تأثیر مواد افزودنی بر مقاومت‌های مکانیکی خشت ساخته شده از خاک اصفهان

مهرداد حجازی *، محمود هاشمی، الهه جمالی‌نیا ***، محمود باتوانی******

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۰۹

چکیده

با وجود تعداد زیادی بناهای خشتی در ایران، اصفهان به‌عنوان یک شهر تاریخی در مرکز ایران دارای بناهای تاریخی و غیر تاریخی خشتی فراوان است که قدمت برخی از آنان چند صد سال است. همچنین روستاهای متعددی با بناهای کاملاً خشتی با ده‌ها هزار سکنه در داخل و خارج از منطقه اصفهان وجود دارد. اخیراً محققین بر روی بهبود رفتار مقاومتی بناهای خشتی شامل خواص مقاومتی خشت و روش‌های مرمت و مقاوم‌سازی سازه‌های خشتی موجود، متمرکز شده‌اند. به‌منظور بهبود خصوصیات مقاومتی خشت‌های تولیدی از خاک منطقه شمال شرق اصفهان (حبیب آباد) ، در این تحقیق تأثیر مواد افزودنی شامل ماسه، گچ، آهک، پودر آجر و کاه با درصدها و ترکیبات مختلف، بر روی ۲۱ طرح، مورد بررسی قرار گرفته است. پس از افزودن مواد مضاف به خاک و ساخت طرح‌ها، خصوصیات مقاومتی هر کدام از طرح‌ها با استفاده از آزمایش‌های مربوطه تعیین و با خشت ساده مقایسه شدند. آزمایش‌های انجام گرفته به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، آزمایش‌های مربوط به خاک شامل درصد رطوبت خاک، دانه‌بندی، هیدرومتری، حد خمیری، حد روانی و درصد مواد آلی، که فاز اول پروژه محسوب می‌شود. دسته دوم، آزمایش‌های مربوط به خشت شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، خمشی، سایشی و وارفتگی بوده‌اند که می‌توان آن‌ها را فاز دوم پروژه دانست. آزمایش‌های انجام گرفته و روابط استفاده شده در این تحقیق براساس دستورالعمل Centre for the Development of Enterprise (CDE) به کار برده شده‌اند. اجرای این طرح‌ها و انجام آزمایش‌های انجام گرفته بر روی آن‌ها در مدت زمانی به طول ۸ ماه در آزمایشگاه خاک و مصالح ساختمانی دانشگاه اصفهان صورت گرفت. براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها، افزودن مواد مضاف به خشت، می‌تواند از ایجاد ترک‌های عمیق در آن جلوگیری کند. برای خاک منطقه شمال شرق اصفهان بهترین ماده افزودنی به خشت جهت بهبود مقاومت‌های مکانیکی آن، گچ و یا ترکیب پودر آجر و گچ می‌باشد. مناسب‌ترین مقدار، ۲۵٪ وزنی گچ و یا ترکیب ۱۰٪ پودر آجر و ۲۰٪ گچ است که باید به خاک اضافه شود. در بین مواد افزودنی، آهک همواره نقشی منفی در جهت کاهش مقاومت‌های مکانیکی خشت دارد که استفاده از آن توصیه نمی‌گردد.

واژگان کلیدی: خشت، مواد افزودنی، ماسه، گچ، آهک، پودر آجر، کاه، مقاومت مکانیکی، اصفهان.

* دانشیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان. m.hejazi@eng.ui.ac.ir
** استادیار مهندسی سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.
*** کارشناس ارشد محیط زیست، دانشکده عمران، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران.
**** کارشناس ارشد سازه، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

هزاران سال است که از خاک به‌عنوان ماده اصلی برای ساخت ساختمان ها به‌همراه سنگ و چوب استفاده می‌شود و خشت از قدیمی‌ترین و معمول‌ترین مصالحی است که بشر برای ساخت بنا از آن استفاده می‌کرده است. تقریباً ۳۰٪ از مردم دنیا در خانه‌های خشتی سکونت دارند. براساس آمار سال ۱۳۸۵، ۳۱/۵٪ از جمعیت ایران در روستاها زندگی می‌کرده‌اند. هنوز در بسیاری از روستاهای کشور به‌خصوص مناطق کویری، خانه‌های خشتی محل سکونت مردم است. با توجه به در دسترس بودن خاک در مناطق کویری استفاده از خشت یک روش ارزان برای ساخت بنا به حساب می‌آید و همچنین زندگی طاقت‌فرسا را در تابستان‌های گرم و زمستان‌های خشک و سرد ممکن می‌سازد [۱].

برای تهیه خشت خام، خاک رس را به مدت ۲٤ h الی ٤۸ h، اصطلاحاً "آخوره" می‌کنند (تصویر ۱)، پس از گذشت این مدت، ملات زیر و رو گشته و کاملاً ورز داده می‌شود تا به شکل خمیری سفت درآید (تصویر ۲). برای ساخت خشت، ملات کاملاً ورز داده شده، در اندازه معلوم در یک تکه قالب با دست از دپو بریده شده در قالب با شدت و با ضرب فراوان کوبیده می‌شود (تصویر ۳). این عمل سبب به‌وجود آمدن خشتی با حجم فشرده و بدون فضای متخلخل می‌شود. سپس ملات اضافی روی قالب با استفاده از تخته‌ای گرفته می‌شود. بعد از آن قالب که از قبل به روغن آغشته شده است، به‌راحتی از ملات جدا شده و بیرون می‌آید و پس از هر مرتبه خشت‌زنی قالب در آب تمیز می‌شود. برای جلوگیری از ترک خوردن خشت، بایستی آن‌ها را در سایه نگهداری کرد. پس از گذشت یک الی دو روز از قالب زنی، خشت‌ها به‌صورت زنجیروار چیده می‌شوند (تصویر ٤)، که این عمل باعث خشک شدن سریع خشت می‌گردد[۲].

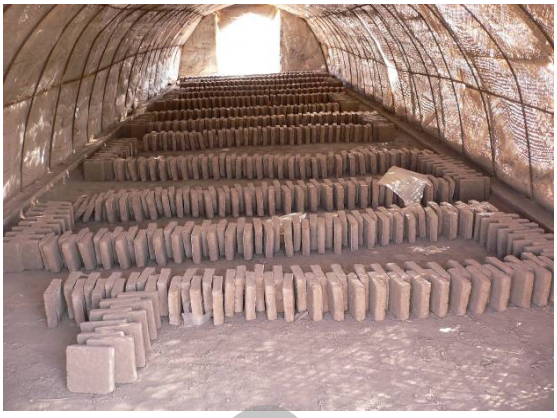
ت۱. مخلوط کردن مصالح و آخوره کردن.

ت۲. ورز دادن ملات.

ت۳. قالب‌گیری.

Archive of SID

www.SID.ir



ت٤. زنجیروار چیدن خشت‌ها در سایه.

مرور پیشینیه تحقیق

با توجه به اینکه خشت از دیدگاه سازه‌ای دارای نقاط ضعفی می‌باشد، باید برای افزایش مشخصات مکانیکی خشت تلاش نمود. مطالعات علمی در زمینه مصالح خشتی در چند دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته است. تمرکز بسیاری از این تحقیقات بر مشخصات خاک و توسعه روش‌هایی برای تشخیص اجزای خاک و طبقه‌بندی آن‌ها بوده است. از دهه ۷۰ میلادی در کشور پرو مطالعات گسترده‌ای در مورد ساختمان‌های خشتی آغاز گشت که هدف آن، افزایش مقاومت این بناها در مقابل زلزله بود. این مطالعات شامل انواع مختلف تقویت با استفاده از مصالح محلی و افزودنی‌ها به ملات بود. تا سال ۱۹۷۹ اکثر تحقیقات براساس مطالعه رابطه بین مصالح مصرفی و مقاومت آجرهای خشتی قرار داشت، ولی از آن زمان تأثیر خصوصیات خاک بر مقاومت خشت نیز مورد بررسی قرار گرفت [۳].

در سال ۲۰۰۵، Bouhicha و همکاران [٤] مطالعه‌ای بر روی تغییرات انقباض طولی و مقاومت های فشاری، خمشی و برشی نمونه‌های خشت مسلح به کاه انجام دادند که نتایج حاکی از آن بود که با افزایش نسبت کاه به خاک، درصد انقباض طولی کاهش و در نسبت بهینه کاه به خاک مقاومت‌های فشاری، خمشی و همچنین برشی افزایش می‌یابد. Binici و همکاران [۵] نشان دادند که با استفاده از الیاف و تثبیت کننده‌ها، می‌توان مقاومت خشت را افزایش داد. Degirmenci [٦] در سال ۲۰۰۸ مطالعه‌ای بر روی تأثیر افزودن سنگ گچ و فسفر گچ انجام داد که طبق آن با افزایش سنگ گچ، مقاومت فشاری خشت افزایش یافت. همچنین ملاحظه شد که بیشترین دوام نمونه خشت در برابر آب شستگی با افزودن ۲۵٪ فسفر گچ بدست آمده و با افزایش مقدار فسفر گچ انقباض نمونه کاهش یافته است. در سال ۲۰۰۹ Kouakou و Morel [۷] برای بهبود خصوصیات لرزه‌ای خشت در ابتدا نوع خاک، مشخصات آن و نحوه تهیه خشت را بررسی کردند و دریافتند که خشک شدن خشت در سایه، باعث عدم ایجاد ترک در آن می‌شود. همچنین به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن آهک، مقاومت فشاری خشت را کاهش می‌دهد و ترکیب ماسه و سیمان بیش از ۱۰٪ موجب افزایش آن خواهد شد. همچنین افزودن مقدار کمی سدیم کربنات باعث افزایش مقاومت فشاری خشت شده و با افزودن ماسه و کاه، انقباض طولی نمونه کاهش یافته و گسترش ترک‌ها محدود می‌گردد.

در ایران نیز تحقیقاتی در زمینه بهبود خصوصیات خشت انجام گرفته است. پس از زلزله بم در سال ۱۳۸٤، مطالعاتی بر روی تأثیر افزودن موادی از جمله ماسه شسته شده رودخانه‌ای، پودر و خرده‌های آجر، پودر آهک، خرده‌های سفال، الیاف خرما، کاه و پوکه صنعتی با درصدهای مختلف انجام گرفت. سپس بر روی نمونه‌های خشت ساخته شده آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، موئینگی، درصد رطوبت، مقاومت سایشی، درصد آب‌شستگی، درصد انقباض طولی، درصد جذب آب و دانسیته انجام شد [۸]. در سال

Archive of SID

www.SID.ir

۱۳۹۰، براساس تحقیقی انجام شده در زمینه تأثیر افزودن سیمان به خشت بر دامنه خمیری خاک، رحیم‌نیا و حیدری‌بنی [۹] دریافتند که با افزایش سیمان، دامنه خمیری نیز افزایش می‌یابد که در نتیجه آن نتایج بهتری برای مقاومت کششی و فشاری بدست خواهد آمد، به‌صورتی که افزودن ۱۰٪ سیمان به خاک مقاومت کششی نمونه خشت را بین ۳ تا ۸ برابر نمونه ساده افزایش می‌دهد. در تحقیق دیگری که در سال ۱۳۹۱ انجام گرفت، اسماعیلی و قلعه نوی [۱۰] اثر افزودن الیاف نخل خرما و آهک بر خصوصیات خشت تهیه شده از خاک زاهدان را بررسی کردند. در این تحقیق نمونه‌های ساخته شده در معرض آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، نرم شدگی در آب، زمان نفوذ آب به خشت، درصد رطوبت و دانسیته قرار گرفتند و نتایج حاصل نشان داد که برای شرایط محیطی ۳۵٪ رطوبت، وجود ۱٪ الیاف نخل خرما و ۱۵٪ آهک بهترین حالت ممکن برای خشت تثبیت شده با آهک و الیاف نخل خرما می‌باشد، خواجه تراب و مهدی‌نژاد گودرزی [۱۱] در سال ۱۳۹۲ نشان دادند که استفاده از الیاف پلی پروپیلین موجب افزایش مقاومت و ایستایی نمونه‌های خشتی ساخته شده می‌گردد، به‌طوری که با افزایش الیاف، نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها در تنش‌های بالاتری از خود گسیختگی را نشان می‌دهد. وطنی و افضلی [۱۲] در سال ۱۳۹۲ با افزودن الیاف خرما، نی، خورده چوب، پوسته برنج، ماسه و شن به خشت مقاومت فشاری آن را اندازه گرفتند که بر طبق آن با افزایش شن و ماسه مقاومت فشاری خشت به‌علت کاهش چسبندگی، کاهش می‌یابد، درحالی که با افزایش کاه و الیاف خرما به مقدار مقاومت فشاری افزوده می‌شود.

در حال حاضر تعداد کمی استاندارد و توصیه نامه فنی برای مصالح و بناهای خشتی وجود دارد که از بین آن‌ها می‌توان به استاندارد فنی ساختمان‌های خشتی پرو [۱۳]، استاندارد طراحی مهندسی ساختمانی‌های خشتی نیوزلند [۱٤]، استاندارد مصالح و روش کار نیوزلند [۱۵]، استاندارد ساختمان‌های خشتی بدون نیاز به طراحی ویژه نیوزلند [۱٦]، آیین‌نامه جدید مصالح ساختمانی خشتی مکزیک [۱۷]، و کتاب راهنمای ساختمان خشتی استرالیا [۱۸] اشاره داشت که نسبت به سایر استانداردها کامل‌تر هستند. علاوه بر این، راهنمای روش‌های آزمایش بلوک های خشتی فشرده [۱۹] که توسط مرکز توسعه تجارت تدوین بر مبنای دو دهه تحقیقات تدوین شده است. یکی از کامل‌ترین دستورالعمل‌ها برای انجام آزمایش‌های گوناگون خشت، شامل آزمایش‌های مربوط به مصالح خام (قبل از ساخت خشت)، آزمایش‌های مربوط به ساخت خشت و آزمایش‌های مربوط به خشت ساخته شده می‌باشد. استانداردهای مذکور در رابطه با انجام آزمایش مصالح برای ساختمانی‌های جدید تدوین شده‌اند.

بیان مسئله و روش کار

در استان اصفهان تعداد فراوانی بنای خشتی دارای ارزش فرهنگی و تاریخی، مانند بناهای شاخص تاریخی به جا مانده از دوران بسیار قدیم، و یا ساختمان‌های فاقد ارزش تاریخی که به‌عنوان محل سکونت مورد استفاده قرار می‌گیرد و از این جهت دارای ارزش اجتماعی می‌باشند، وجود دارد. جهت مرمت، و گاه بازسازی، این بناها از مصالح خشتی ساخته شده از خاک اصفهان استفاده می‌گردد. در تحقیق حاضر، هدف اصلی این بوده است که مشخصات مکانیکی خشت‌های ساخته شده از خاک اصفهان بررسی شده و در صورت امکان، راهکاری برای بهبود آن ارائه گردد تا بدین وسیله مرمت و بازسازی بناهای خشتی اصفهان به نحو مناسب‌تری انجام گیرد.

Archive of SID

www.SID.ir

چنانچه قبلا ذکر شد ماده اصلی خشت، خاک رس و آب است که گاهی اوقات ممکن است ماسه، شن و یا مواد دیگری نیز به آن افزوده شود. در این تحقیق برای بهبود خصوصیات خشت، به خاک رس اصفهان مواد افزودنی شامل ماسه، گچ، آهک، پودر آجر و کاه با درصدهای مختلف افزوده شده است. مشخصات مصالح استفاده شده در این تحقیق در جدول ۱ ملاحظه می‌شود.

خاک	تهیه شده از دپوی شمال شرق اصفهان (حبیب آباد)
گچ	گچ پاکتی سمنان
آهک	آهک قم
پودر آجر	پودر آجر سفالی رد شده از الک شماره ۸
کاه	کاه ساقه گندم (mm ۵۰ > طول الیاف >۰)
ماسه	ماسه رد شده از الک شماره ٤٠

ج۱. خصوصیات مصالح استفاده شده.

طرح‌های ترکیبی مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه گردیده‌اند. آزمایش‌های مورد نظر براساس راهنمای روش‌های آزمایش بلوک‌های خشتی فشرده [۱۹] انجام شده‌اند؛ بدین دلیل از قالب‌های چوبی به ابعاد ۱۰ cm x ۲۹/۵ cm x ١٤ cm استفاده گردیده است. میزان آب استفاده شده برای تهیه ملات در این تحقیق ۳۰٪ وزنی مجموع وزن خاک و مواد افزودنی به آن بوده است. این مقدار پس از سعی و خطا انتخاب شده است.

شماره طرح	مواد افزودنی	درصد (٪)	شماره طرح	مواد افزودنی	درصد (٪)
۱	ماسه	۱۰	۱۲	کاه	۱
۲		۱۵	۱۳		۱/۵
۳		٤٠	١٤		۲
٤	گچ	۱۵	۱۵		۵
۵		۲۰	طرح‌های ترکیبی		
٦		۲۵	١٦	۱۰٪ پودر آجر +	۲٪ کاه
۷	آهک	۱۰	۱۷		۱/۵٪ کاه
۸		۱۵	۱۸		۱۵٪ گچ
۹	پودر آجر	۱۰	۱۹		۲۰٪ گچ
۱۰		۲۰	۲۰		۱۰٪ آهک
۱۱		۳۰	۲۱		۱۵٪ آهک

ج ۲. مواد افزودنی و طرح‌های ترکیبی مورد مطالعه برای ساخت خشت.

دلیل افزودن مواد افزودنی مذکور، بررسی اثر این مواد بر خصوصیات مکانیکی خشت، از جمله مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و وارفتگی در آب می‌باشد. برای افزودن مواد مورد نظر به خشت و ساختن خشت، ابتدا نیمی و سپس نیمی دیگر از خاک و ماده افزودنی مورد نظر در میکسر ریخته و خوب هم زده شد. این کار به‌علت حجم بالای خاک و به‌منظور مخلوط شدن مناسب خاک و ماده افزودنی ضروری بود. پس از آن، مخلوط خاک و ماده افزودنی بر روی سطح نفوذناپذیری ریخته شد و با آب به میزان ۳۰٪ وزنی خود، به‌صورت آخور درآمد. بعد از گذشت ٢٤ h الی ٤٨ h از آخوره کردن و حصول اطمینان از ترکیب آب و خاک، اقدام به ورز دادن خاک شد تا گلی همگن و مناسب برای خشت‌زنی بدست آمد. پس از آماده شدن گل، قسمتی از آن جدا شد و با ضرب داخل قالب چوبی چرب شده، قرار گرفت و با دست کاملاً متراکم گردید. سپس قالب چوبی با احتیاط بیرون کشیده شد و بدین ترتیب قالب خشت مورد نظر ساخته شد. پس از گذشت یک روز، خشت‌ها جمع‌آوری و در سایه در محلی مناسب تا زمان انجام آزمایش، دپو شدند.

پرسش‌های این تحقیق چنین بودند:

– افزودن مواد افزودنی چه تأثیری بر بهبود یا بدتر شدن خصوصیات مکانیکی خشت دارد؟

– بهترین ماده افزودنی و مقدار آن برای بهبود خصوصیات مکانیکی خشت کدام است؟

آزمایش‌های مربوط به خاک

در ابتدا آزمایش‌هایی بر روی خاک رس انجام گرفت تا خصوصیات خاک مورد نظر مشخص شوند. این آزمایش‌ها عبارتند از: درصد رطوبت خاک، دانه‌بندی، هیدرومتری، حد خمیری، حد روانی و درصد مواد آلی [۱۹].

Archive of SID

www.SID.ir

درصد رطوبت

برای تعیین درصد رطوبت، ۵ نمونه خاک رس، هر نمونه به جرم g ۱۰۰۰ ، در ۵ ظرف جداگانه قرار داده شدند. ظرف‌های حاوی خاک به مدت h ۲٤ در آون در دمای °C ۱۰۵ قرار گرفتند و بعد وزن شدند. سپس دوباره به مدت h ۲ در آون گذاشته و مجدداً وزن شدند. در صورتی که تغییرات وزن نمونه‌ها نسبت به حالت قبل کمتر از ۰/۰۱ جرم اولیه خاک بود خاک خشک به‌حساب می‌آمد و وزن آن یادداشت و درصد رطوبت محاسبه می‌گردید.

دانه‌بندی

برای آزمایش دانه‌بندی خاک، مقداری خاک به وزن مشخص به مدت h ۲٤ اشباع و سپس بر روی الک شماره ۲۰۰ ریخته شد. با استفاده از آبفشان خاک روی الک شسته شد و خاک رد شده از الک شماره ۲۰۰ جمع‌آوری و به مدت زمان h ۲٤ درون آون قرار گرفت. پس از آن که از خشک شدن نمونه درون آون اطمینان حاصل گردید با استفاده از الک‌هایی با شماره‌های مشخص نمونه الک و وزن مانده روی الک‌ها یادداشت شد. برای خاک رد شده از الک شماره ۲۰۰، دانه‌بندی به روش هیدرومتری انجام گرفت. برای این کار، خاک رد شده از الک شماره ۲۰۰ در آزمایش دانه‌بندی به مدت h ۲٤ در آون در دمای °C ۱۰۵ قرار داده شد. سپس براساس راهنمای روش‌های آزمایش بلوک‌های خشتی فشرده [۱۹]، محلول هگزامتافسفات آماده و نمونه خاک خشک به مدت h ۱۵ درون آن قرار داده شد. پس از آن نمونه به مدت زمان min ۳ و با سرعت rpm ۱۲۰۰۰-۱۰۰۰۰ درون همزن قرار گرفت. محلول همزده شده در استوانه‌ای به حجم lit ۱ ریخته و به آن آب مقطر اضافه شد تا حجم محلول به lit ۱ رسید. پس از آن با استفاده از هیدرومتر در زمان‌های تعیین شده قرائت‌ها انجام گرفت.

حد روانی

برای تعیین حد روانی خاک، مقداری از خاک عبور کرده از الک شماره ٤۰ درون ظرفی قرار داده شد و به مدت h ۱۲ با مقدار آب کافی اشباع گردید. پس از گذشت این مدت زمان، برس سیمی به آرامی روی الک کشیده و دانه‌های عبوری از الک برای انجام آزمایش جمع شدند. آب اضافی موجود در ظرف حاوی دانه خاک رس کوچکتر از mm ۰/٤ باید حداکثر تا دمای °C ٦۰ تبخیر می شد. پس از آن نمونه به مدت h ۱۲ به حال خود رها شد تا حالتی خمیری به خود گیرد. حدود g ۱۰۰ از نمونه برداشته و در جام کاساگرانده به‌صورتی قرار داده شد که ضخامت آن بین mm ۱۵ تا mm ۲۰ باشد. سپس با استفاده از شیارزن شیاری در نمونه ایجاد و در ادامه اهرم دستگاه کاساگرانده در هر ثانیه دوبار چرخانده و تا زمانی که شیار mm ۱۰ بسته شود، تعداد دفعات ضربه به جام شمرده شد (تعداد ضرباتی که باعث بسته شدن این مقدار شیار می‌شود باید بین ۱۵ تا ۳۵ ضربه باشد). سپس نمونه خاک از ظرف جدا و پس از توزین درون آون با دمای °C ۱۰۵ به مدت h ۲٤ قرار داده شد تا نمونه خشک حاصل گردد. این کار حداقل دو بار دیگر انجام شد. سپس با استفاده از درونیابی خطی، رطوبتی که با ۲۵ ضربه سبب بسته شدن شیار شده بود مشخص و به‌عنوان حد روانی یادداشت گردید.

حد خمیری

برای تعیین حد خمیری، همچون آزمایش حد روانی نمونه خاک آماده شد و درصورتی که رطوبت آن بیش از اندازه بود نمونه بر روی شیشه‌ای پهن و کمی ورز داده شد تا رطوبت خود را از دست بدهد. سپس نمونه به‌صورت گلوله‌ای در آورده شده و با کف دست روی شیشه با فشاری آرام ورز داده شد تا به شکل فتیله‌ای به قطر mm ۳ و طول cm ۱۰ تا cm ۱۵ درآید. زمانی که

Archive of SID

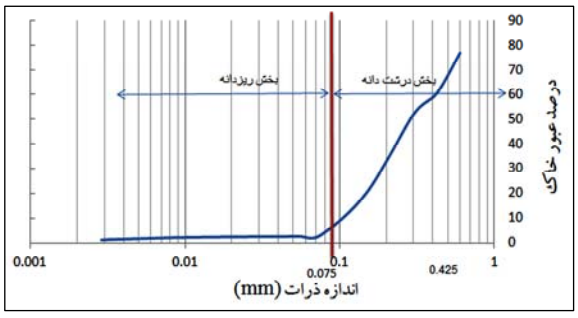
www.SID.ir

اولین ترک در حین ورز دادن پدید آمد، نمونه دوباره به‌صورت گلوله‌ای درآمده و دوباره فتیله شد. این عمل آنقدر تکرار گردید تا دیگر امکان فتیله کردن نمونه وجود نداشته باشد. در این حالت وزن فیتیله یادداشت شد و پس از آن در آون با دمای ۱۰۵ °C به مدت ۲٤ h قرار گرفت تا نمونه خشک حاصل شود. حد خمیری عبارت بود از درصد رطوبت موجود در نمونه‌ای به قطر ۳ mm که در آن ترک ایجاد می‌شد.

درصد مواد آلی

برای آزمایش تعیین درصد مواد آلی، مقداری خاک به وزن مشخص درون آون با دمای ۱۰۵ °C به مدت ۲٤ h قرار گرفت و پس از آن که از خشک بودن نمونه اطمینان حاصل گردید (به این معنی که پس از مدت زمان ۲٤ h ساعت نمونه وزن شده و دوباره به مدت ۲ h دیگر در آون قرار داده می‌شد، اگر تغییرات وزن نمونه کمتر از ۱٪ وزن اولیه بود، نمونه خشک محسوب می‌گردید) نمونه به مدت ۳ h در کوره با دمای ٤۰۰°C قرار گرفت و پس از آن نمونه وزن شد. اختلاف وزن نمونه پس از خروج از کوره و قبل از ورود به آن، درصد مواد آلی را مشخص می‌کند.

در نمودار ۱ نمودار دانه‌بندی خاک و در جدول ۳ نتایج سایر آزمایش‌ها ارائه شده است.



ن ۱. نمودار دانه‌بندی خاک.

نوع خاک	نتیجه آزمایش
حد پلاستیک (PL)	٪۲۰
حد روانی (LL)	٪۳۹/٦
درصد رطوبت خاک	٪۱۱/۰۵
درصد مواد آلی	٪۱/۵
نوع خاک (USCS)	SP

ج ۳. مشخصات خاک مصرفی.

آزمایش‌های مربوط به خشت

مهم‌ترین مسئله‌ای که این تحقیق هنگام ساختن خشت با آن مواجه بود، ایجاد ترک‌های عمیق در خشت بود که عملاً خشت را بی‌استفاده می‌کرد. برای رفع این مشکل اقدامات زیادی بر روی نحوه ساخت و عمل‌آوری خشت، از جمله تغییر در مدت زمان آخوره کردن خاک یا تغییر در محیط عمل‌آوری خشت، صورت گرفت که هیچکدام مؤثر واقع نشد و نتوانست از ایجاد ترک جلوگیری کند. با افزودن انواع مواد افزودنی، در مواردی به‌طور نسبی و در مواردی به‌طور کامل ترک‌های عمیق رفع شدند. در مواردی نیز تأثیری بر جلوگیری از ایجاد ترک‌ها نداشت. به‌همین علت در انجام آزمایش‌های مکانیکی، در برخی موارد به‌علت ترک عمیق در خشت‌ها آزمایش مورد نظر بر روی نمونه انجام نشد. آزمایش‌های مربوط به خشت شامل آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی و وارفتگی بوده‌اند.

مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های خشتی در سن ۲۱ روزگی تحت شرایط یکسان با سرعت اعمال بار mm/s ٤ و بر روی حداقل سه نمونه انجام گرفته و میانگین مقاومت‌های فشاری حاصل به‌عنوان مقاومت فشاری نمونه گزارش شده است. برای انجام این آزمایش، نمونه‌های خشت با ابعاد ۲۹/۵cm × ۱٤ cm × ۱۰ cm پس از خشک شدن در هوای آزاد، به مدت ۲٤ h در آون

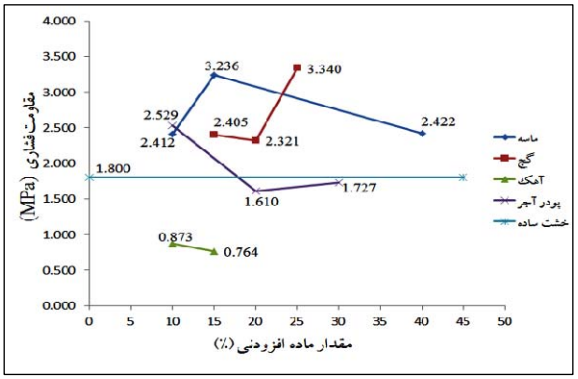
Archive of SID

www.SID.ir

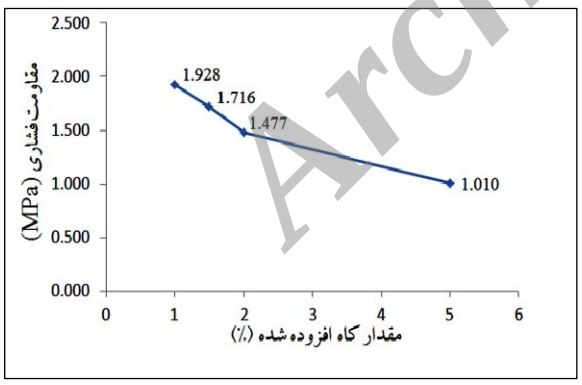
با دمای ۴۰°C نگه‌داری شدند تا کاملاً خشک گردد. سپس به‌وسیله کارد از وسط به دو نیم تقسیم و دو نیمه حاصل شده توسط ملات ماسه سیمان بر روی یکدیگر گذاشته و ثابت شدند. براساس راهنمای روش‌های آزمایش بلوک های خشتی فشرده [۱۹] ملاتی که بین دو نیمه خشت قرار می‌گیرد، باید دارای نسبت سیمان به ماسه یک به پنج بوده و رطوبت آن در حدی باشد که باعث انتقال رطوبت به خشت‌ها نشود. پس از گذشت h ۲۴ از چسباندن دو نیمه خشت به یکدیگر، آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها انجام شد. در تصویر ۵ نحوه تهیه نمونه فشاری، در تصویر ٦ آزمایش نمونه فشاری و در نمودارهای ۲، ۳ و ٤ مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مواد افزودنی مختلف نشان داده شده است.

ت ۵. نحوه آماده کردن نمونه برای آزمایش مقاومت.

ت ٦. آزمایش مقاومت فشاری.



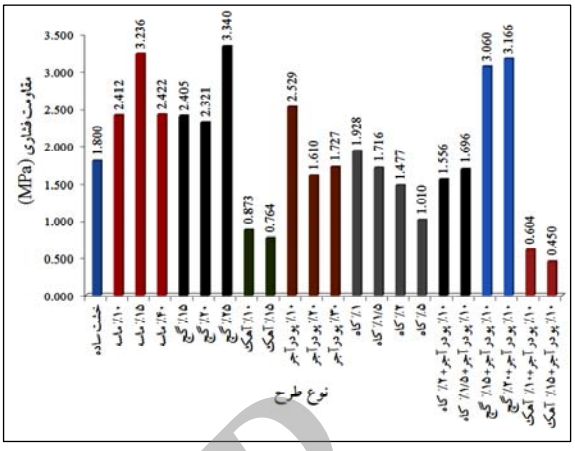
ن ۲. تغییرات مقاومت فشاری خشت براساس مقدار مواد افزودنی.



ن ۳. مقاومت فشاری نمونه‌های خشت دارای کاه.

Archive of SID

www.SID.ir



ن ٤. مقاومت فشاری طرح‌های مختلف خشت.

در جدول ٤ مقاومت فشاری کلیه طرح‌های آزمایش شده به تفکیک مواد افزوده شده به خشت و درصد تغییرات نسبت به خشت ساده، قابل مشاهده می‌باشد.

چنانچه ملاحظه می‌گردد، افزودن ۱۵٪ ماسه تا ۷۹/۸٪ و افزودن ۲۵٪ گچ تا ۸۵/٦٪ سبب افزایش مقاومت فشاری خشت نسبت به خشت ساده شده است. اثر مثبت این مواد بر مقاومت فشاری خشت در تحقیقات مختلف دیگر نیز تأیید شده است. افزودن آهک به نمونه‌های خشتی سبب کاهش نسبتاً شدید مقاومت فشاری نمونه‌ها شده است. مطابق نتایج جدول ٤، افزودن ۱۰٪ پودر آجر نیز در ابتدا سبب افزایش مقاومت فشاری تا ٤۰/۵٪ شده، ولی با افزایش میزان پودرآجر، مقاومت فشاری روند کاهشی یافته است که علت آن کاهش میزان چسبندگی بین دانه‌ها تلقی می‌شود. افزودن کاه به میزان ۱٪ نیز به میزان کمی (۷/۲٪) سبب افزایش مقاومت فشاری شده است، ولی با افزایش میزان کاه تا ۵٪، مقاومت فشاری تا ٤٤٪ کاهش یافته است. در طرح‌های ترکیبی نیز چنان که ملاحظه می‌گردد، تنها وجود گچ (۱۰٪ پودر آجر و ۱۵٪ تا ۲۰٪ گچ) سبب افزایش مقاومت فشاری به میزان ۷۰٪ تا ۷٦٪ نسبت به خشت ساده شده است.

نوع ماده افزودنی	درصد اضافه شده	مقاومت فشاری (MPa)	درصد تغییرات نسبت به خشت ساده
خشت ساده	–	۱/۸	–
ماسه	٪۱۰	۲/٤۱۲	+٪۳٤
	٪۱۵	۳/۲۳٦	+٪۷۹/۸
	٪٤۰	۲/٤۲۲	+٪۳٤/۵
گچ	٪۱۵	۲/٤۰۵	+٪۳۳/٦
	٪۲۰	۲/۳۲۱	+٪۲۸/۹
	٪۲۵	۳/۳٤	+٪۸۵/٦
آهک	٪۱۰	۰/۸۷۳	–٪۵۱/۵
	٪۱۵	۰/۷٦٤	–٪۵۷/٦
پودر آجر	٪۱۰	۲/۵۳	+٪٤۰/۵
	٪۲۰	۱/٦۱	–٪۱۰/۵
	٪۳۰	۱/۷۲۷	–٪٤
کاه	٪۱	۱/۹۳	+٪۷/۲
	٪۱/۵	۱/۷۱٦	–٪٤/٦
	٪۲	۱/٤۷۷	–٪۱۸
	٪۵	۱/۰۱	–٪٤٤
پودر آجر+کاه	۱۰٪پودرآجر+۲٪کاه	۱/۵٦	–٪۱۳/۳
پودر آجر+کاه	۱۰٪پودرآجر+۱/۵٪کاه	۱/۷	–٪۵/۵
پودر آجر+گچ	۱۰٪پودرآجر+۱۵٪گچ	۳/۰٦	+٪۷۰
پودر آجر+گچ	۱۰٪پودرآجر+۲۰٪گچ	۳/۱٦٦	+٪۷٦
پودر آجر+آهک	۱۰٪پودرآجر+۱۰٪آهک	۰/٦۰٤	–٪٦٦/٤
پودر آجر+آهک	۱۰٪پودرآجر+۱۵٪آهک	۰/٤۵	–٪۷۵

ج ٤. مقاومت فشاری طرح‌های مختلف خشت.

مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌های خشتی نیز در سن ۲۱ روزگی تحت شرایط یکسان با سرعت بارگذاری ۰/۵ mm/s و بر روی حداقل سه نمونه خشت صورت گرفته است و میانگین مقاومت این نمونه‌ها به‌عنوان مقاومت خمشی نمونه در نظر گرفته شده است [۱۹]. برای انجام این آزمایش نیز مانند سایر آزمایش‌ها، از نمونه‌های خشت با ابعاد ۱۰ cm × ۱٤ cm× ۲۹/۵ cm و پس از خشک شدن در آون به مدت ۲٤ h استفاده گردیده است. قبل از انجام آزمایش، باید محل‌های اعمال بار بر روی خشت کاملاً مسطح شوند و هیچگونه ناهمواری در سطح اعمال

Archive of SID
www.SID.ir

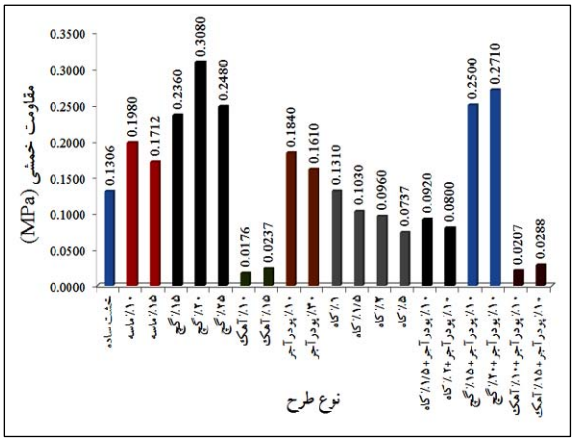
بار وجود نداشته باشد. بدین منظور قبل از انجام آزمایش، محل قرارگیری تکیه‌گاه‌ها و محل قرارگیری بازوی اعمال نیرو بر روی خشت، با سوهان کاملا مسطح شدند. برای محاسبه مقاومت خمشی از رابطه ذیل استفاده می‌شود:

$$f=9\times2\times F/(\pi\times w\times h)$$

که در آن f مقاومت خمشی بر حسب MPa، F حداکثر نیروی وارده بر نمونه بر حسب kN و w و h عرض و ارتفاع خشت بر حسب cm می‌باشد. در تصویر ۷ نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی و در نمودار ۵ نتایج آزمایش‌ها ملاحظه می‌گردد. در جدول ۵ نیز نتایج آزمایش خمشی قابل مشاهده می‌باشد. طرح‌هایی که مقداری برای آن‌ها ذکر نشده است، به‌علت ترک خوردن نمونه‌های خشتی در مرحله عمل‌آوری بوده است که به‌همین دلیل این آزمایش بر روی آن‌ها صورت نگرفته است.

ت ۷. آزمایش مقاومت خمشی خشت.

براساس نمودار ۵ و جدول ۵، افزودن ۱۰٪ ماسه به خشت سبب افزایش افزایش مقاومت خمشی تا ۵۱/۶٪ شده است. این افزایش مقاومت برای ۲۰٪ گچ تا ۱۳۵٪ نیز رسیده که حاکی از اثر مفید گچ بر خصوصیات مکانیکی خشت است. ولی افزودن آهک به خشت، مانند حالت مقاومت فشاری، سبب کاهش مقاومت خمشی مقاومت‌های مکانیکی ضعیفی را از خود نشان داده‌اند. افزودن ۱۰٪ پودر آجر نیز تا ۴۰/۹٪ مقاومت خمشی را شده و مقدار ۱۰٪ آهک تا ۸۶/۵٪ آن را کاهش داده است. نمونه‌های دارای آهک به شدت شکننده بوده و افزایش داده و سبب بهبود مقاومت‌های مکانیکی شده است. از طرح‌های ترکیبی نیز، چنانچه ملاحظه می‌گردد، تنها طرح‌های حاوی گچ افزایش مقاومت خمشی نشان داده‌اند که این افزایش مقاومت برای ترکیب ۱۰٪ پودر آجر و ۲۰٪ گچ تا ۱۰۷/۵٪ نیز رسیده است.



ن ۵. مقاومت خمشی طرح‌های مختلف خشت.

نوع ماده افزودنی	درصد اضافه شده	مقاومت خمشی (MPa)	درصد تغییرات نسبت به خشت ساده
خشت ساده	–	۰/۱۳۰۶	–
ماسه	٪۱۰	۰/۱۹۸۰	+٪۵۱/۶
	٪۱۵	۰/۱۷۱۲	+٪۳۱
گچ	٪۱۵	۰/۲۳۶۰	+٪۸۰/۷
	٪۲۰	۰/۳۰۸۰	+٪۱۳۵
	٪۲۵	۰/۲۴۸۰	+٪۸۹/۹
آهک	٪۱۰	۰/۰۱۷۶	-٪۸۶/۵
	٪۱۵	۰/۰۲۳۷	-٪۸۱/۸
پودر آجر	٪۱۰	۰/۱۸۴۰	+٪۴۰/۹
	٪۳۰	۰/۱۶۱۰	+٪۲۳/۲۷
کاه	٪۱	۰/۱۳۱۰	+٪۰/۳
	٪۱/۵	۰/۱۰۳۰	-٪۲۱/۱۳
	٪۲	۰/۰۹۶۰	-٪۲۶/۵
	٪۵	۰/۰۷۳۷	-٪۴۳/۵۶
پودر آجر+کاه	۱۰٪پودرآجر+۲٪کاه	۰/۰۸	-٪۳۸/۷۴
پودر آجر+کاه	۱۰٪پودرآجر+۱/۵٪کاه	۰/۰۹۲	-٪۲۹/۵۶
پودر آجر+گچ	۱۰٪پودرآجر+۱۵٪گچ	۰/۲۵	+٪۹۱/۴۲
پودر آجر+گچ	۱۰٪پودرآجر+۲۰٪گچ	۰/۲۷۱۰	+٪۱۰۷/۵
پودر آجر+آهک	۱۰٪پودرآجر+۱۰٪آهک	۰/۰۲۰۷	-٪۸۴/۱۵
پودر آجر+آهک	۱۰٪پودرآجر+۱۵٪آهک	۰/۰۲۸۸	-٪۷۷/۹۴

ج ۵. مقاومت خمشی طرح‌های مختلف خشت.

Archive of SID

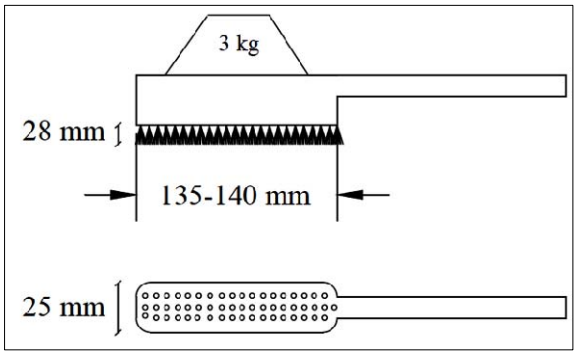
www.SID.ir

مقاومت سایشی

برای انجام آزمایش مقاومت سایشی بر نمونه‌های خشت با ابعاد ۱۰ cm × ۱٤ cm × ۲۹/٥cm، برس با ابعاد مشخص که در تصویر ۸ دیده می‌شود و با سرباری به اندازه ۳ kg، در فاصله زمانی ٦۰ s، بر روی نمونه‌های خشت در راستای طولی در یک امتداد کشیده می‌شود. سرعت حرکت برس باید طوری باشد که برس در هر ثانیه یک حرکت رفت و برگشتی داشته باشد [۱۹]. پس از انجام آزمایش سایش، نمونه وزن شده و میزان کاهش وزن نمونه و سطح ساییده شده خشت اندازه‌گیری می‌شود. ضریب سایش، Ca برحسب cm^2/g، از تقسیم مساحت ساییده شده، S بر حسب cm^2، بر مقدار کاهش جرم خشت بر حسب g، مطابق رابطه ذیل بدست می‌آید.

$$Ca=S/(m^2-m^1)$$

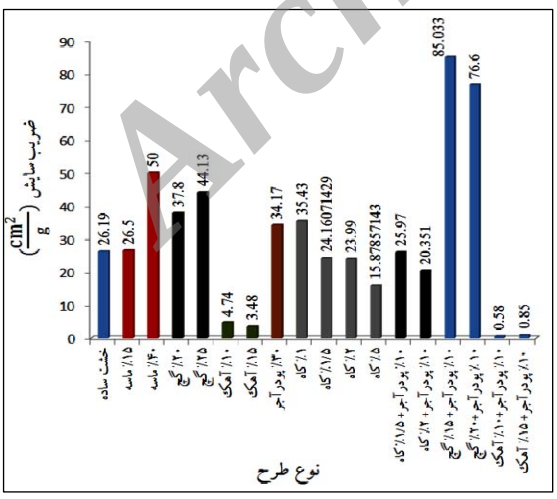
m_1 و m_2 به ترتیب جرم نمونه قبل و بعد از سایش است. تصویر ۹ نحوه انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت سایشی در نمودار ٦ و جدول ٦ نشان داده شده است.



ت ۸. برس مخصوص آزمایش مقاومت سایشی [۱۹].

با توجه به تعریف پارامتر سایش، بیشتر شدن مقدار عددی این پارامتر، به معنای مقاوم‌تر بودن خشت در برابر سایش می‌باشد. چنانچه از نمودار ٦ و جدول ٦ استنتاج می‌شود، وجود ماسه در خشت، به مقدار زیادی سبب افزایش مقاومت سایشی خشت می‌گردد. وجود ٤۰٪ ماسه مقاومت سایشی را تا ۹۱٪ افزایش می‌دهد. افزودن ۲٥٪ گچ نیز باعث افزایش ٦۸/٤٪ مقاومت سایشی می‌شود. در مقابل افزودن آهک سبب کاهش شدید دوام خشت شده است. مقدار ۱٥٪ آهک مقاومت سایشی را به اندازه ۸٦/۷٪ کاهش داده است. همین طور ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقدار کاه به خشت، دوام خشت در برابر سایش کمتر شده و ٥٪ کاه مقاومت سایشی را تا ۳۹/٤٪ کاهش می‌دهد. از طرح‌های ترکیبی نیز، ترکیب ۱۰٪ پودر آجر و ۱٥٪ گچ بهترین نتیجه را در بر داشته و سبب افزایش ۲۲٥٪ مقاومت سایشی شده است. ترکیب پودر آجر و آهک نیز بدترین نتیجه را حاصل کرده است به‌طوری که مقاومت سایشی خشت بسیار ناچیز می‌شود.

ت ۹. نحوه انجام آزمایش مقاومت سایشی.



ن ٦. مقاومت سایشی طرح‌های مختلف خشت.

Archive of SID
www.SID.ir

نوع مواد افزودنی	درصد افزوده شده	ضریب سایش (cm^2/g)	درصد تغییرات نسبت به خشت ساده
خشت ساده	–	۲۶/۱۹	–
ماسه	٪۱۵	۲۶/۵	+٪۱۱/۸
	٪۴۰	۵۰	+٪۹۱
گچ	٪۲۰	۳۷/۸	+٪۴۴/۳
	٪۲۵	۴۴/۱۳	+٪۶۸/۴
آهک	٪۱۰	۴/۷۴	-٪۸۲
	٪۱۵	۳/۴۸	-٪۸۶/۷
پودر آجر	٪۳۰	۳۴/۱۷	+٪۳۰/۵
کاه	٪۱	۳۵/۴۳	+٪۳۵/۳
	٪۱/۵	۲۴/۱۶	-٪۷/۷
	٪۲	۲۳/۹۹	-٪۸/۴
	٪۵	۱۵/۸۷	-٪۳۹/۴
پودر آجر+کاه	٪۱۰پودرآجر+٪۲کاه	۲۰/۳۵	-٪۲۲/۳
پودر آجر+کاه	٪۱۰پودرآجر+٪۱/۵کاه	۲۵/۹۷	-٪۸/۴
پودر آجر+گچ	٪۱۰پودرآجر+٪۱۵گچ	۸۵/۰۳۳	+٪۲۲۵
پودر آجر+گچ	٪۱۰پودرآجر+٪۲۰گچ	۷۶/۶	+٪۱۹۲
پودر آجر+آهک	٪۱۰پودرآجر+٪۱۰آهک	۰/۵۸	-٪۹۷/۸
پودر آجر+آهک	٪۱۰پودرآجر+٪۱۵آهک	۰/۸۵	-٪۹۶/۷

ج ٦. مقاومت سایشی طرح‌های مختلف خشت.

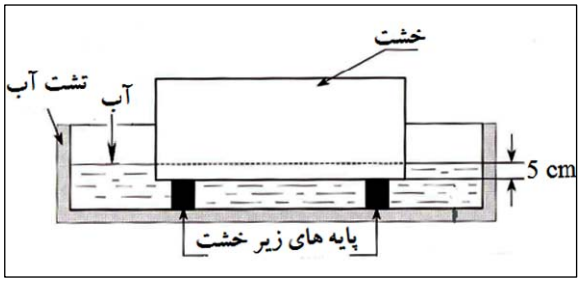
آزمایش وارفتگی

برای سنجش میزان وارفتگی نمونه‌های خشتی در آب، ابتدا نمونه‌های خشت با ابعاد ۱۰ cm × ۱٤ cm × ۲۹/۵cm به مدت ۲٤ h در آون با دمای ٤۰°C نگه داشته می شوند تا کاملاً خشک شوند. سپس در یک تشت مسطح، گوشه‌های نمونه‌های خشتی خشک بر روی پایه‌های کوچکی قرار گرفته و تشت تا جایی که ۵ mm از ارتفاع خشت در آب فرو رود، از آب پر می‌شود. نمونه‌های خشتی باید تا ۱۰ min در این وضعیت قرار داشته باشند. پس از گذشت ۱۰ min، نمونه از آب درآورده شده و با دستمالی خشک و پس از آن توزین می‌گردد. ضریب وارفتگی C_b ($g/cm^2min^{1/2}$) از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد.

$$C_b=100\times(m_h-m_d)/(S\times t^{1/2})=100\times(m_h-m_d)/(S\times 10^{1/2})$$

m_h، m_d، S و t به ترتیب جرم خشت مرطوب (g)، جرم خشت خشک (g)، مساحت سطحی از نمونه که در آب قرار گرفته است (cm^2)، و زمان قرارگیری نمونه در آب (min) می‌باشند.

تصویر ۱۰ آزمایش وارفتگی و جدول ۷ ضریب وارفتگی نمونه‌های خشت را نشان می‌دهد.



ت ۱۰. آزمایش وارفتگی خشت در آب.

نوع مصالح مضاف	درصد اضافه شده	ضریب وارفتگی ($g/cm^2min^{1/2}$)	درصد تغییرات نسبت به خشت ساده
خشت ساده	–	۳/۹۰۶۲	–
گچ	٪۱۵	۱۳/٤۰۸۰	+٪۲٤٤
	٪۲۰	٤/۷۱۱۸	+٪۲۱/٤
	٪۲۵	۲/۷۸۲۸	-٪۲۸/۷
آهک	٪۱۰	٦۷/۲۱۱۷	+٪۱٦۲۰
پودر آجر	٪۳۰	۳۲/۷۹۲۸	+٪۷٤۰
کاه	٪۱	۸/۷۵۹۵	+٪۱۲٤
	٪۱/۵	۷/۲٤۱٦	+٪۸۵/٤
	٪۲	۲٤/۵۷۰۹	-٪۵۳۰
	٪۵	۲۲/٤۸۳۸	-٪٤۷۵/۷
پودر آجر+کاه	٪۱۰پودرآجر+٪۲کاه	۲۱/۵۹۸۳	+٪٤۵۳
پودر آجر+کاه	٪۱۰پودرآجر+٪۱/۵کاه	۱۲/۳۳۲۸	+٪۲۱۵
پودر آجر+گچ	٪۱۰پودرآجر+٪۱۵گچ	٦/۸۹۳۷	+٪۷٦/۵
پودر آجر+گچ	٪۱۰پودرآجر+٪۲۰گچ	٦/۹۲۵٤	+٪۷۷/۳
پودر آجر+آهک	٪۱۰پودرآجر+٪۱۰آهک	٤۳/۱۳۷۰	+٪۱۰۰٤
پودر آجر+آهک	٪۱۰پودرآجر+٪۱۵آهک	۱۷/۱٤۸٤	+٪۳۳۹

ج ۷. ضریب وارفتگی طرح‌های ساخته شده.

Archive of SID

www.SID.ir

براساس نتایج بدست آمده، در تمامی موارد به‌جز حالت‌های ۲۵٪ گچ، ۲٪ کاه، و ۵٪ کاه، افزودن مواد افزودنی سبب افزایش میزان وارفتگی خشت در آب شده است. ملاحظه می‌گردد که افزودن گچ در ابتدا سبب افزایش ضریب وارفتگی شده و سپس با افزایش مقدار آن به ۲۵٪، ضریب وارفتگی ۲۸/۷٪ کاهش می‌یابد. افزودن آهک نیز سبب کاهش دوام خشت در برابر وارفتگی می‌شود و ضریب وارفتگی را تا ۱۶ برابر افزایش می‌دهد. افزودن ترکیب پودر آجر و آهک نیز ضریب وارفتگی را ۱۰۰۴٪ افزایش می‌دهد. همین طور با افزایش ۵٪ کاه ضریب وارفتگی ۵۳۰٪ کاهش می‌یابد.

نتیجه

مهم ترین نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها بر روی خشت‌های مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد.

۱- یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در این تحقیق وجود ترک‌های عمیق در خشت بود که افزودن برخی مواد افزودنی مانند مثل گچ، آهک و کاه تقریباً به‌طور کامل موجب رفع این مشکل شد. مواد افزودنی دیگری مانند پودرآجر و ماسه نیز تا حدودی مانع از تبدیل شدن ترک‌های سطحی به ترک‌های عمیق شدند.

۲- وجود ۲۵٪ گچ یا ۱۵٪ ماسه سبب بهبود مقاومت فشاری خشت به ترتیب تا ۸۵/۶٪ و ۷۹/۸٪ نسبت به خشت ساده شده‌اند و این دو ماده بهترین نتایج را از لحاظ مقاومت فشاری نشان داده‌اند. در مرحله بعدی، افزودن ۱۰٪ پودر آجر تا ۴۰/۵٪ سبب افزایش مقاومت فشاری شده و استفاده بیشتر از آن، سبب کاهش مقاومت شده است. ۱٪ کاه باعث ۷/۲٪ افزایش مقاومت فشاری شده است ولی مقادیر بیشتر کاه باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. افزودن آهک همواره سبب کاهش مقاومت فشاری (بیش از ۵۰٪) شده است که نشان‌دهنده تأثیر منفی این ماده بر مقاومت فشاری خشت می‌باشد. همچنین ترکیب ۱۰٪ پودر آجر و ۲۰٪ گچ نیز باعث ۷۶٪ افزایش مقامت فشاری خشت شده است.

۳- وجود ۱۰٪ ماسه سبب افزایش ۵۱/۶٪ مقاومت خمشی نسبت به خشت ساده شده و افزودن ۲۰٪ گچ، باعث افزایش ۱۳۵٪ مقاومت خمشی شده است که اثر مطلوب این دو ماده افزودنی را نشان می‌دهد. همچنین افزودن ۱۰٪ پودر آجر به خشت، سبب بهبود ۴۱/۹ درصدی مقاومت خمشی آن شده، هرچند با افزایش مقدار پودر آجر مقاومت خمشی از مقدار مذکور کمتر شده است. کاه باعث کاهش مقاومت خمشی شده به‌طوری‌که با مقدار ۵٪ کاه، مقاومت خمشی ۴۳/۵۶٪ کاهش یافته است. همینطور افزودن آهک به خشت، مانند مقاومت فشاری، سبب کاهش مقاومت خمشی می‌شود به‌طوری که ۱۰٪ آهک به اندازه ۸۶/۵٪ از مقاومت خمشی کاسته است. از بین طرح‌های ترکیبی تنها طرح حاوی پودر آجر و گچ باعث افزایش مقاومت خمشی شده است. ۱۰٪ پودر آجر و ۲۰٪ گچ به اندازه ۱۰۷/۵٪ به مقدار مقاومت خمشی افزوده است.

۴- وجود ۴۰٪ ماسه تا ۹۱٪ و وجود ۲۵٪ گچ تا ۶۸/۴٪ سبب افزایش مقاومت خشت در برابر سایش شده است. افزودن بیش از ۱٪ کاه باعث کاهش مقاومت سایشی خشت شده است به‌طوری که ۵٪ کاه به اندازه ۳۹/۴٪ از مقاومت سایشی می‌کاهد. پودر آجر باعث افزایش ولی آهک همواره باعث کاهش مقاومت سایشی شده است به‌طوری که ۱۵٪ آهک به میزان ۸۶/۷٪ از مقاومت سایشی می‌کاهد. از میان طرح‌های ترکیبی خشت، تنها ترکیب حاوی پودر آجر و گچ است که باعث افزایش مقاومت سایشی شده است. ترکیب ۱۰٪ پودر آجر و ۱۵٪ گچ به اندازه ۲۲۵٪ به این مقاومت افزوده است.

Archive of SID

www.SID.ir

۵- افزودن مواد افزودنی به خشت در اکثر موارد، به‌جز یک مورد گچ و دو مورد کاه، باعث افزایش ضریب وارفتگی خشت در آب شده است. اضافه کردن گچ تا ۲۰٪، سبب افزایش وارفتگی شده ولی مقدار ۲۵٪ گچ ضریب وارفتگی را تا ۲۸/۷٪ کاهش داده است. مناسب ترین ماده برای کاهش ضریب وارفتگی کاه بوده است. افزودن کاه به میزان ۲٪ و بیشتر از ۲٪، باعث کاهش سریع وارفتگی شده ، به‌طوری‌که ۵٪ کاه به مقدار ۵۳۰٪ از ضریب وارفتگی کاسته است. افزودن آهک به خشت ساده نیز، سبب افزایش ضریب وارفتگی خشت به میزان ۱۶۲۰٪ شده است.

۶- با توجه به نتایج بدست آمده، برای خاک اصفهان بهترین ماده افزودنی به خشت جهت بهبود مقاومت‌های مکانیکی آن، گچ و یا ترکیب پودرآجر و گچ ارزیابی می‌شود. مناسب ترین مقدار ۲۵٪ گچ و یا ترکیب ۱۰٪ پودر آجر و ۲۰٪ گچ می‌باشد.

فهرست منابع

- زمرشیدی، حسین. (۱۳۷٤). معماری ایران: مصالح‌شناسی سنتی. زمرد، تهران.
- Hejazi, M., Mehdizadeh-Saradj, F. (2014). Persian architectural heritage: structure. WIT Press, Southampton & Boston.
- Vargas, J., Bariola, J., Blondet, M., Mehta, P.K. (1986). Seismic strength of adobe masonry. Materials and Structures. 19(4). pp. 253-258.
- Bouhicha, M., Aouissi, F., Kenai, S. (2005). Performance of composite soil reinforced with barely straw. Cement and Concrete Composites. 27(5). pp. 617-621.
- Binici, H., Aksogan, O., Shah, T. (2005). Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material. Construction and Building Materials. 19(4). pp. 313-318.
- Degirmenci, N. (2008). The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. Construction and Building materials. 22(6). pp. 1220-1224.
- Kouakou, C.H., Morel, J.C. (2009). Strengths and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder. Applied Clay Science. 44(102). pp. 27-34.
- اسرافیلی، آزاده. (۱۳۸۵). معرفی فعالیت‌های آزمایشگاه مکانیک خاک ارگ بم: از خرداد ۱۳۸۳ تا شهریور ۱۳۸۵. پروژه نجات بخشی ارگ بم، بم.
- رحیم‌نیا، رضا. حیدری‌بنی. داریوش. (۱۳۹۰). تاثیر دامنه خمیری خاک (PI) بر مقاومت کششی و فشاری خشت‌های تثبیت شده با سیمان برای استفاده در حفاظت از سازه‌های خشتی. مرمت، آثار و بافت‌های تاریخی، فرهنگی، شماره ۲، صص. ۱۰۲-۹۱.
- اسماعیلی، علیرضا. قلعه نوی، منصور. (۱۳۹۱). اثر الیاف نخ خرما و آهک به‌عنوان تثبیت کننده طبیعی، بر خصوصیات مکانیکی خشت (در شرایط محیطی با ۳۵ درصد رطوبت). مسکن و محیط روستا، شماره ۱۳۸، صص. ٦۲-۵۳.
- خواجه تراب، جواد. مهدی‌نژاد گودرزی، زهرا. (۱۳۹۲). استفاده از الیاف پلی‌پروپلین برای تقویت خشت‌های گلی. مجموعه مقالات نخستین همایش فناوری و سازه‌های سنتی با محور گنبدها، موسسه آموزش عالی علوم و فنون تهران، تهران.
- وطنی، اصغر. افضلی، محمد. (۱۳۹۲). اثر برخی از افزودنی‌های طبیعی بر مقاومت فشاری خشت. مجموعه مقالات هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.
- Reglamento nacional de construcciones. (2000). Norma técnica de edificacin NTE E.080 Adobe. SENCICO, Lima.
- NZS 4297: Engineering design of earth buildings. (1998). Standards New Zealand, Wellingon.
- NZS 4298: Materials and workmanship for earth buildings. (1998). Standards New Zealand, Wellington.
- NZS 4299: Earth buildings not requiring specific design. (1998). Standards New Zealand, Wellington.
-14.7.4: New Mexico earthen building materials code – New Mexico administrative code. (2009). New Mexico, USA.
- Walker P. (2002). The Australian earth building handbook, HB 195-2002. Standards Australia, Sydney.
- Concerete Earth Blocks Testing Procedures. (2000). Centre for the Development of Enterprise (CDE), Brussels.

Archive of SID

www.SID.ir