت
۵	Bel 2	کوارتز، کلسیت، آلبیت، دولومیت، ارتوکلاز، موسکویت، کلریت، هماتیت
۶	Bel 3	کوارتز، کلسیت، ارتوکلاز، آلبیت، دولومیت، کلریت، ایلیت
۷	Qal 1	کوارتز، کلسیت، مونت‌موری یونیت ، آلبیت، کلریت، ارتوکلاز، موسکویت
۸	Cho 1	کوارتز، کلسیت، ژیپس، هالیت، کلریت، پلاژیوکلاز، دولومیت
۹	Cho 2	ژیپس، کلسیت، کوارتز، پلاژیوکلاز، کلریت، دولومیت
۱۰	Cho 3	کوارتز، کلسیت، ژیپس، فلدسپار
۱۱	Heg 1	کوارتز، کلسیت، آلبیت، موسکویت، ارتوکلاز، کلریت، هورنبلند
۱۲	Heg 2	کوارتز، کلسیت، موسکویت، آلبیت، اورتوکلاز، کلریت، هورنبلند
۱۳	Isf 1	کلسیت، کوارتز، ارتوکلاز، ژیپس، کلریت، موسکویت، ایلیت
۱۴	Jir 1	کوارتز، آلبیت، کلسیت، مونت‌موری یونیت ، کلریت، موسکویت، ژیپس
۱۵	Jir 2	کوارتز، آلبیت، کلسیت، مونت‌موری یونیت ، کلریت، موسکویت، ژیپس
۱۶	Kus 1	کوارتز، کلسیت، آلبیت، مونت‌موری یونیت ، کلریت، موسکویت
۱۷	Mas 1	کوارتز، کلسیت، دولومیت، موسکویت، ایلیت، کائولینیت، آلبیت، ارتوکلاز، هماتیت
۱۸	Mas 2	کوارتز، دولومیت، موسکویت، ایلیت، آلبیت، کلریت، ارتوکلاز، کلسیت
۱۹	Nou 1	کوارتز، کلسیت، آلبیت، کلریت، موسکویت، ارتوکلاز، ژیپس، هورنبلند
۲۰	Nou 2	کوارتز، کلسیت، ژیپس، آلبیت، موسکویت، ارتوکلاز، کلریت
۲۱	Ros 1	کوارتز، آلبیت، کلریت، موسکویت، ارتوکلاز، هماتیت
۲۲	Ros 2	مونت‌مورینیت، کوارتز، آنورتیت، کلسیت، دولومیت، موسکویت، کائولینیت، هماتیت
۲۳	Ros 3	کوارتز، آلبیت، موسکویت، کلریت، ارتوکلاز، هماتیت
۲۴	Ros 4	کوارتز، آلبیت، هماتیت، موسکویت، کلریت
۲۵	Sia 1	کلسیت، کوارتز، فلدسپار
۲۶	Sia 2	کلسیت، کوارتز، فلدسپار، کانی‌های رسی
۲۷	Sia 3	کلسیت، کوارتز، فلدسپار
۲۸	Ziv 1	کوارتز، کلسیت، آلبیت، موسکویت، اورتوکلاز، کلریت
۲۹	Ziv 2	کوارتز، کلسیت، آلبیت، کلریت، ایلیت، اورتوکلاز، دولومیت

* کانی‌های شناسایی شده در هر نمونه به ترتیب از راست به چپ از زیاد به کم نوشته شده اند. کانی‌های رسی در هر نمونه نیز با خط زیر آنها مشخص شده است.

جدول ۴. خواص مکانیکی خاک نمونه‌های مطالعه‌شده

ردیف	کد نمونه	شاخص خمیری (PI)	دانه بندی			نوع خاک	نماد طبقه‌بندی (U.S.C.S)
			رس و سیلت	ماسه	شن		
۱	Abi 1	۶	۴۴/۸	۳۱/۲	۲۴/۰	ماسه‌رسی، سیلتی با شن	SC-SM/SM
۲	Abi 2	۵	۵۵/۵	۳۷/۵	۷/۰	رس‌ماسه‌ای سیلتی با شن	CL-ML
۳	Abi 3	۱۵	۸۲/۲	۱۵/۳	۲/۵	رس ضعیف با ماسه	CL/ML
٤	Bel 1	۱۰	۷۷/۱	۲۰/۳	۲/۶	رس ضعیف با ماسه	CL
۵	Bel 2	۱۴	۸۹/۷	۹/۶	۰/۷	رس ضعیف	CL
٦	Bel 3	۹	۸۱/۴	۱۶/۶	۲/۰	رس ضعیف با ماسه	CL
۷	Heg 1	*NP	۵۱/۸	۴۶/۲	۲/۰	سیلت ماسه‌ای	ML
۸	Heg 2	۱۴	۵۵/۹	۳۸/۲	۵/۹	رس ضعیف	CL
۹	Isf 2	۱۰	۶۸/۳	۳۱/۶	۰/۲	رس ضعیف ماسه‌ای	CL
۱۰	Mas 1	۱۵	۳۷/۲	۳۷/۷	۲۵/۰	ماسه‌رسی با شن	SC
۱۱	Mas 2	۱۶	۲۵/۰	۳۷/۵	۳۷/۵	شن رسی	GC
۱۲	Mas 3	۸	۳۸/۴	۴۵/۹	۱۵/۸	ماسه سیلتی با شن	SM
۱۳	Nou 1	۱۴	۵۷/۸	۳۱/۸	۱۰/۴	رس ضعیف ماسه‌ای	CL
۱٤	Nou 2	۸	۷۲/۶	۱۹/۹	۷/۶	سیلت با ماسه	ML
۱۵	Ros 1	۱۱	۸۰/۸	۱۹/۲	–	رس ضعیف با ماسه	CL
۱٦	Ros 2	۱۸	۹۲/۵	۶/۹	۰/۷	سیلت	ML
۱۷	Ros 3	۱۵	۸۱/۶	۱۳/۰	۵/۴	سیلت با ماسه	ML
۱۸	Ros 4	۷	۶۴/۰	۲۸/۲	۷/۸	سیلت ماسه‌ای	ML
۱۹	Sia 1	۴	۶۵/۴	۳۴/۲	۰/۴	رس سیلتی ماسه‌ای	CL-ML/ML
۲۰	Sia 2	۹	۸۵/۰	۱۵/۰	–	رس ضعیف	CL
۲۱	Sia 3	۱۰	۹۰/۰	۱۰/۰	–	رس ضعیف	CL
۲۲	Ziv 1	۱۷	۶۶/۷	۲۷/۳	۶/۰	رس ضعیف ماسه‌ای	CL
۲۳	Ziv 2	۱۲	۷۱/۴	۲۴/۱	۴/۵	رس ضعیف با ماسه	CL

*غیر پلاستیک[11]

و آهکی و از لحاظ کیفیت متنوع هستند؛ از خاک‌های با چسبندگی بالا در تپه نوشیجان و زیویه گرفته تا خاک غیر پلاستیک (غیر چسبنده) در هگمتانه. با این وجود خشت‌های زیویه از استحکام کافی برخوردار نیستند و همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود در اثر فرسایش اجزای آنها متلاشی و پودر شده اند. البته این می‌تواند بیشتر ناشی از بارش برف و سرمای زیاد در این منطقه و عدم پوشش یا اندود خشت‌ها باشد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همهٔ کسانی که در اجرای این طرح صمیمانه همکاری کرده اند، خصوصاً جناب آقای دکتر رسول وطن‌دوست (رییس سابق پژوهشکده حفاظت و مرمت آثار تاریخی-فرهنگی)، سرکار خانم فرح سادات مدنی (کارشناس پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی) و همهٔ مسئولان و کارشناسان محوطه‌های مورد مطالعه تشکر و قدردانی می‌کنم.

پی‌نوشت‌ها

1.Decay

2.Damage

۳. کانی‌های رسی: مواد معدنی سیلیکات‌های آلومینیم آب‌دار متشکل از ساختارهای کوچک و تخت بلوری هستند که اغلب صفحه نامیده می‌شوند و تمایل به کلوخه شدن دارند. ابعاد این کانی‌ها در طیف ۲-۰/۱ میکرومتر قرار می‌گیرد اما بزرگی‌شان به ۲۰ میکرومتر هم می‌رسد. این کانی‌ها محصول فرسایش فلدسپارها و بسته به میزان هوازدگی و شرایط اقلیمی دارای انواع مختلفی مثل کائولینیت‌ها، ایلیت‌ها و مونت‌موری یونیت‌ها هستند. از ویژگی‌های اصلی این کانی‌ها شکل‌پذیری و چسبندگی آنها است.

4. Swelling

5. Dispersing

۶. ذرات کلوئیدی: کلوئید یا چسب‌سان حالتی بین محلول و مخلوط است که ذرات حل‌شونده در آن بزرگ‌تر از ذرات محلول‌ها هستند. این ذرات در حد نانو بوده و کوچک‌تر از آن هستند که در محلول ته‌نشین شوند مانند مخلوط نشاسته در آب.

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

۷. فلدسپار: یکی از کانی‌های اصلی حاصل از فرسایش و هوازدگی سنگ‌های آذرین، فلدسپارها هستند. این کانی‌ها دارای ترکیبات آلومینوسیلیکات‌های قلیایی با انواع مختلف مانند آلبیت، ارتوکلاز و... هستند که در اثر فرسایش کانی‌های رسی را به وجود می‌آورند.

۸. کانی‌های شبه‌رسی: این کانی‌ها مانند میکا به لحاظ دانه‌بندی ریز هستند و رفتاری مشابه رس‌ها از خود نشان می‌دهند.

۹. دانه‌بندی: جداسازی دانه‌های خاک در اندازه‌های مختلف [را می‌گویند] که هر بخش از این دانه‌ها درصدی از کل نمونه است.

۱۰/ شاخص خمیری: شاخص خمیری اختلاف بین حد روانی و حد خمیری (PI=PL-LL) است که تمایل نشانهٔ تمایل خاک به چسبندگی و خمیری شدن خاک است. حد خمیری به بسته به درصد آب لازم برای قرار گرفتن خاک در حالت خمیری و نیمه‌جامد و حد روانی درصد آب لازم برای قرارگیری خاک بین حالت خمیری و روانی است.

۱۱. غیر پلاستیک: موادی مانند ماسه‌ها که قابلیت شکل‌پذیری و چسبندگی ندارند.

منابع

- بهنیا، کامبیز و امیر محمد طباطبایی. (۱۳۷۷). *مکانیک خاک*. ج۱. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- بالدراما، آل جاندروآلوا و جیاکومو کیاری. (۱۳۷۷). «مرمت و حفاظت ساختمان‌های خشتی بدست آمده از کاوش‌های باستان شناسی». در *حفاظت و مرمت در کاوش‌های باستان‌شناسی*. [گردآوری] استانلی پرایس. ترجمهٔ میرمحسن موسوی. تهران: دانشگاه هنر تهران.
- تیتونیکو، جین ماری. (۱۳۸۵). *کتاب راهنمای آزمایشگاهی برای حفاظتگران بنا*. ترجمهٔ منیژه هادیان دهکردی. تهران: پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی فرهنگی؛ نشر هادیان.
- کسایی، رضا. (۱۳۵۵). «نگاهی به بناهای خشتی ایران». در مجموعه *مقالات نخستین کنفرانس بین‌المللی حفاظت از بناهای خشتی*. یزد، ایکوموس بین‌الملل و ایران، ۲۵ـ ۳۰ نوامبر ۱۹۷۲.
- عسکری، فرج‌اله و علی فاخر. (۱۳۷۲). *تورم و واگرایی خاک‌ها از دید مهندس ژئوتکنیک*. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران.
- معتمد، احمد. (۱۳۶۸). *رسوب‌شناسی ۱* (روش‌های مطالعه). تهران: مؤسسهٔ انتشارات و چاپ دانشگاه تهران.
- وارن، جان. (۱۳۸۷). *حفاظت سازه‌های گلین*. ترجمهٔ مهرداد وحدتی. تهران: رسانه‌پرداز؛ مؤسسهٔ فرهنگی ایکوموس ایران.
- ولفسکیل، لایل و وین دانلپ و باب کالاوی. (۱۳۶۶). *استفاده از خاک در خانه‌سازی*. ترجمهٔ حسین تابش. تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- هادیان دهکردی، منیژه. (۱۳۸۶). *کاربری پژوهش‌های آزمایشگاهی در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی (مواد و مصالح)*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران؛ پژوهشکدهٔ حفاظت و مرمت آثار تاریخی ـ فرهنگی.
-ASTM 1984. «Standard Test Method for Liquid Limit, and Plasticity Index of Soils». in *Annual book of ASTM standards*, D4318-84, 04.08, pp.682-691.
-ASTM 1963. (2007). «Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils». In *Annual book of ASTM standards*, D422-63, 04.08, pp.93-99.
- Hadian Dehkordi, Manijeh and Rasool Vatandoust and Yousef Majidzadeh and Mohsen G. Kashi. (2008). "Archaeological Site of Konar Sandal, Jiroft, Iran: Conservation of Earthen Remains". In 10th International conference on "Study and Conservation of earthen Architectural heritage", Bamako, Mali.
-Watanabe, K and R. Vatandoust and Y. Okada. (2003). «Physical, mineralogical and chemical properties of mud brick of the Choga Zanbi». in 9th Internaional conference on the study and conservation of earthen architecture-Terra 2003, Yazd, Iran.