تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۵/۱۵

تأثیر دامنه خمیری خاک (PI) بر مقاومت کششی و فشاری خشت‌های تثبیت شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی

رضا رحیم نیا* داریوش حیدری بنی**

چکیده

خشت یکی از مصالح اصلی تشکیل‌دهنده ساختار بسیاری از آثار تاریخی در ایران است. لزوم حفاظت و مرمت این آثار، به تبع خود ضرورت مطالعه و بررسی درباره خشت را مطرح می‌کند و این ضرورت زمانی بیشتر احساس می‌شود، که برای انتخاب یک ترکیب مناسب و بهینه جهت تثبیت آن، به دنبال جواب و رابطه باشیم. از آنجا که در دانش مهندسی ساختمان به جای بیان مقدار رس در خاک، از دامنه خمیری (PI) استفاده می‌شود و با توجه به اینکه یکی از شاخص‌های اصلی در خاکِ مناسب جهت خشت‌زنی، همین دامنه خمیری است، احساس می‌شود که مقدار آن بتواند بر میزان مقاومت پس از تثبیت خشت با سیمان نیز تأثیرگذار باشد، که این پژوهش در پی دستیابی به این رابطه است.

بررسی حاضر در قالب یک پژوهش کمی و به شیوه تجربی انجام شده و روش انجام پژوهش مبتنی بر مطالعات میدانی، بررسی‌های محیطی و روش‌های تجربی-آزمایشگاهی است. برای این منظور پس از انتخاب خاک چند منطقه کویری ایران و تعیین دامنه خمیری آنها، نمونه‌های خشتی در سه گروه با صفر، پنج و ده درصد سیمان مخلوط و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی قرار گرفته و نتایج نهایی بررسی و تجزیه و تحلیل شده‌اند.

با توجه به نتایج حاصل، وجود رابطه بین مقدار دامنه خمیری و مقاومت مکانیکی حاصل از افزایش مقاومت با سیمان تایید و مشخص گردید هر چه دامنه خمیری خاک مورد استفاده برای تثبیت افزایش پیدا کند، نتایج بهتری برای مقاومت کششی و فشاری حاصل خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: دامنه خمیری خاک (PI)، خشت تثبیت شده با سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

---

* دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان (نویسنده مسئول).
rezarahimnia@gmail.com

** مربی، دانشجوی دکتری مرمت، دانشکده مرمت، دانشگاه هنر اصفهان.

مقدمه

برای حل مشکل تثبیت خشت ها و آسیب پذیری کمتر آنها، راه های مختلفی در جهان مورد استفاده قرار می گیرد. استفاده از سیمان که در دنیای امروز به سرعت فراگیر شده‌است ، براساس تحقیقات انجام شده (Krishnaiah et al, 2008 ;Avrami et al, 2008؛ لانت، ۱۳۶۰؛ رحیمی،۱۳۸۵؛ گروه مؤلفان، ۱۳۸۵؛ حامی، ۱۳۸۷؛ کلیایی،۱۳۸۲؛ ابراهیمی،۱۳۸۰) می‌تواند ویژگی‌های منفی خشت را کاهش و موجب اصلاح آنها شود. با تعیین رابطه بین نقش تثبیت‌کننده‌ها و انواع مختلف خاک -که مشخصه خاک‌ها دامنه خمیری (PI) آنها در نظر گرفته می‌شود- می‌توان نتایج تحقیقات را برای استفاده در سایر مکان‌ها که در پژوهش از خاک آنها نمونه‌برداری نشده است نیز تعمیم داد.

پژوهش حاضر بر آن است تا با مطالعه رابطه بین دامنه خمیری و میزان مقاومت فشاری و کششی حاصل از خشت‌های تثبیت شده با سیمان، بررسی نماید که آیا هماهنگی و یا سطوح معنادار و منطقی در رابطه بین آنها وجود دارد؟

افزایش دامنه خمیری (PI) در خاک های مناسب جهت خشت‌زنی و عملیات مرمتی حاکی از چسبندگی زیاد خاک بدلیل وجود ذرات رسی بیشتر در آن می‌باشد، در نتیجه در خشت حاصل، دانه‌های شن و ماسه و دیگر ذرات خاک با قدرت بیشتری به‌هم چسبیده و توده مقاوم تری ایجاد خواهند نمود، خلاصه اینکه با افزایش دامنه خمیری (PI)، میزان مقاومت مکانیکی خشت حاصل در حالت معمولی نیز افزایش خواهد یافت.

براین‌اساس بر مبنای بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی؛ روی چهار نمونه خاک متفاوت از کارگاه‌های مرمتی ناحیه کویری ایران (یزد، میبد، فردوس، اصفهان) آزمایش‌های مربوط به تعیین دامنه خمیری (PI) انجام شده و سپس آنها را، در چهار دسته دامنه خمیری کمتر از ۵، بین ۵ تا ۱۰، بین ۱۰ تا ۱۵ و بالاتر از ۱۵ دسته‌بندی شده‌است. گفتنی است محل‌های نمونه‌برداری به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که به لحاظ پراکندگی در محدوده کویری ایران مناسب قلمداد شوند.

پس از تعیین دامنه خمیری خاک‌ها، نمونه‌های آزمایشی در ابعاد ۵×۵×۵ و در سه دسته متفاوت بدون اختلاط با سیمان، ۵ درصد و ۱۰درصد اختلاط با سیمان تهیه و پس از عمل آوری، آزمایش‌های مربوط به مقاومت فشاری، کششی و جذب مویینگی آب بر روی آنها انجام گرفته‌است. لازم به ذکر است مبنای پژوهش حاضر بر اساس بررسی‌های فیزیکی شکل گرفته و رفتارهای شیمیایی هدف بررسی‌های این پژوهش نبوده است.

در این مطالعه، ابتدا چارچوب نظری پژوهش با مطالعه اسناد و مدارک کتابخانه‌ای و بررسی آرشیوها مشخص و سپس آزمایش‌ها و بررسی‌های آماری و تجربی بر روی آنها انجام شده است. بررسی حاضر در قالب یک پژوهش کمی دو متغیره و به شیوه تجربی انجام شده و پس از بررسی نتایج و تحلیل بوسیله آزمون خی۲ با درصد خطای ۵٪ فرضیه پژوهش تایید و فرضیه صفر رد شده است.

دلیل استفاده از شاخصه دامنه خمیری (PI) این بوده که تمام خاک‌های مورد استفاده برای خشت‌زنی و عملیات مرمتی حاوی مقادیر زیادی رس می باشد؛ لذا این شاخصه می‌تواند مناسب‌ترین گزینه برای تعیین رابطه باشد. البته توجه به این نکته ضروریست که دامنه خمیری و بررسی رابطه آن با میزان مقاومت حاصل، شاید در تثبیت‌کننده‌های مختلف نتایج متفاوتی را حاصل نماید که باید در هریک از مواد بطور جداگانه مورد بررسی قرارگیرد. در این پژوهش تنها به بررسی رابطه دامنه خمیری (PI) بر مقاومت کششی و فشاری خشت‌های تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است.

در روند مقاله ابتدا به تعریف و پیشینه تحقیق در خصوص موضوع بررسی، روش پژوهش، جامعه آماری و ویژگی ابزار پژوهش اشاره شده است. در ادامه پس از بیان روش اجرای پژوهش، به بررسی و تحلیل آنها در قالب جداول، نمودارها و تصاویر پرداخته شده و در انتها پس از تجزیه و تحلیل استنباطی در قالب بحث، نتایج حاصل از پژوهش بیان گردیده‌است. لازم به ذکر است بحث‌های مرتبط با تثبیت‌کننده‌ها در این پژوهش متمرکز بر ساخت خشت‌های اصلاح شده و سپس استفاده در ساخت می‌باشد و سازه‌های خشتی موجود را در برنمی‌گیرد مگر در بخش‌های مرمتی و دوباره ساخت آنها.

مبانی نظری و پیشینه تحقیق

شاخصه‌های مورد توجه در این پژوهش همان‌گونه که از عنوان آن مشخص است می‌تواند در چند بخش: دامنه خمیری خاک (PI)، تثبیت کننده و نقش سیمان خلاصه گردد، که به همین منظور هر کدام از موارد بطور مختصر معرفی و تبیین خواهد شد:

شاخصه، نشان یا اندیس خمیریِ خاک که با PI[1] مشخص

می‌شود در خاک‌های متفاوت اندازه‌های متفاوتی را دارا می‌باشد. این مقدار که از حاصل تفریق حد روانی (LL)[۲] و حد خمیری (PL)[۳] خاک‌ها بدست می‌آید، با افزایش درصد ذرات رسی (درصد وزنی کوچکتر از ۲ میکرون) افزایش پیدا می‌کند. (حیدری، ۱۳۸۶: ۱۴) مقادیر PI با توجه به آزمایش‌های مربوط به LL و PL در محیط آزمایشگاهی انجام شده و نتایج آنها در بخش‌های بعدی به تفصیل آورده شده‌اند. دیگر بحث مورد توجه در پژوهش، رابطه برای تثبیت یا پایاسازی مطلوب می‌باشد، معادل کلمه پایاسازی را می‌توان تحکیم، پایدارسازی و یا استحکام بخشی در نظر گرفت. تحکیم یا استحکام بخشی[۴] (وارن،۱۳۸۷: ۲۴۰) الحاق فیزیکی و یا کاربرد مصالح مقاوم و چسبنده در بافت اصلی مکان میراث فرهنگی است که برای تضمین تداوم، مقاومت و انسجام سازه‌ای انجام می‌شود (فیلدن و همکاران، ۱۳۸۶: ۸۱)؛ این الحاق فیزیکی در ساختارهای گلی گوناگونی بسیاری یافته است، و در حال حاضر برای استحکام‌بخشی آنها از برخی تجارب سنتی (جایگزین‌سازی مصالح)، مداخلات معدنی مثل اضافه کردن گچ و آهک، سیمان ها، خاک های اصلاح شده، گل های اصلاح شده بعنوان پرکننده، استفاده از مواد افزودنی مصنوعی، استحکام بخش‌های نیمه‌آلی، اصلاح در عملکرد خاک‌ها، مواد آلی طبیعی، رزین‌های مصنوعی، حلال‌ها، تقویت با استفاده از توری و الیاف، داخل کردن بتن‌های مایع استفاده می‌شود (وارن، ۱۳۸۷: ۱۴۷- ۲۰۴).

لانت[۵] نیز در مقدمه مقاله‌ای تحت عنوان "خشت‌های تثبیت شده برای ساختمان" درباره بحث های مرتبط با استحکام بخشی چنین اشاره می کند:"روش های بهبود مقاومت واستحکام طبیعی خاک که عموماً بنام " تثبیت خاک" از آن یاد می‌شود در بسیاری از کشورها به مورد اجرا گذاشته شده‌اند. این روش‌ها چندان جدید نیستند زیرا تثبیت‌کننده‌هایی نظیر روغن‌های طبیعی، عصاره گیاهان مختلف، سرگین های حیوانی و فضولات لانه مورچگان قرن‌های متمادی مورد مصرف بوده‌اند. در سال‌های اخیر روش‌های علمی به روش‌های تجربی نامنظم که اغلب برای تثبیت راه‌های خاکی ابداع گشته‌اند، برای تثبیت خاک‌های ساختمانی ترجیح داده شده‌اند" (لانت،۱۳۶۰: ۱).

نقش پرکننده سیمان در تثبیت خشت نیز، که در بسیاری از منابع مورد بحث قرار گرفته نتایج رضایت بخشی داشته و سیمان، بویژه سیمان پرتلند یک تثبیت کننده مطلوب برای خاک در ۵۰ سال گذشته می‌باشد. سیمان بادوام‌تر و از آهک هیدرولیک (آهکی که در مجاورت با آب نیز گیرش می‌یابد) قوی‌تر است و درباب ضعف‌های آن همان‌گونه که در پیشینه منتشر شده توسط مؤسسه گِتی[۶] آمده‌است: " وقتی که سیمان در نسبت زیاد استفاده شود، با مصالح گلی ناسازگار است و رنگ آن، سختی و فقدان انعطاف‌پذیری (که اغلب منجر به سایش مصالح اصلاح نشده اطراف و ترک خوردن مصالح اصلاح شده می‌شود) و مقدار نمک محلول منجر به عدم موفقیت بسیاری از خاک‌های تثبیت شده با سیمان می‌شود. اما این عدم موفقیت‌ها درک بهتری از محدودیت‌های سیمان را فراهم می‌کند" (Avrami et al, 2008: 99).

عملکرد سیمان در بهبود خواص خاک، تا حدی مشابه آهک[۷] است و می‌توان در ترکیب آن با خاک انتظار تشکیل سیلیکات کلسیم[۸] و آلومینات کلسیم[۹] را داشت. مکانیسم تثبیت خاک با سیمان عمدتاً به بافت خاک بستگی دارد. درخاک های رسی و سیلتی ریز، سیمان به هنگام هیدراتاسیون تشکیل اتصال‌های محکمی در داخل و بین دانه‌های معدنی داده و در نهایت خمیری ایجاد می‌کند که خاصیت پلاستیسیته خاک را کاهش داده و بر مقاومت برشی آن می‌افزاید (رحیمی، ۱۳۸۵: ۵۸۵). از نگاهی دیگر نیز می‌توان به نقش سیمان در بهسازی خاک و استفاده از خاک– سیمان[۱۰] برای تزریق اشاره نمود. در خاک –سیمان، افزودن سیمان به خاک باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش خاصیت خمیری خاک می‌شود و بعنوان ریزدانه مفید در خاک بکار می‌آید (گروه مؤلفان، ۱۳۸۵: ۹۰)، استفاده از آن بعنوان دوغاب، ملات، پرکننده و زیرکار در تعمیر سطوح آسیب‌دیده نیز مطلوب است (وارن، ۱۳۸۷: ۱۵۲). زمانی که مقدار ماسه موجود در خاک زیاد باشد سیمان به میزان ۷ درصد وزنی، تثبیت کننده بهتری برای آن خواهد بود (ابراهیمی، ۱۳۸۲: ۳۵۱) و همچنین هیدراته شدن سیمان و سخت شدن آن باعث چسباندن ذرات خاک به یکدیگر شده و خصوصیات مکانیکی خاک را بهبود خواهد بخشید. تزریق دوغاب سیمان باعث اعتلای ویژگی‌های مکانیکی از جمله افزایش ظرفیت باربری و کاهش نشست‌پذیری و همچنین کاهش نفوذپذیری خاک خواهد شد (گروه مؤلفان،۱۳۸۵: ۹۰)، البته به دلایلی همچون: کاهش گیرش سیمان بدلیل وجود ناخالصی های آلی، اسیدهای آلی، روغن‌ها، قندها و... ، استفاده نابجا از آن در بناهای تاریخی و سوءشهرت، شکننده‌شدن و تغییر رنگ مخلوط حاصل از ترکیب (متمایل به رنگ‌های خاکستری)، احتمال ایجاد

املاح محلول و درنتیجه معیوب شدن و لطمه دیدن مصالح، استفاده از آن در مواردی مورد انتقاد نیز قرار گرفته است (وارن، ۱۳۸۷: ۱۵۳-۱۴۸). با توجه به مطالعات گسترده انجام گرفته (Krishnaiah et al, Avrami et al, 2008 ; 2008 ؛ وارن، ۱۳۸۷؛ لانت، ۱۳۶۰؛ رحیمی، ۱۳۸۵؛حامی، ۱۳۸۷؛ ابراهیمی، ۱۳۸۰؛کلیایی، ۱۳۸۲) استفاده از سیمان در ترکیب خشت ها، وقتی که در نسبت‌های بین ۵ تا۱۰ درصد مورد مصرف قرارگیرد، نتایج مطلوبی را بروز داده است، اگر چه از نسبت‌های تا ۱۵ درصد در نمونه‌های معینی نیز دفاع شده‌است (Avrami et al, 2008: 99).

روش پژوهش

دراین پژوهش شیوه دستیابی به هدف، شیوه تجربی است، که در آن تاثیر دامنه خمیری (PI) و درصد سیمان بر مقاومت خشتها مشاهده و مورد اندازه گیری قرار گرفته است. سیمان به نسبت‌های ۵ و ۱۰ درصد به نمونه‌های آزمایشی اضافه شده، لذا شاخص متغییر بین نمونه‌ها، متفاوت بودن مقدار دامنه خمیری (PI) آنها و مقدار سیمان است. برای این منظور بطور تصادفی خاک چند شهر متفاوت (اصفهان، فردوس، میبد، یزد) که در کارگاه های خشت زنی مورد استفاده قرار می‌گرفته، انتخاب و بعنوان نمونه‌ای از جامعه آماری مناطق کویری ایران مورد بررسی واقع شده است.

برای گروه شاهد ۴۸ نمونه خشت از خاک ها ساخته شده (خاک هر شهر ۱۲ نمونه) و با توجه به اختلاط ۵ و ۱۰ درصد سیمان دو گروه آزمایشی شکل گرفت، که در هر گروه ۴۸ نمونه وجود داشت (خاک هر شهر ۱۲ نمونه). در گروه شاهد خشت‌ها با روش فرآوری سنتی که شامل ساختن مخلوط، ماندگاری آب برای نفوذ، قالب‌زدن و خشک کردن در هوای آزاد است رفتار شد و برای گروه آزمایشی نیز پس از اختلاط و ساخت آنها، تنها بدلیل اینکه سیمان برای انجام واکنش نیازمند آب است به مدت چهارده روز در زیر گونی‌های خیس قرار گرفته تا آب مورد نیاز آن تأمین گردد[11] (رطوبت تماسی) و سپس در هوای آزاد رطوبت خود را ازدست داده است.

طرح پیش آزمون- پس آزمون نیز برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده و به همین دلیل مقاومت فشاری، کششی و ... ابتدا بر روی نمونه‌های بدون اختلاط با سیمان و پس از آن بر روی نمونه‌های ۵ درصد و ۱۰درصد اختلاط بررسی شده‌اند. گفتنی است این بررسی با توجه به روش شناسی بیان شده، برای جمع‌آوری اطلاعات از روش‌های تجربی- آزمایشگاهی و مطالعات میدانی بهره گرفته است.

جامعه و نمونه آماری

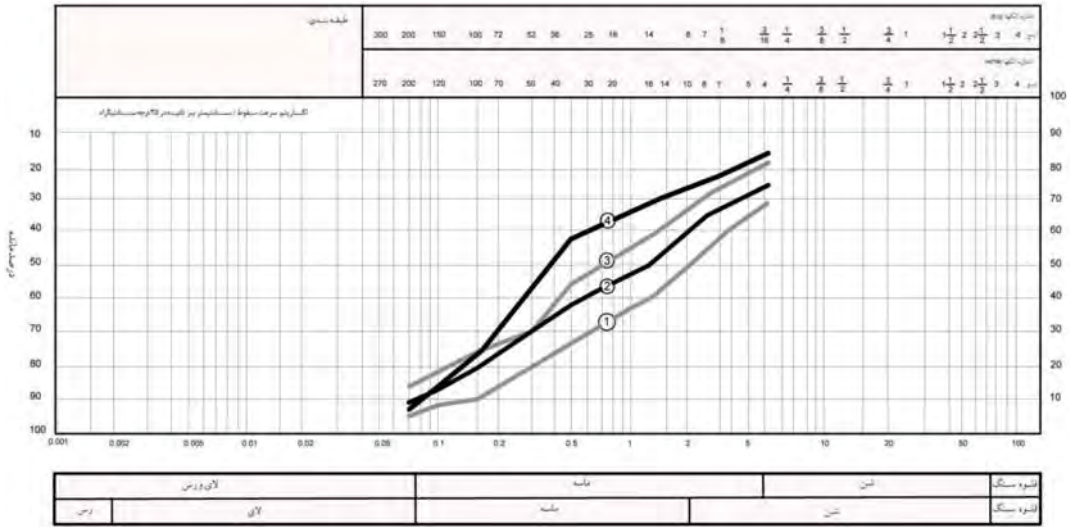
جامعه آماری پژوهش متمرکز بر مناطق کویری که استفاده از معماری خشتی در آنها مرسوم است بوده و نتایج حاصل از پژوهش درصدد است که قابل تعمیم به کل باشد تا بتواند در هر موقعیت مکانی و زمانی مورد استفاده قرار گیرد. نمونه گیری در جامعه بصورت تصادفی بوده و ۴ محل متفاوت مورد انتخاب قرار گرفته است.

ابزار پژوهش و ویژگی آن (اعتبار و روایی بودن)

استفاده از آزمایش‌های تعیین دانه‌بندی با الک، تعیین حد خمیری، حد روانی (حیدریان، ۱۳۸۷:۷۱-۳۹)، سوختن‌تَر برای خاک‌ها و همچنین آزمایش های تعیین PH (Teutonico, 1988: 30)، مقاومت فشاری (حامی، ۱۳۸۷: ۱۴۲) و کششی و همچنین جذب موئینگی(Teutonico, 1988: 43)، ماندگاری در برابر غوطه‌وری در آب (Teutonico, 1988: 35)، بر روی نمونه‌های ساخته شده در پژوهش مورد توجه قرار گرفت. درباره روایی بودن آنها نیز می‌توان گفت تنها شاخصه‌هایی که می‌توانند برای مقدار دامنه خمیری (PI) شناخته شوند آزمایش های حد خمیری و حد روانی و بررسی دانه‌بندی خاک‌هاست که برای نمونه‌های مورد نظر انجام شده است و نتایج آن حاصل گردیده‌اند. برای آگاهی از روایی‌بودن روش و ابزار جمع‌آوری اطلاعات با متخصصین

جدول ۱. محل‌های نمونه برداری خاک‌ها

ردیف	منطقه نمونه برداری	محل نمونه برداری
۱	اصفهان	کارگاه مواد و مصالح دانشگاه هنر اصفهان
۲	فردوس	کارگاه خشت زنی محله سردشت
۳	میبد	کارگاه خشت زنی مسجد جامع میبد
٤	یزد	کارگاه خشت زنی مجاور حصار محله کوشک نو



تصویر۱. منحنی دانه‌بندی خاک‌ها (۱.اصفهان ۲.میبد ۳.فردوس ۴.یزد)

زیربط (متخصصین مرمت بنا، مرمت آثار، شیمی و سازه) بحث و تمام آزمایش‌ها و اقدامات انجام شده تحت مشورت آنها صورت پذیرفته است و همچنین برای جلوگیری از اشتباهات احتمالی در هر آزمایش ۳ نمونه تحت آزمون قرار گرفته و سپس میانگین آنها بعنوان مرجع در تحلیل‌ها مورد استفاده قرارگرفته‌است. درباره اعتبار روش نیز با توجه به اینکه شاخصه خاک‌ها ممکن است با آزمایش‌های افراد مختلف و بدلیل منابع خطای موجود کمی تغییر داشته باشد، آزمایش‌ها در دو نوبت انجام پذیرفت و میانگین آنها مد نظر قرار گرفت.

روش اجرای پژوهش (مطالعات آزمایشگاهی)

برای پژوهش مورد نظر ابتدا از خاک های موجود در کارگاه‌های خشت‌زنی مناطق (اصفهان، فردوس، میبد و یزد) نمونه‌برداری شده و در ابتدا آزمایش دانه‌بندی با الک‌های شماره ۴، ۸، ۱۶، ۳۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ برای هر کدام از آنها انجام شد که نمودار حاصل در تصویر۱ آمده است.

برای آزمایش سوختن‌تَر نیز مقداری از نمونه خاک‌ها در آزمایشگاه شیمی با کمی آب مخلوط شده و پس از اضافه کردن چند قطره محلول اسید سولفوریک غلیظ و مشاهده دانه‌های سیاه رنگ خاک‌ها، مقدار مواد آلی موجود در آنها مشخص گردید. آزمایشها برای تعیین مقدارPI نیز با آزمایش حد روانی بوسیله دستگاه گاساگرانده وخاک عبور کرده از الک ۴۰ و به شیوه خشک به تَر (اضافه شدن آب در هر مرحله به مخلوط گِل) انجام شده و تعداد ضربه‌ها در هر مرحله یادداشت گردیده‌است. نمونه‌های مرطوب پس از وزن در کوره برقی (حرارت ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد) قرار گرفته و پس از ۲۴ ساعت دوباره وزن و نتایج ثبت گردید. سپس بر اساس تعداد ضربات و درصدهای رطوبت، نمودار جریان ترسیم، و میزان حد روانی مشخص گردید. برای

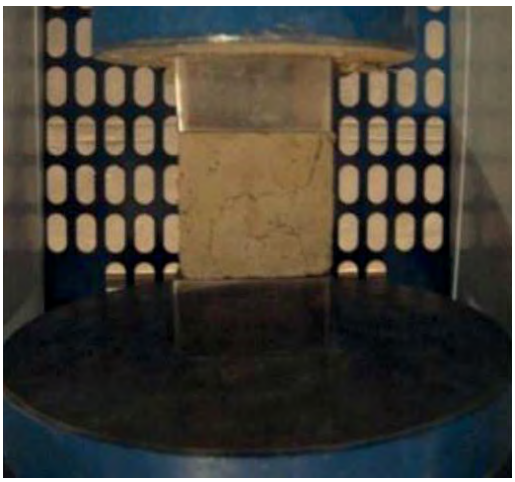
تصویر۲. نمونه های مربوط به ترکیب ۵ درصد خاک یزد

تصویر۳. قرار گیری نمونه ها در زیر رطوبت مستقیم

تصویر۴. آزمایش مقاومت کششی نمونه ها

تعیین حد خمیری خاک‌ها، پس از فتیله کردن گِل به قطر ۳/۲ میلی متر، نمونه مرطوب وزن شده و در کوره برقی (با همان شرایط ذکر شده) قرار گرفت و پس از خشک شدن، دوباره وزن، و نتایج آن ثبت گردید (ASTM D 4318).

پس از آزمایش های مربوط به تعیین دامنه خمیری خاک‌ها، نمونه‌های مکعبی ۵*۵*۵ (جهت مقاومت فشاری و میزان صعود آب) و پاپیونی (جهت آزمایش مقاومت کششی) با روش فرآوری مرسوم ساخت در کارگاه های مرمتی، ساخته شد (تصویر ۲) و پس از عمل آوری آن بوسیله رطوبت تماسی بمدت ۱۴ روز (تصویر۳) و خشک شدن در شرایط محیطی آزمایشگاه (دمای۲۵درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۶۰ درصد) تحت آزمایش مقاومت فشاری با جک ملات شکن دیجیتال قرار گرفت (تصویر۵). برای آزمایش مقاومت کششی نیز نمونه های پاپیونی در جک کشش قرار داده شده (تصاویر۴و۶) و نتیجه های حاصل که بر اساس کیلو نیوتن مشخص است، پس از تبدیل به

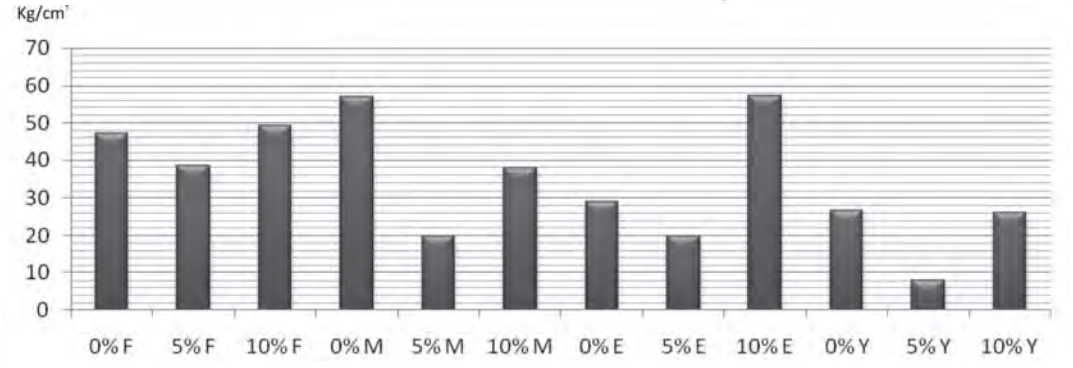


تصویر ۵ . آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها

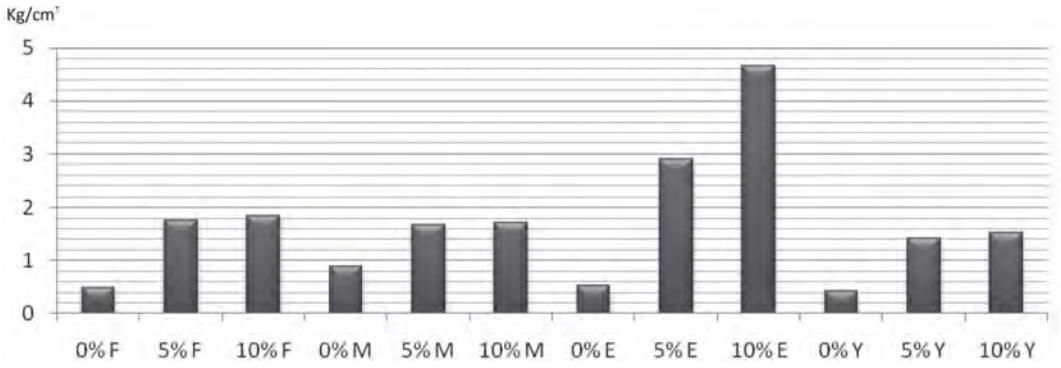
تصویر ۶. نمونه ها پاپیونی تحت آزمایش مقاومت کششی

کیلوگرم بر سانتیمتر مربع ثبت گردید.

برای آزمایش جذب مویینگی (میزان صعود آب) بعلت اینکه نمونه‌های خشتی در صورت تماس مستقیم در آب شسته شده و از بین میروند پس از قراردادن یک سطح ابری و قراردادن پارچه نخی بر روی آن نمونه‌ها بر روی پارچه قرار داده شده و در چند بازه زمانی ۱۵ دقیقه، ۴۵ دقیقه،



تصویر۷. نتایج حاصل از مقاومت فشاری تمام نمونه ها



تصویر ۸ . نتایج حاصل از مقاومت کششی تمام نمونه ها

۱ ساعت ، ۳ساعت و ۴ ساعت میزان صعود آب بر حسب میلیمتر اندازه گیری و ثبت گردید(Teutonico, 1988: 43).

گفتنی است کلیه مراحل انجام آزمایش ها توسط نگارندگان و در آزمایشگاه مواد و مصالح دانشگاه هنر اصفهان انجام شده است.

نتایج

با توجه به اینکه در پژوهش حاضر مقیاس اندازه‌گیری اسمی بوده و پژوهش کمی دو متغییره (دامنه خمیری، مقدار سیمان و میزان مقاومت فشاری و کششی) مورد توجه است، در بررسی نتایج از روش‌های توصیفی و استنباطی استفاده شده و برای تجزیه و تحلیل از آزمون آماری خی۲ استفاده شده که درجه آزادی حاصل نیز ۲ بوده است.

در تصاویر۷ و۸ شماره‌های ۲،۱و۳ به ترتیب مربوط به نمونه‌های بدون سیمان، ۵٪ سیمان و ۱۰٪ سیمان در اختلاط با خاک فردوس می باشد و به همین ترتیب شماره‌های ۵،۴ و۶ مربوط به خاک میبد؛ ۸،۷ و۹ مربوط به خاک اصفهان و ۱۱،۱۰ و ۱۲ مربوط به خاک یزد می‌باشد.

با توجه به تصاویر ۷و ۸ که دو مقاومت فشاری و کششی را بررسی نموده است بیشترین مقاومت فشاری در خشت تثبیت شده با خاک اصفهان و در نمونه ۱۰ درصد اتفاق افتاده است و بیشترین حد مقاومت کششی نیز در خشت تثبیت شده با همان خاک حاصل شده است که دارای بالاترین مقدار دامنه خمیری (PI) است.

همانطور که اشاره‌گردید این مقاله تنها به بحث پیرامون مقاومت مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی) پرداخته و نتایج آن مورد بحث و تجزیه و تحلیل واقع شده‌است، ولی با توجه به اینکه بحث کشش مویینگی در نمونه‌های خاک – سیمان مورد بحث قرار می‌گیرد تنها جهت بررسی نتایج آن نیز ارائه شده است ولی در تجزیه و تحلیل‌ها و

جدول ۲. دامنه خمیری خاک‌های مورد آزمایش

حرف اختصاری	Y	F	M	E
محل نمونه برداری	یزد	فردوس	میبد	اصفهان
مقدار PI	4/23	12/8	6/87	16/14

جدول ۳. ویژگی‌های خاک‌های مورد آزمایش

محل نمونه برداری	یزد	فردوس	میبد	اصفهان
ویژگی ها	خاک ماسه ای با کمترین مقدار رس و مواد آلی نسبتاً زیاد	خاک با رس بالاتر و چسبندگی بیشتر و مواد آلی کم	خاک چسبنده و با درصد رس بالا و مواد آلی خیلی زیاد	با درصد رس بالا و مواد آلی کم

جدول ۴. بررسی تأثیر مثبت و منفی در نتایج حاصل از آزمایش ها

	۵ درصد سیمان				۱۰ درصد سیمان			
	اصفهان	فردوس	میبد	یزد	اصفهان	فردوس	میبد	یزد
مقاومت فشاری	-	-	-	-	+	+	+	+
مقاومت کششی	+	+	-	بدون تاثیر	+	+	+	+

جدول ۵. جدول فراوانی حاصل از نتایج آزمایش ها

	افزایش (مثبت)	کاهش (منفی)	بی تاثیر
فراوانی F_o	۱۰	۵	۱
درصد	٪۶۲	٪۳۲	٪۶

جدول ۶. جدول کل حاصل از نتایج آزمایش ها

$\frac{(Fo_Fe)^2}{Fe}$	$(Fo_Fe)^2$	Fo_Fe	فراوانی مورد انتظار F_e	فراوانی F_o	مقوله ها
۰/۵	۴	۲	۸	۱۰	افزایش
۱/۱۲	۹	۳	۸	۵	کاهش
۶/۱۲	۴۹	-۷	۸	۱	بی تاثیر
۷/۷۴ *			جمع کل		

بررسی فرضیه پژوهش دخالت داده نشده است.

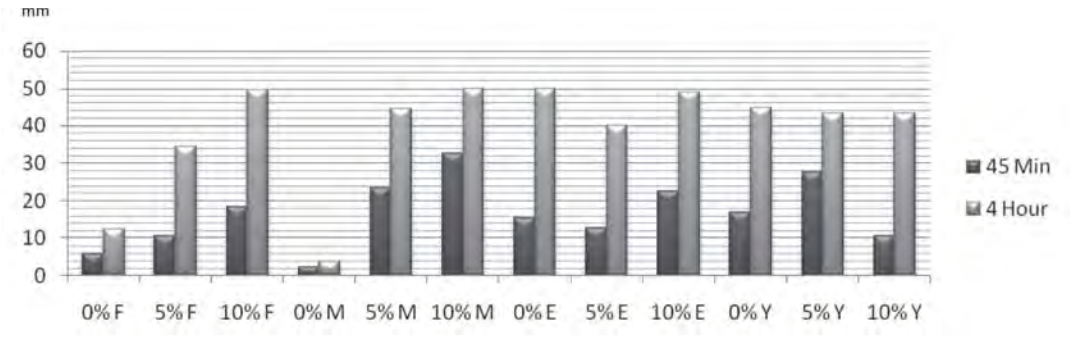
در جدول ۴ میزان مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نسبت به نمونه‌های بدون سیمان بررسی و در دو حالت مثبت و منفی آمده است (علامت مثبت به معنی تاثیر مثبت و علامت منفی به معنی تاثیر منفی در شاخص مورد نظر می‌باشد). در جداول ۵ و ۶ فراوانی مربوط بررسی و با توجه به نتایج، بدلیل بالاتر بودن ۷/۷۴ (خی ۲ محاسبه شده)، از عدد مربوط به درجه آزادی ۲ و خطای ۵ درصد (۵/۹۹) در جدول G توزیع مجذور کا (خی۲) (اسحاقیان، ۱۳۸۲: ۱۱۱) فرضیه پژوهش با ۵ درصد خطا تایید شده است.

* (درجه آزادی) $df=(۲-۱)(۳-۱)=۲$

$a=۰/۰۵=۵/۹۹ \longrightarrow ۷/۷۴<۵/۹۹$

بحث

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش و آزمایش‌های انجام شده که در قسمت‌های قبل آورده شد نتایج در سه آزمایش مقاومت فشاری، کششی و جذب مویینگی بررسی شد. در بحث مقاومت فشاری در تمام نمونه‌ها در ۵ درصد اختلاط با سیمان حالت معکوس داشته و موجب کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. در خاکِ با دامنه خمیری بالای ۱۵ با افزودن ۱۰ درصد سیمان مقاومت فشاری بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است (نزدیک دو برابر)؛ دامنه خمیری بین ۱۰ تا ۱۵ تغییرات مقاومت فشاری نسبت به خشت خام بدون سیمان کمتر بوده ولی اندازه آن محسوس است. در خاک‌های با دامنه خمیری بین ۵ تا ۱۰ همانند خاک میبد شرایط تغییر کرده و با افزودن سیمان به خاک هیچ افزایش مقاومتی حاصل نشده و از میزان مقاومت مطلوب اولیه نیز کاسته شده است. درخاک‌های با دامنه خمیری کمتر از ۵ نیز کاهش مقاومت را شاهدیم و می‌توان



تصویر ۹. نتایج حاصل از آزمایش کشش مویینگی در تمام نمونه ها

این‌گونه نتیجه گرفت که در خاک‌های با دامنه خمیری بالاتر از ۱۰ استفاده از سیمان به میزان ۱۰ درصد نتایج مطلوب و مؤثری را ایجاد نموده است، این افزایش مقاومت در دامنه خمیری بالاتر از ۱۵ به حد اعلای خود رسیده است ولی در دامنه خمیری کمتر از ۱۰ نتایج رضایت بخش نبوده و تغییر خاصی در بحث مقاومت فشاری حاصل نشده است.

در بحث مقاومت کششی در تمام نمونه‌ها با افزودن سیمان میزان مقاومت کششی افزایش یافته‌است. این مقدار چه با افزودن ۵ درصد و چه با افزودن ۱۰ درصد سیمان نتایج مطلوب را حاصل نموده است. در دامنه خمیری بالاتر از ۱۵ این مقدار در ۵ درصد به نزدیک ۶ برابر حالت اولیه و در ۱۰ درصد به ۱۰ برابر مقدار مقاومت اولیه رسیده است. در خاک‌های با دامنه خمیری بین ۱۰ تا ۱۵ افزایش مقاومت در هر دو حالت ۵ و ۱۰ درصد نزدیک به ۴ برابر می‌شود. در خاک‌های با دامنه خمیری کمتر از ۵ در هر دو حالت ۵ و ۱۰ درصد نزدیک به ۲ برابر می‌شود؛ در نتیجه افزایش مقاومت کششی در دامنه خمیری بالاتر از ۱۰ نتایج بهتری را حاصل نموده و با کمتر شدن دامنه خمیری میزان افزایش مقاومت کششی نیز کاهش می یابد.

با توجه به نتایج حاصل از میزان جذب مویینگی آب[۱۲]بطور میانگین نتایج مطلوب نبوده و با افزودن سیمان در اکثر موارد با افزایش سطح صعود آب مواجه هستیم، البته گفتنی است با اینکه میزان صعود آب افزایش یافته و بعنوان یک شاخصه منفی تلقی می‌شود ولی با انجام آزمایش غوطه‌وری در زیر آب بر حسب دقیقه برای نمونه‌ها نتایج نشان داد که در تمام نمونه‌های تثبیت شده با سیمان پس از غوطه‌وری نسبت به حالت اولیه، از هم پاشیدگی بسیار کمتر شده است و این خود نکته‌ای حائز اهمیت است.

در دامنه خمیری بالاتر از ۱۵ مقدار کشش مویینگی با افزودن سیمان در دوره زمانی طولانی‌تر تغییر اندکی نموده که خطای مورد مشاهده احتمالاً به جهت خطاهای دستگاهی و انسانی در طول آزمایش ایجاد گردیده است و می‌توان گفت با افزودن سیمان تغییری جزیی در افزایش میزان کشش مویینگی در نمونه های با دامنه خمیری بالاتر از ۱۵ داریم، در دامنه خمیری بین ۱۰ تا ۱۵ با افزودن سیمان به مخلوط حاصل، هم در ۵ درصد و هم در ۱۰ درصد، میزان صعود آب افزایش یافته و در زمان مساوی در ۵ درصد ۳ برابر و در ۱۰ درصد به حدود ۴ برابر افزایش یافته است. دامنه خمیری بین ۵ تا ۱۰ نیز در هر دو حالت افزایش میزان صعود آب را دارد و در مدت زمان برابر با آزمایش قبلی حدود ۱۰ برابر افزایش صعود را داشته است. در دامنه خمیری کمتر از ۵ شرایط معکوس بوده ولی بعلت ناچیز بودن مقدار، قابل چشم‌پوشی است. در این شرایط افزودن سیمان در کاهش یا افزایش صعود رطوبت و کشش مویینگی نقشی نداشته است.

با توجه به نتایج بحث شده می‌توان پیشنهاد داد برای نتیجه مطلوب در استحکام (مقاومت فشاری و کششی) بهتر است میزان دامنه خمیری (PI) خاک مورد استفاده بالاتر از ۱۰ باشد و هر چه این مقدار افزایش یابد در میزان مقاومت مؤثر خواهد بود. همچنین میزان استفاده از ۱۰ درصد سیمان در ترکیب خشت تثبیت شده، نتایج بهتری نسبت به ترکیب ۵ درصد حاصل نموده است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که دامنه خمیری خاک‌ها (PI) و مقدار سیمان بر مقاومت فشاری و کششی خشت‌ها مؤثر بوده و هرچه مقدار دامنه خمیری خاک مورد استفاده بالاتر می‌رود، میزان مقاومت حاصل از ترکیب با سیمان نیز افزایش می‌یابد. قابل توجه است که میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان اضافه شده به ترکیب خاک در مقایسه با نسبت ۵ درصد، نتایج بهتری را حاصل نموده‌است.

با توجه به آنچه در مقاله به آن پرداخته شد، درصورت استفاده از تثبیت کننده سیمان برای خشت در هر منقطه نسبت به منطقه دیگر، پس از تعیین مقدار PI می‌توان احتمالات اولیه برای نتایج پس از تثبیت را داد و ترجیحاً خاک مناسب جهت ترکیب (خاک‌های با PI بالاتر از ۱۰)، را جهت تثبیت انتخاب نمود.

یکی از مشکلات شایع خشت در سازه‌های خشتی، ضعف مقاومت کششی آن است که بعنوان یکی از معایب خشت ها برشمرده شده است. با توجه به بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام شده در طی این پژوهش، استفاده از ۱۰ درصد سیمان بعنوان تثبیت کننده در خشت، بهبود مقاومت کششی را تضمین می‌نماید و در این درصد ترکیب، میزان مقاومت کششی را بین ۳ تا ۸ برابر نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش داده است. در مقاومت فشاری نیز تنها در نمونه خاک میبد نتایج منفی بوده که با بررسی انجام شده، وجود مواد آلی بالا در آن، نسبت به سایر خاک‌ها موجب این رویداد شده است. با توجه به اینکه وجود مواد آلی موجب مختل شدن و توقف عملیات هیدراتاسیون سیمان می‌گردد، لذا موجب تأثیر در واکنش سیمان و پاسخ منفی در آن شده، که باید سعی شود از خاک‌های با حداقل مواد آلی برای تثبیت با سیمان استفاده شود.

نکته‌های دیگر که جز اصلی این پژوهش محسوب نمی‌شوند ولی بعنوان بحث‌های تکمیلی می‌توانند عنوان شوند نیز حائز توجه است؛ بحث تغییر رنگ پس از اختلاط سیمان در نمونه‌ها که در پژوهش حاضر پس از اختلاط ۵ و ۱۰ درصد سیمان و مقایسه رنگ حاصل از آنها اختلاف رنگ در نمونه‌ها بسیار کم بوده تا حدی که در برخی موارد تشخیص آنها از یکدیگر سخت می‌شد؛ ولی در نمونه‌هایی که دارای مواد آلی بیشتر نسبت به سایر نمونه‌ها بوده‌اند، تغییر رنگ مشهودتر بوده است. بحث افزایش میزان جذب موییننگی نکته دیگر است که با افزودن سیمان حتی به میزان ۵ درصد، میزان آن افزایش یافته و خود یک شاخصه منفی قلمداد می‌شود ولی پس از قرارگیری نمونه‌ها در حالت اشباع از رطوبت ازهم‌پاشیدگی نمونه‌ها بسیار کم شده و در نمونه‌های حاوی سیمان مقاومت در برابر از هم‌پاشیدگی بسیار بالا رفته است.

در نهایت، اگر چه منشورها و قوانین مرمتی استفاده از مصالح بومی را توصیه نموده‌اند ولی همواره در آنها مجاز شمردن در صورت ضرورت استفاده از علم روز نیز مد نظر قرار گرفته و لذا، استفاده از خشت‌های تثبیت شده با سیمان اگر چه جذب موییننگی را افزایش داده و لیکن با توجه به نتایج حاصله، در مکان‌های نیازمند مقاومت کششی بالا و به همراه با رطوبت می‌تواند قابل توصیه باشد، زیرا افزودن سیمان در وارفتگی نمونه‌های خشتی مجاور آب تاثیر شگرفی داشته و ازهم‌پاشیدگی نمونه‌ها را بسیارکم کرده است.

تشکر و قدردانی

در پایان شایسته است از یاری بی‌دریغ اساتید ارجمند جناب آقای دکتر غلامرضا وطنخواه و دکتر احمد صالحی‌کاخکی که در زمان انجام این پژوهش از هیچ کمکی دریغ نورزیدند، صمیمانه قدردانی شود.

پی‌نوشت

1- Plasticity Index

The Plasticity Index is the numerical difference between the Liquid Limit and the Plastic Limit of a soil. Calculate the Plasticity Index using the formula:Plasticity Index = Liquid Limit - Plastic Limit

2- Liquid Limited
3- Plastic Limit
4- Consolidation
5- Lunt
6 -Getty
7 -$CaCO_3$
8 -CaO, SiO_2
9 -CaO, Al_2O_3
10 -Soil – Cement

۱۱- مخلوط خاک سیمان برای کسب مقاومت باید حداقل به مدت یک تا دو هفته عمل‌آوری شود. در واقع عمل‌آوری مرحله‌ای است که طی آن فرآیند هیدراتاسیون سیمان با تشکیل و رشد لعاب سیلیکات‌های کلسیم کامل می شود. این فرآیند برای تکمیل نیاز به رطوبت و دمای مطلوب دارد. بدلیل تبخیر در طول فرآیند عمل‌آوری، باید از کاهش رطوبت در تماس با مخلوط خاک - سیمان جلوگیری نمود (رحیمی، ۱۳۸۵: ۵۹۵)

۱۲- این قسمت تنها جهت اطلاع از ویژگی منفی در بحث کشش مویینگی افزوده شده است و بدلیل تمرکز بر روی خصوصیات مکانیکی در نتایج پژوهش دخیل نبوده‌اند.

منابع

- ابراهیمی، افشین. (۱۳۸۰). مطالعه میدانی- آزمایشگاهی نقش فرآورده‌های بوم آورد در تثبیت و استحکام بخشی خشت خام و اندود کاه‌گل (مطالعه موردی ذیگورات چغازنبیل). پایان نامه کارشناسی ارشد. اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان.
- حامی، احمد. (۱۳۸۷). مصالح ساختمان. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- حیدری، داریوش. (۱۳۸۶). آزمایشگاه مصالح بنایی (جزوه درسی). اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان.
- حیدریان، هومن. (۱۳۸۷). روش‌های استاندارد آزمون‌های آزمایشگاه مکانیک خاک بر اساس استاندارد ASTM 2000. شیراز: انتشارات آوند اندیشه.
- رحیم‌نیا، رضا. (۱۳۸۹). مواد گلی اصلاح شده: نگاهی به اصلاح کننده‌های مورد استفاده برای خشت و خاک در جهان تا سال ۲۰۰۸. ماهنامه آموزشی طاق، شماره ۴۳ و ۴۴. ص۳۰ تا ۳۸.
- رحیمی، حسن. (۱۳۸۵). مصالح ساختمانی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- سازمان میراث فرهنگی و گردشگری و پایگاه پژوهشی ارگ بم (۱۳۸۷). دومین سالنامه گزارش فعالیت‌های مطالعاتی و اجرایی پروژه نجات بخشی میراث فرهنگی بم (ارگ). تهران: رسانه پرداز.
- سازمان میراث فرهنگی کشور، مدیریت امور بین‌المللی و روابط فرهنگی. (۱۳۸۲). پیش چاپ مقالات نهمین کنفرانس بین‌المللی مطالعه و حفاظت معماری خشتی (یزد). تهران: معاونت معرفی و آموزش سازمان میراث فرهنگی کشور.
- علیزاده، یونس و عزیزی، عبدالحمید. (۱۳۸۵). *آزمایش‌های مقاومت مصالح*، مبانی نظری و استانداردها. تهران: انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- فرحبخش، مرتضی. (۱۳۸۶). *طرح حفاظت ومرمت میدان تکیه ارگ بم*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان.
- کد، جی، آر. (۱۳۵۸). *خشت‌های تثبیت شده با آهک*. ترجمه مقالات علمی و فنی شماره۳. ترجمه فروز روشن بین. تهران: سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن.
- کلیایی، مهدی. (۱۳۸۲). *کاهگل و ارزش آن در محافظت از سازه‌های گلین* (حفاظت از کوره‌های عمل‌آوری فلز و پخت سفال در محوطه تاریخی اریسمان). پایان‌نامه کارشناسی. اصفهان: دانشگاه هنر اصفهان.
- گروه مؤلفان. (۱۳۸۵). *مصالح ساختمانی یادنامه استاد حامی*. ویراسته جواد فرید. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- لانت، ام، جی. (۱۳۶۰). *خشت‌های تثبیت شده برای ساختمان*. ترجمه مقالات علمی و فنی شماره ۱۳. ترجمه فروز

روشن‌بین. تهران: سازمان تحقیقات ساختمان و مسکن.
- وارن، جان (۱۳۸۷). *حفاظت سازه‌های گلین*. ترجمه مهرداد وحدتی. تهران: انتشارات رسانه‌پرداز با همکاری مؤسسه فرهنگی ایکوموس ایران.
- هادیان دهکردی، منیژه (۱۳۸۷). *کاربری پژوهش‌های آزمایشگاهی در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی (مواد و مصالح)*. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

- Avrami, E., Guillaud, H, Hardy, M. (2008), *TERRA literature Review*. Los Angeles: Getty Publication
- Cornerstones Community Partnerships. (2006). *Adobe Conservation, A Preservation Handbook.* New Mexico: Sunstone Press
- Houben, H., Guillaud, H. (2003). *Earth Construction*. London: ITDG Publishing
- Iranian Cultural Heritage Organization (ICHO). (2003). *9th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture*, Terra 2003. Tehran: Deputy of Presentation (ICHO)
- Jerome, I. (2005). *Ageless Adobe: History and Preservation in Southwestern Architecture.* New Mexico: Sunstone Press
- Krishnaiah, S., Suryanarayana Reddy, P. (2008). *Effect of clay on soil cement blocks*. 12th international conference of international association for computer methods and advances in Geomechanics (IACMAG). Goa, India
- Teutonico, J. M. (1988). *A Laboratory Manual for Architectural Conservators*. Rome: Iccrom
- www.AATA.Getty.edu (Accessed: April 2011)
- www.BCIN.ca (Accessed: April 2011)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Receive Date : 4/12/2011
Admission Date : 8/6/2011

The Effect of Plasticity Index (PI) on the Tensile and Compressive Strength of Cement-Stabilized Adobes for Conservation of Adobe Structures

Reza Rahimnia* **Daryoush Heidari Bani****

Abstract

The present study examined the correlation between plasticity index (PI) and mechanical properties of cement-stabilized adobes. In doing so, an empirical quantitative bi-variant approach, based on field work studies, environmental surveys and laboratory-based methods, was used. Samples were categorized in three groups of which four different types of clay from four distinct arid areas in Iran were empirically analyzed. After measuring plasticity index in each group of clays, each clay type was divided into three sub-groups into which zero, five and ten percents of cement were mixed. Adobes which were made using these mixtures were subjected to compressive and tensile strength tests. Final Results were analyzed and research hypothesis was approved by a study in accuracy of five-percent cement and a significant relationship between the plasticity index (PI) and the rate of strength obtained after adding cement was proved. According to the results, the more plasticity index (PI) of soil, the more mechanical properties within the stabilized samples would be.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Keywords: Adobe, Plasticity Index (PI), Cement-Stabilized Adobe, Tensile Strength, Compressive Strength

* MA Student in Conservation of Historic Buildings and Sites, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran. rezarahimnia@gmail.com

** Academic Lecturer and PhD Candidate in Conservation of Historic Buildings and Sites, Faculty of Conservation, Art University of Isfahan, Iran.