Archive of SID

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۶۵-۷۳

Original Article

بررسی آزمایشگاهی دیوار خشتی با ملات مسلح‌شده با کاه تحت کشش قطری

اصغر وطنی اسکویی * (دانشیار)
محمد افضلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
محمدرضا مددی‌پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی
علی بخشی (دانشیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در این نوشتار عملکرد آزمایشگاهی دیوار خشتی با درصدهای مختلف الیاف کاه در ملات تحت بار استاتیکی قطری مورد بررسی قرارگرفته است. تعداد ۱۲ عدد دیوار با انواع مختلف ملات (ملات معمولی، ملات مسلح‌شده با درصدهای وزنی: ۰/۴٪، ۰/۶٪، ۰/۸٪، ۱٪ و ۱/۲٪ الیاف کاه) با خشت غیرمسلح در ابعاد ۲۲ × ۱۲۰ × ۱۲۰ سانتی‌متر ساخته شده‌اند. دیوارها تحت بار فشاری قطری بارگذاری شده‌اند تا نوع ترک‌ها، نیروی نهایی، تغییرشکل نهایی، و جذب انرژی آن‌ها به‌دست آید. در دیوارهای با ملات مسلح‌شده با ۰/۸٪ کاه، مقدار نیرو به اندازه‌ی ۲۶/۷۸٪ و جذب انرژی دیوارهای مذکور به اندازه‌ی ۹۴/۲۲٪ بیشتر از دیوارهای با ملات ساده و غیرمسلح بوده است. نتایج نشان داده‌اند که می‌توان از افزودنی کاه به‌عنوان تسلیح‌کننده در ملات دیوارهای خشتی استفاده کرد، تا رفتار سازه بهبود بخشیده شود.

vatani@srttu.edu
afzali.m64@gmail.com
reza9058@yahoo.com
bakhshi@sharif.edu

واژگان کلیدی: خشت، آزمایش کشش قطری، کاه، ملات، دیوار خشتی.

۱. مقدمه

در زلزله‌هایی که در چند سال اخیر در ایران و سایر نقاط جهان رخ داده است، ساختمان‌های خشتی خسارت جانی و مالی زیادی داشته است. نبود آیین‌نامه و استانداردی برای طراحی ساختمان‌های خشتی از جمله موارد دیگری است که نیاز به مطالعه‌ی دیوارهای خشتی جهت بررسی رفتار این دیوارها را دو چندان می‌کند.

عمده‌ی ساختمان‌های واقع در مناطق روستایی ایران را ساختمان‌های خشتی و گلی تشکیل می‌دهند، که به دلایل: سقف‌سنگین و متعاقب آن افزایش شتاب زلزله، عدم یکپارچگی کافی سقف با دیوارها، و نامشخص‌بودن اتصال اجزاء سازه‌یی به یکدیگر، و مقاومت ناکافی ملات این‌گونه ساختمان‌ها را عموماً با خسارت‌های جدی مواجه کرده است. همچنین نامشخص‌بودن اجزاء سازه‌یی و نوع مصالح مصرف‌شده از یک‌سو و عدم تطابق ساختمان‌های موجود با مدل‌های کلاسیک سازه‌یی نظیر قاب‌های گیردار و غیره از سوی دیگر، تخمین مقاومت لرزه‌یی این ساختمان‌ها را بسیار دشوار می‌کند. براساس آمار، ۷۰٪ از واحدهای مسکونی موجود در کشور، بی‌دوام، و کم‌دوام هستند که در هنگام زلزله، ساکنان ساختمان حتی مهلتی برای فرار و خارج‌شدن از ساختمان را نیز به‌دست نمی‌آورند.[۱]

ساخت و سازهای خشتی و گلی در نقاط مختلف دنیا و از جمله در کشور ما، ایران، به‌دلایل مزایای زیاد آن رواج بسیاری دارد. سازگاری مناسب، اقتصادی‌بودن و سهولت و سرعت در تهیه، از جمله ویژگی‌های مثبت این نوع مصالح محسوب می‌شود، که به دلیل مسائل اقتصادی، هم اکنون نیز ساخت و ساز غالب بسیاری از نقاط کشور، از نوع خشتی و گلی است. اما مسئله‌ی مهمی که در ارتباط با این ساختمان‌ها به‌چشم می‌خورد، عدم طراحی بسیاری از آن‌ها برای مقابله با بارهای لرزه‌یی است. زلزله‌های اخیر نشان داده است که به‌طورکلی سازه‌های بنایی غیرمسلح در برابر بارهای لرزه‌یی آسیب‌پذیرند و نیاز به بهسازی دارند.[۱]

اصلی‌ترین دلایل برای استفاده از خشت را می‌توان در این موارد خلاصه کرد:[۲] الف) ماده‌یی که در همه جا در دسترس است؛ ب) برای تولید خشت و سازه‌های خشتی، مهارت و تکنولوژی بالایی موردنیاز نیست؛ پ) تعمیر و نگه‌داری سازه‌های خشتی، نیاز به آزمایشگاه خاصی ندارد؛ و ت) خواص ذاتی خاک، آن را عایق صدا و گرما می‌سازد.[۳و۴] علاوه بر موارد فوق، عدم دسترسی به مصالح نوین و اقتصاد خانواده در نقاط دوردست باعث شده است هنوز در نقاط زیادی، استفاده از این‌گونه مصالح رایج باشد.

مقاومت جانبی یک سازه‌ی خشتی از رفتار برشی درون ـ صفحه‌ی دیوارهای خشتی به‌دست می‌آید. علاوه بر این، رفتار سازه‌های خشتی به‌صورت برون ـ صفحه، از نوع خمشی است.[۵و۶] در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد، فقدان سختی درون ـ صفحه و برون ـ صفحه‌ی دیوارهای خشتی خطر بزرگی برای ساکنان است.[۷] از آنجایی که سازه‌های خشتی مقاومت و شکل‌پذیری کافی ندارند، پایداری یک سازه‌ی خشتی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۶/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۲۵.

www.SID.ir

Archive of SID

معمولی و بدون تقویت بعد از یک زلزله‌ی شدید ممکن نیست.[۷] بنابراین افزایش مقاومت مناسب، یکپارچگی، و اتلاف انرژی در دیوارهای خشتی، یک مسئله‌ی بحرانی تحت بارهای شدید لرزه‌یی شده است.

برای افزایش مقاومت و بهبود رفتار دیوارهای خشتی مطالعاتی بر روی رفتار و خواص خشت شده است، که روش‌های مختلفی را برای افزایش مقاومت فشاری خشت مورد استفاده قرار داده‌اند.[۸-۱۱]

آئین نامه‌ی نیوزلند (NZ ۴۲۹۷)، مدول یانگ $E = ۲۰۰\ MPa$، نسبت پواسون ۰/۳۵، و بیشینه‌ی تنش فشاری $\sigma_C = E/۳۰۰$ را توصیه کرده است. براساس مطالعات واریوم و همکاران، بیشینه‌ی تنش کششی را می‌توان ۲۰٪ مقاومت فشاری در نظر گرفت و برای تنش برشی مجاز نیز فرمول‌های ۱ و ۲ را توصیه کرده‌اند:[۱۲]

$$\tau = ۰/۰۷ \times \sigma_C \qquad (۱)$$

$$\tau = ۷۰ + ۵ \times H\ (kPa) \qquad (۲)$$

که در آن‌ها، H نشان دهنده‌ی ارتفاع دیوار بر حسب متر و σ_C مقاومت فشاری است.

استفاده از میلگردهای افقی و قائم در ساختار دیوارهای خشتی در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ مورد مطالعه قرار گرفته است، که موجب بهبود رفتار درون ـ صفحه و برون ـ صفحه شده است.[۶] در پژوهش دیگری (۲۰۰۳) نیز برای بهسازی دیوار از تور در بین ملات گوشه‌های دیوار استفاده شده است.[۱۳]

بسیاری از مواد طبیعی در دسترس (مانند: الیاف کنف، الیاف کاه و جو، بامبو، چوب، برگ خرما، الیاف نارگیل، پنبه، و چمن) که به‌عنوان تقویت‌کننده به خاک اضافه شده‌اند، خواص مهندسی خاک را بهبود بخشیده‌اند.[۱۴و۱۵] قدیمی‌ترین مثال از کامپوزیت‌ها مربوط به افزودن کاه به گِل جهت تقویت گِل و ساخت آجری مقاوم جهت استفاده در بناها بوده است. قدمت این کار به ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح باز می‌گردد. در این مورد کاه نقش تقویت‌کننده و گِل نقش زمینه یا ماتریس را دارد. ارگ بم، که شاهکار معماری ایرانیان بوده است، نمونه‌ی بارزی از استفاده از تکنولوژی کامپوزیت‌ها در قرون گذشته بوده است.[۱۶]

به منظور بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر هوازدگی، باید سطح تماس ذرات خاک افزایش یابد، که بدین منظور باید حفره‌های خاک را به میزان کمینه رساند. خاک بدون حفره از لحاظ تئوری خاکی با ذرات کره‌یی‌شکل است، که درصد آن‌ها تابع فرمول فولر (رابطه‌ی ۳) باشد:[۱۷]

$$p = ۱۰۰\ (d/D)^n \qquad (۳)$$

که در آن، p نسبت دانه به قطر، d قطر دانه برای یک مقدار معین از p، D بزرگ‌ترین قطر دانه، و n ضریب درجه‌بندی است. وقتی که دانه‌ها کاملاً گروی باشند، مقدار n برابر ۰/۵ است.

مکانیزم‌های مختلفی برای شکست دیوارهای خشتی وجود دارد. یکی از ضعف‌های دیوارهای مصالح بنایی و دیوارهای خشتی در برابر بارهای جانبی، ملات آن است. در این نوشتار سعی شده است که مقایسه‌یی بین رفتار ملات گِل و کاه‌گل که به‌صورت متداول در ایران و کشورهای دیگر استفاده می‌شود، بررسی شود. بدین منظور رفتار دیوارهای خشتی با دو نوع ملات تحت فشار قطری مورد بررسی قرار گرفته است. در یکی از ملات‌ها از خاک رس و ماسه و در ملات دیگر علاوه بر مصالح نام برده‌شده، از درصدهای مختلفی از کاه (که ماده‌یی طبیعی، ارزان، سازگار با محیط زیست و در دسترس) نیز به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی ملات استفاده شده است.

با توجه به اینکه در ساختمان‌های خشتی، آسیب عمده در ملات رخ داده، لازم است علاوه بر هنگام ساخت، در بهسازی و مقاوم‌سازی دیوارهای خشتی نیز از ملات با کاه استفاده شود.

۲. روش آزمایش

۱.۲. مصالح

برای ساخت خشت از رس، ماسه، و شن استفاده شده است، تا مشابه مصالح موجود دردسترس برای ساخت خشت باشد.

در خشت، سنگ‌دانه (شن و ماسه) نقش پُرکننده و جلوگیری از انقباض و ترک‌خوردن خشت را دارد و از آب برای روان‌کردن و مخلوط‌کردن مواد با یکدیگر استفاده می‌شود.

۱.۱.۲. خاک رس

برای تهیه‌ی خشت و ملات از یک نوع خاک رس استفاده شده است. مشخصات خاک رس با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایش‌های انجام‌شده بر روی خاک رس بر طبق استاندارد ASTM کد D۴۲۰،[۱۸] انجام شده است. بر طبق طبقه‌بندی سیستم متحد برای خاک، خاک از نوع رسی با خاصیت خمیری پایین (CL) بوده است.

تحقیقات هوبن، حد روانی خاک تثبیت‌نشده را بین ۲۵ - ۵۰ درصد (۳۰ - ۳۵ درصد بهتر است) بیان کرده و حد خمیری را بین ۱۰ - ۲۵ درصد (۱۲ -۲۲ درصد بهتر است) بیان کرده است. همچنین شاخص حالت خمیری، که نشان‌گر ویژگی و فعالیت رس است، را کمتر از ۶٪ بیان کرده است، مطالعات اخیر مقدار بالاتر را نیز مجاز دانسته‌اند.[۱۷]

۲.۱.۲. سنگ‌دانه

سنگ‌دانه‌ی استفاده‌شده در خشت، ماسه و شن است. مشخصات ماسه و شن در جدول ۲ ارائه شده است. رطوبت ماسه و شن به ترتیب در هنگام استفاده در خشت برابر با ۱/۵۳ و ۲/۴ درصد بوده است. از استاندارد ASTM با عنوان ثابت C۵۶۶ برای انجام آزمایش‌های سنگ‌دانه استفاده شده است.[۱۹]

۳.۱.۲. کاه

مشخصات کاه مورد استفاده در ملات در جدول ۳ ارائه شده است. وجود کاه باعث اتصال دانه‌های خاک به یکدیگر شده است، در واقع همانند آرماتور در بتن، دانه‌های رس و ماسه را به هم نگه داشته است و مانع از ترک‌خوردن آن‌ها می‌شود.[۲۰] برای انجام آزمایش کشش کاه، مستقیماً الیاف در زیر دستگاه کششی قرار داده شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات خاک رس مورد استفاده در خشت و ملات.

پارامتر	واحد	مقدار
وزن مخصوص خاک	$KN/m^۳$	۲/۷
مقدار رطوبت	٪	۳/۷
حد روانی (LL)	٪	۲۹
حد خمیری (PL)	٪	۱۶/۹۴
حد انقباض (SL)	٪	۱۳/۵۹
نشانه‌ی خمیری (PI)	٪	۱۲/۰۶
نشانه‌ی روانی (LI)	٪	-۱/۱۰
نشانه‌ی غلظت (CI)	٪	۲/۱۰

www.SID.ir

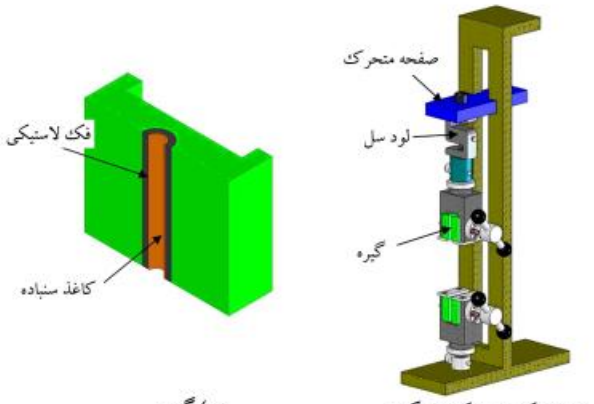
Archive of SID

جدول ۲. مشخصات سنگ‌دانه.

پارامتر	واحد	نوع سنگ‌دانه	
		شن	ماسه
W_d	(gr)	۴۹۳٫۶۶	۴۹۴٫۴۴
W_{SSD}	(gr)	۵۱۱٫۷۲۸	۵۰۵٫۴۲
V_S	(C.C)	۲۷۰	۲۰۰
G_S		۱٫۸۳	۲٫۴۷
WSSD	٪	۳٫۶۶	۲٫۲۲

جدول ۳. مشخصات کاه.

پارامتر	واحد	مقدار
طول	(mm)	۴۰ ــ ۱۰
قطر	(mm)	۴ ــ ۱
وزن مخصوص	(KN/m^3)	۰٫۱۲
مقاومت کششی	(MPa)	۵۰ ــ ۳۸
دانسیته		۲٫۰۵



الف) شکل شماتیک دستگاه؛ ب) گیره.

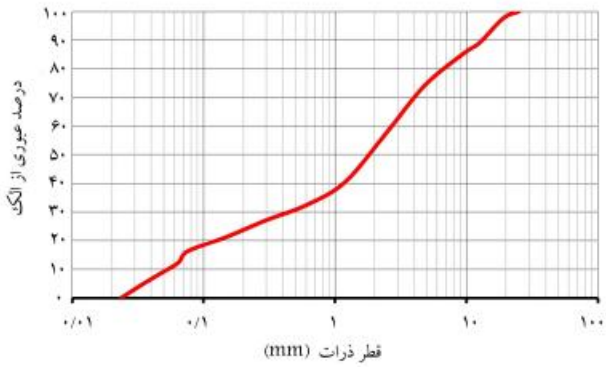
شکل ۱. دستگاه اندازه‌گیری استحکام کششی.

از دستگاه کششی که مقاومت کششی الیاف را در صنایع چوب اندازه‌گیری می‌کنند، استفاده شده و برای آماده‌سازی نمونه و قراردادن نمونه در زیر دستگاه در دو طرف کاه، که در زیر فک دستگاه قرار می‌گیرد، دو عدد چوب به اندازه‌ی فک دستگاه بریده شده است، که کاه بین دو عدد چوب با چسب چوب قرار گیرد و از زیر گیره‌های دستگاه سُر نخورد. اندازه‌گیری استحکام کششی در یک ماشین آزمون مواد در محدوده‌ی کرنشی نسبتاً پایینی صورت گرفته است. روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش مشابه روش‌هایی است که در مطالعات پیشین استفاده شده است.[۲۱و۲۲] به دلیل طبیعت شکننده‌ی ساقه‌های علوفه، اندازه‌گیری استحکام کششی آنها کار مشکلی است، زیرا این امر باعث گسیختگی دو انتهای نمونه در داخل گیره‌ها هنگام اعمال نیرو می‌شود.[۲۳]

یک دستگاه مکانیکی شامل دوگیره، طراحی و ساخته شده است. گیره‌ها توانایی ثابت نگه‌داشتن ساقه را دارند و شامل فک لاستیکی و کاغذ سمباده هستند، که کاغذ سمباده بین ساقه و فک لاستیکی قرار می‌گیرد (شکل ۱). نمونه بعد از قرار دادن بین گیره‌ها با استفاده از یک دستگاه آزمون فشار ـ کشش اختصاصی تحت کشش قرار می‌گیرد.[۲۴]

جدول ۴. درصد مصالح استفاده‌شده در خشت.

خاک رس (٪)	ماسه (٪)	شن (٪)	آب (٪)
۳۳	۴۸	۶	۱۳



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در خشت.

۲.۲. مشخصات خشت

برای رعایت اصول دیوار چینی از خشت (۷ × ۲۲ × ۲۲ cm) و نیم‌خشت (۷ × ۱۱ × ۲۲ cm) استفاده شده است. درصدهای مصالح استفاده‌شده برای ساخت خشت در جدول ۴ ارائه شده است.

نمودار دانه‌بندی مصالح مورد استفاده در خشت، در شکل ۲ نشان داده شده است.

مقاومت فشاری هریک از خشت‌ها تحت آزمایش فشاری با استفاده از نیروسنج و تغییر مکان‌سنج اندازه‌گیری شده است. برای بارگذاری از استاندارد شماره‌ی ۷ ایران استفاده شده است.[۲۴] در استاندارد مذکور، سرعت بارگذاری مشخص نشده و سرعت بارگذاری با استفاده از سرعت پیشنهادی توسط ASTM مشخص شده است.[۲۵] ۵ عدد از هرکدام از ابعاد خشت و نیم‌خشت مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های با ابعاد ۷ × ۲۲ × ۲۲ cm (خشت)، برابر با ۴٫۳۷ مگاپاسکال و مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های با ابعاد ۷ × ۱۱ × ۲۲ cm (نیمه خشت)، برابر با ۳٫۲۹ مگاپاسکال تعیین شده است. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش‌شده برای مقاومت فشاری نیم‌خشت و خشت به ترتیب با ابعاد ۷ × ۱۱ × ۲۲ سانتی‌متر و ۷ × ۲۲ × ۲۲ سانتی‌متر در جدول‌های ۵الف و ۵ب نمایش داده شده است. مقاومت فشاری خشت‌های با ابعاد ۷ × ۱۱ × ۲۲ سانتی‌متر، کمتر از مقاومت فشاری خشت‌های با ابعاد ۷ × ۲۲ × ۲۲ سانتی‌متر است، که یکی از دلایل آن سطح توزیع تنش کمتر و متفاوت‌بودن شکل مستطیلی نمونه‌های نیم‌خشت و شکل مربعی نمونه‌های خشتی است.

انحراف معیار و خطا در آزمایش فشاری برای نمونه‌های نیم‌خشت به ترتیب ۰٫۵۷ و ۰٫۲۵ و برای نمونه‌های خشتی به ترتیب ۰٫۵۸ و ۰٫۲۷ به‌دست آمده است.

۳.۲. مشخصات ملات

برای ساختن ملات گِل، آخوره می‌بندند و در آن آب می‌اندازند و صبر می‌کنند تا پولک‌های خاک رس آب را بمکند، پس از آن ملات را خوب ورز می‌دهند و به مصرف می‌رسانند. چون ملات گِل پس از خشک‌شدن جمع می‌شود و ترک می‌خورد، به آن کاه می‌زنند، که آن را مسلح می‌کند و از ترک‌خوردن آن جلوگیری می‌کند. ۶ نوع

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵الف) مقاومت فشاری نیم‌خشت.

ردیف	A (mm^2)	F (KN)	P = F/A (MPa)
۱	۲۴۴۲۰	۷۰٫۰۴	۲٫۸۷
۲	۲۳۸۷۱	۹۴٫۳	۳٫۹۵
۳	۲۳۶۵۲	۶۱٫۷۵	۲٫۶۱
۴	۲۴۴۲۰	۸۰٫۵	۳٫۳۰
۵	۲۴۳۱۰	۹۰٫۸	۳٫۷۴
۳٫۲۹ ± ۰٫۵۷			

جدول ۵ب) مقاومت فشاری خشت.

ردیف	سطح باربر			F (KN)	P = F/A (MPa)
	l (mm)	b (mm)	A (mm^2)		
۱	۲۲۰	۲۱۹	۴۸۱۸۰	۱۸۸٫۲	۳٫۹۱
۲	۲۱۸	۲۱۸	۴۷۵۲۴	۲۵۵٫۸	۵٫۳۸
۳	۲۱۹	۲۲۰	۴۸۱۸۰	۱۹۶٫۱	۴٫۰۷
۴	۲۲۰	۲۱۹	۴۸۱۸۰	۲۰۰٫۲	۴٫۱۶
۵	۲۲۱	۲۲۰	۴۸۱۸۰	۲۱۰٫۵	۴٫۳۳
۴٫۳۷ ± ۰٫۵۸					

جدول ۶. درصد وزنی مصالح استفاده‌شده در ملات.

نوع ملات		رس (٪)	ماسه (٪)	آب (٪)	کاه (٪)
معمولی		۶۴٫۵	۱۶٫۱	۱۹٫۴	—
مسلح‌شده	۰٫۴	۶۴٫۲۴	۱۶٫۰۴	۱۹٫۳۲	۰٫۴
	۰٫۶	۶۴٫۱۱	۱۶٫۰۰	۱۹٫۲۸	۰٫۶
	۰٫۸	۶۳٫۹۸	۱۵٫۹۷	۱۹٫۲۵	۰٫۸
	۱	۶۳٫۸۶	۱۵٫۹۴	۱۹٫۲۱	۱
	۱٫۲	۶۳٫۷۳	۱۵٫۹۱	۱۹٫۱۷	۱٫۲

ملات، که مشخصات آن‌ها در جدول ۶ ارائه شده است، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و درصدهای مصالح مورد استفاده در ملات، در جدول مذکور ارائه شده است.

الیاف کاه اشباع سطح خشک به ترکیب اضافه شده‌اند. و از استاندارد ASTM کد C952 برای انجام این آزمایش استفاده شده است.[۲۶]

ملات‌های ساخت‌شده در قالب‌های ۵ × ۵ × ۵ سانتی‌متری ریخته شده‌اند و پس از تراکم به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی در قالب باقی مانده‌اند، و سپس از قالب خارج شده‌اند. پس از ۲۸ روز، که در شرایط محیطی موردنظر عمل آمده‌اند، زیر دستگاه پرس قرار داده شده و مقاومت فشاری آن‌ها تعیین شده است. برای هر نوع ملات، ۳ نمونه برای تعیین مقاومت فشاری ساخته شده است. نتایج میانگین مقاومت فشاری در جدول ۷ ارائه شده است.

برای آزمایش خمشی، ملات‌های ساخته‌شده در قالب‌های cm ۱۶ × ۴ × ۴ ریخته شده، به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی در قالب باقی مانده، و سپس از قالب خارج شده‌اند. پس از ۲۸ روز، که در شرایط محیطی موردنظر عمل آمده‌اند، با دستگاه مخصوص آزمایش مقاومت خمشی، شکسته و مقاومت آن‌ها تعیین شده است. نتایج مقاومت خمشی میانگین ملات در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷. نتایج مقاومت فشاری میانگین انواع ملات.

نوع ملات		مقاومت فشاری میانگین (MPa)	انحراف معیار	خطا
معمولی		۳٫۰۸	۰٫۲۲	۰٫۰۳
مسلح شده با	۰٫۴٪ کاه	۲٫۶۲	۰٫۲۷	۰٫۰۵
	۰٫۶٪ کاه	۲٫۲۶	۰٫۱۵	۰٫۰۲
	۰٫۸٪ کاه	۱٫۹۱	۰٫۱۳	۰٫۰۱
	۱٪ کاه	۱٫۵۵	۰٫۱۴	۰٫۰۱
	۱٫۲٪ کاه	۱٫۲۱	۰٫۱	۰٫۰۰۷

جدول ۸. نتایج مقاومت خمشی میانگین ملات.

نوع ملات		مقاومت فشاری میانگین (MPa)	انحراف معیار	خطا
معمولی		۱٫۷۳	۰٫۱۳	۰٫۰۱
مسلح شده با	۰٫۴٪ کاه	۱٫۱۱	۰٫۱۸	۰٫۰۲
	۰٫۶٪ کاه	۰٫۹۷	۰٫۱۱	۰٫۰۰۸
	۰٫۸٪ کاه	۰٫۸۲	۰٫۰۶	۰٫۰۰۲
	۱٪ کاه	۰٫۶۹	۰٫۱	۰٫۰۰۷
	۱٫۲٪ کاه	۰٫۵۵	۰٫۰۵	۰٫۰۰۲

همان‌طور که در نتایج مشاهده می‌شود، در ابعاد مورد آزمایش، کاه عملکرد خوبی از خود نشان نداده و با افزودن کاه مقاومت خمشی کاهش یافته است. هر چه ابعاد نمونه‌ها افزایش پیدا کند، کاه در مقاومت فشاری و کششی تأثیر بیشتری از خود نشان می‌دهد و باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی می‌شود. این نتایج در پژوهشی در سال ۲۰۱۱،[۲۷] نیز مشاهده شده است.

۳. نحوه‌ی انجام آزمایش

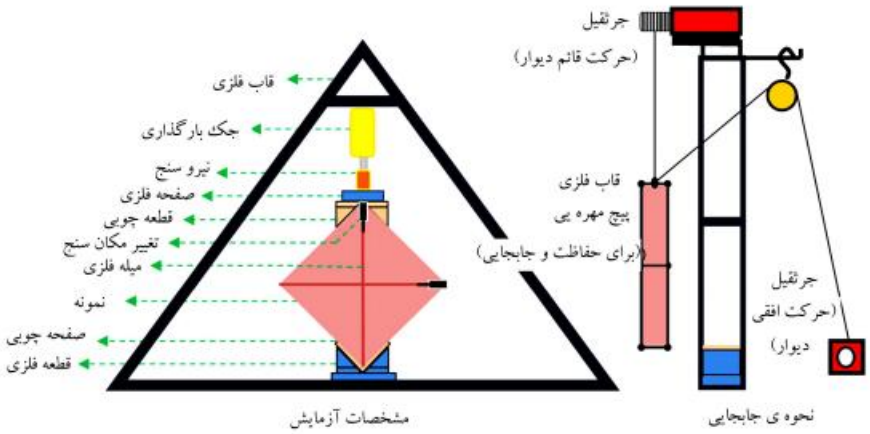
۱۲ نمونه با ابعاد ۲۲ × ۱۲۰ × ۱۲۰ سانتی‌متر ساخته شده و ملات ۲ تا از دیوارها ساده و ملات دیگر دیوارها کاه‌گل (با درصدهای متفاوت) بوده است. خشت‌های استفاده‌شده در هر دو نوع دیوار یکسان بوده است. نمونه‌ی دیوارهای خشتی ساخته‌شده بعد از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته است. برای جلوگیری از آسیب‌دیدن نمونه‌ها قبل از آزمایش، نمونه‌ها در نزدیکی محل آزمایش ساخته شده و اطراف دیوارها چوب قرار داده شده، سپس درون قاب فلزی پیچ و مهره‌یی جایگذاری شده و جابه‌جایی توسط جرثقیل، همراه با قاب صورت گرفته است؛ و پس از قرارگرفتن در زیر جک، به آرامی قاب فلزی و قطعات چوبی برداشته شده‌اند (شکل ۳). نحوه‌ی انجام این آزمایش براساس ASTM E519 است.[۲۸]

برای توزیع بهتر نیروی فشاری و خردنشدن گوشه‌ها تحت بار متمرکز، در قسمت بالا و پایین دیوار، قطعات چوبی قرار داده شده است.[۷] سپس در بالای دیوار و در زیر جک هیدرولیکی، نیروسنج قرار داده شده است. برای اندازه‌گیری تغییرمکان دیوار در دو راستای قطر، تغییرمکان سنج نصب شده است. شکل‌های ۳ و ۴ مشخصات دیوار را قبل از شروع آزمایش نشان می‌دهند.

تمامی دیوارها در شرایط یکسانی بارگذاری شده‌اند. سرعت بارگذاری در تمامی آزمایش‌های یکسان بوده است.

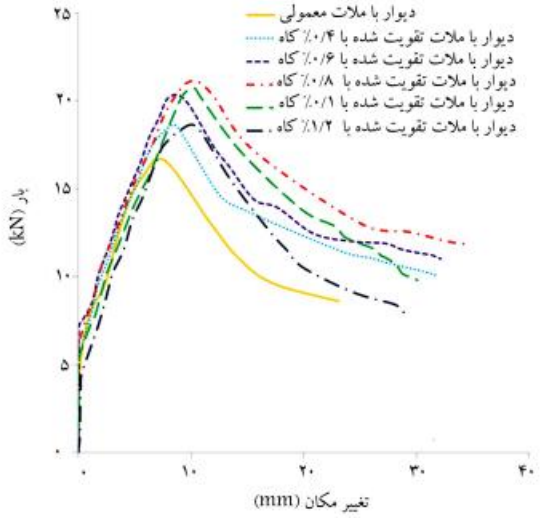
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳. جزییات انجام آزمایش.

شکل ۴. آماده‌سازی دیوار قبل از آزمون.



شکل ۵. میانگین نمودار بار ـ تغییرمکان دیوارهای خشتی.

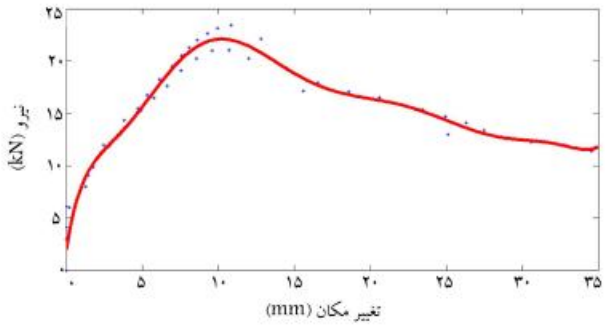
۴. مقایسه‌ی نتایج

منحنی بار ـ تغییرمکان به‌صورت میانگین برای دیوارهای خشتی در شکل ۵ نشان داده شده است. برای به‌دست‌آوردن نمودار دیوارها، از درون‌یابی خطی داده‌های دیوارها توسط نرم‌افزار متلب استفاده شده است. از داده‌های هر دو دیوار آزمایش شده، برای رسم نمودار دیوار موردنظر استفاده شده است. در شکل ۶، نمودار به‌دست‌آمده از درون‌یابی خطی برای دیوار با ملات تقویت‌شده با ۰/۸٪ کاه نمایش داده شده است.

مقدار بار بیشینه‌ی دیوار خشتی با ملات ساده و ملات کاه‌گل با ۰/۸٪ به ترتیب برابر با ۱۶/۶ kN و ۲۱/۰۵ kN بوده است. با توجه به نیروی بیشینه‌ی دیوار خشتی ساده و ملات کاه‌گل مشاهده می‌شود که دیوار با ملات کاه‌گل به اندازه‌ی ۲۶/۷۸٪، نیروی بیشتری نسبت به دیوار ساده تحمل کرده است.

در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف، اُفت پس از نقطه‌ی اوج کمتر است و رفتار شکننده‌ی شن و ماسه تا حدودی انعطاف‌پذیرتر شده است، در پژوهشی در سال ۲۰۰۲،[۲۹] نیز این نکته مورد توجه قرار گرفته است.

عملکرد خوب الیاف در زمانی است که ترک‌ها بزرگ می‌شوند و الیاف از نمونه بیرون می‌زند و مانند پلی دو قطعه‌ی نمونه را به یکدیگر متصل نگه می‌دارد.[۳۰]



شکل ۶. نمودار دیوار تقویت‌شده با ۰/۸٪ کاه.

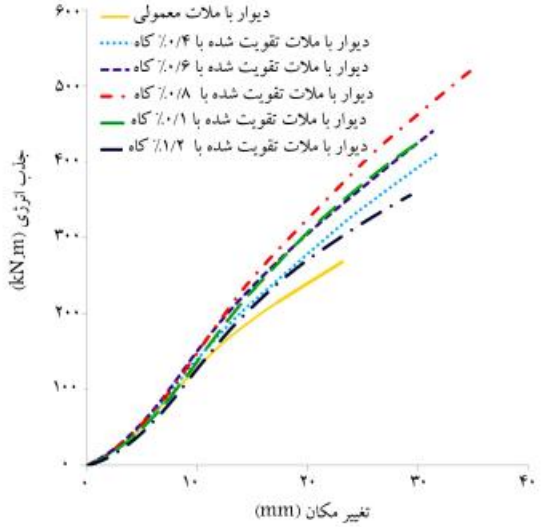
نمودار جذب انرژی ـ تغییرمکان دیوارهای خشتی، که جذب انرژی به‌عنوان تابعی از تغییرمکان است، در شکل ۷ نمایش داده شده است.

در شکل ۸، نمودار مقایسه‌یی بین جذب انرژی نهایی دیوار خشتی با ملات ساده و با ملات کاه‌گل نشان داده شده است.

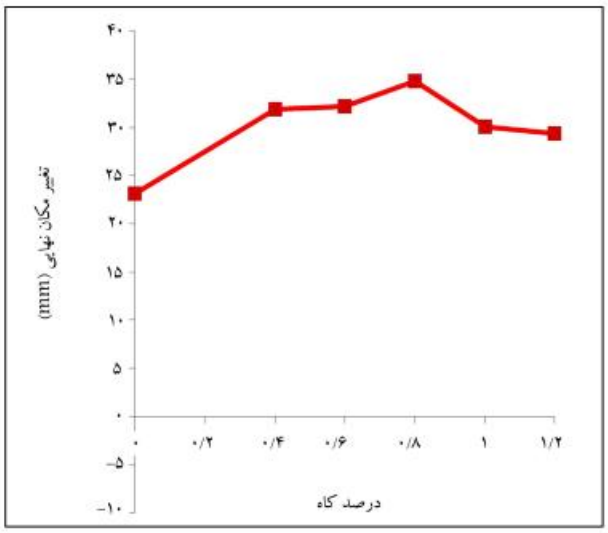
جذب انرژی نهایی دیوار خشتی با ملات ساده ۲۶۸/۱۶ kN.mm و دیوار خشتی با ملات کاه‌گل برابر ۵۲۰/۸۲ kN.mm بوده است. همان‌طورکه از نمودارها مشخص است، جذب انرژی دیوارهای مسلح‌شده با ملات کاه‌گل بیشتر از دیوارهای

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. نمودار جذب انرژی ـ تغییرمکان دیوارهای خشتی.



شکل ۸. نمودار جذب انرژی تجمعی دیوارهای خشتی.

معمولی است. دیوار خشتی با ملات کاه‌گل به اندازه‌ی ۹۴/۲۲٪ جذب انرژی بیشتری نسبت به دیوار با ملات ساده از خود نشان داده است.

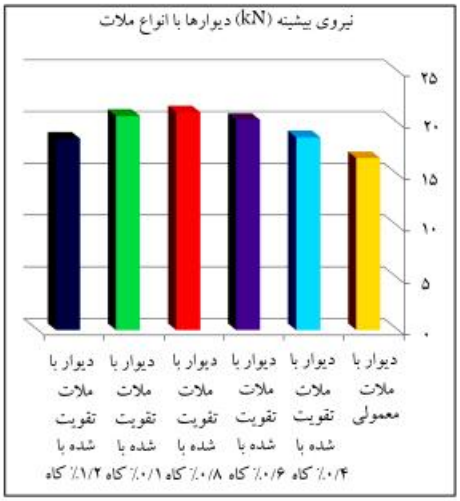
حضور الیاف تغییر قابل ملاحظه‌یی در پاسخ کشسان و مقاومت اولیه تا رسیدن به ترک ایجاد نکرده است، ولی در مقابل تا حد زیادی، مقاومت پس از ترک اولیه، شکل‌پذیری و انرژی جذب‌شده‌ی نمونه‌های با الیاف بهبود یافته است، که این نتایج با تحقیقات قبلی[۹] نیز همخوانی دارد.

در جدول ۹، میانگین نتایج دیوار خشتی با گل و کاه‌گل نمایش داده شده است. در شکل ۹، نیروی بیشینه‌یی که دیوارهای خشتی تحمل کرده‌اند، با هم مقایسه شده است. مطابق شکل مذکور، دیوارهای با ملات مسلح‌شده با کاه، نیروی بیشتری نسبت به دیوار معمولی تحمل کرده‌اند. دیوارهای مسلح بین ۱۱/۴۵ تا ۲۶/۷۸ درصد نسبت به دیوار با ملات معمولی نیروی بیشتری را تحمل کرده‌اند. در شکل ۱۰، تغییرمکان در نیروی بیشینه‌ی دیوارهای آزمایش‌شده با هم مقایسه شده است. مطابق شکل مذکور، تغییرمکان دیواری که در ملات آن از ۰/۸٪ کاه برای تقویت استفاده شده است، در نیروی بیشینه، بیشترین تغییرمکان را داشته است.

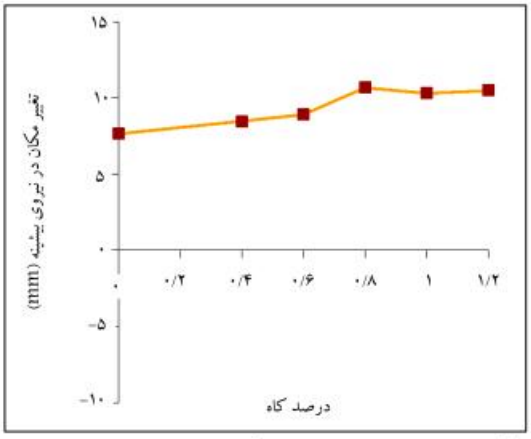
نتایج نهایی دیوارهای خشتی به‌صورت میانگین در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۹. میانگین نتایج آزمایش دیوار خشتی با انواع ملات.

نمونه	تغییرمکان نیروی بیشینه (mm)	نیروی بیشینه (KN)
دیوار با ملات معمولی	۷/۶۵	۱۶/۶
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰/۴٪ کاه	۸/۴۷	۱۸/۶۳
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰/۶٪ کاه	۸/۹۲	۲۰/۳
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰/۸٪ کاه	۱۰/۷	۲۱/۰۵
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۱٪ کاه	۱۰/۳۲	۲۰/۷
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۱/۲٪ کاه	۱۰/۵	۱۸/۵



شکل ۹. نمودار مقایسه‌یی نیروی بیشینه‌ی دیوارهای خشتی.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌یی تغییرمکان در نیروی بیشینه‌ی دیوارها.

جدول ۱۰. میانگین نتایج آزمایش دیوار خشتی با ملات ساده و کاه‌گل.

نمونه	سختی (N/mm)	ضریب شکل‌پذیری	تنش کششی بیشینه (MPa)
دیوار با ملات معمولی	۲۱۶۹/۶۵	۳/۰۲	۰/۰۴۳
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰/۴٪ کاه	۲۱۹۸/۲	۳/۷۶	۰/۰۵
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰/۶٪ کاه	۲۲۷۶/۲۳	۳/۶۱	۰/۰۵۷
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰/۸٪ کاه	۱۹۶۶/۰۹	۳/۲۵	۰/۰۵۹
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۱٪ کاه	۲۰۰۵/۸۱	۲/۹۲	۰/۰۵۸
دیوار با ملات مسلح‌شده با ۱/۲٪ کاه	۱۷۶۱/۹	۲/۷۹	۰/۰۵

www.SID.ir

Archive of SID

در شکل ۱۱، تنش کششی دیوارهای آزمایش‌شده نمایش داده شده است. با مقایسه‌ی دیوارها مشاهده می‌شود که دیوار با ۰/۸٪ کاه بیشترین مقدار تنش کششی را در بین دیوارهای آزمایش‌شده تحمل کرده است.

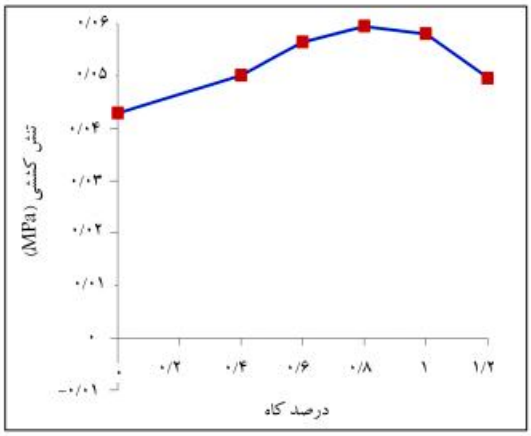
پس از شکست دیوارها، ملات دیوارها با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ملات معمولی تُرد است و پس از شکست، از روی بلوک جدا و به ذراتی ریزتر از ۲ تا ۸ سانتی‌متر تبدیل شده است؛ اما در ملات‌های کاه‌گل، ملات یک‌پارچه است و به‌راحتی از بلوک جدا نشده است، که این می‌تواند اولاً به‌دلیل نقش کاه در اتصال اجزاء ملات به یکدیگر و ثانیاً به دلیل خشک‌شدن متعادل‌تر و انقباض کمتر در خشک‌شدن ملات در دیوارهای با ملات مسلح باشد.

در آزمایش کشش قطری در همه‌ی نمونه‌ها، شکست دیوار از ملات رخ داده است، که نشان‌دهنده‌ی این است که ملات ضعیف‌ترین قسمت دیوارهای خشتی است. در دیوار با ملات ساده، ترک در راستای ضعیف‌ترین ملات ایجاد شده است (شکل ۱۳). ترک‌های ایجادشده در دیوار با ملات کاه‌گل در شکل ۱۴ ارائه شده است. نمونه‌های با ملات مسلح شده با کاه عملکرد بهتری داشته‌اند و ترک‌های بیشتر و با عمق کمتر در دیوار ایجاد شده است.

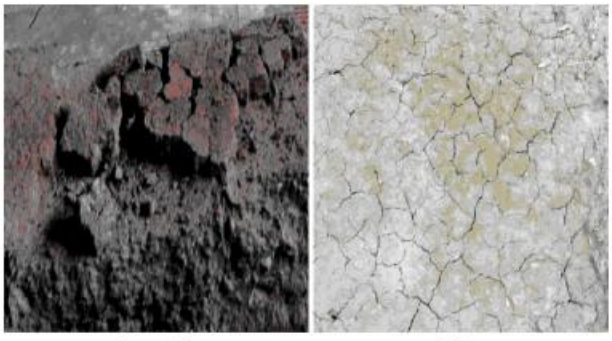
با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده در نمونه‌های با ملات مسلح شده با الیاف کاه، این دو فرایند انجام شده است:

۱. هنگام خشک‌شدن، کاه از انقباض ملات جلوگیری کرده و ترک‌های ریزتر و بیشتر ایجاد شده است.

۲. در هنگام بارگذاری با اتصال نواحی مختلف، ملات از بازشدن ترک‌ها جلوگیری کرده است.



شکل ۱۱. تنش کشش دیوارهای خشتی.



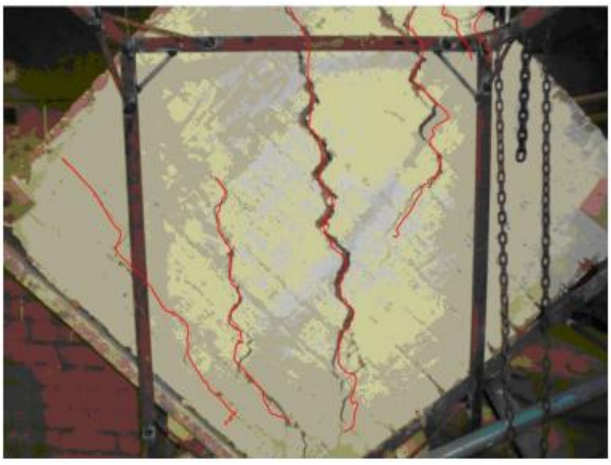
ملات معمولی ملات کاه‌گل

شکل ۱۲. مقایسه عملکرد ملات به‌کار رفته.

همان‌طورکه در نمودارها مشاهده می‌شود، رفتار هر دو دیوار در قسمت کشسان یکسان است. بنابر قانون موهر ـ کلمب رفتار برشی وابسته به دو پارامتر چسبندگی و اصطکاک است. در ملات گِل، ماسه باعث اصطکاک و رس باعث چسبندگی ملات شده است. با افزودن کاه به ملات همان‌طورکه در نتایج مشخص شده است، افزودنی کاه در نمودارها تا قسمتی باعث افزایش نیروی بیشینه، تغییرمکان بیشینه، تغییرمکان نهایی و جذب انرژی شده است، ولی با افزودن بیشتر باعث کاهش آنها شده است، که این می‌تواند به این دلیل باشد که افزودن کاه تا مقدار مشخصی، باعث یک‌پارچه‌ترشدن ملات و مسلح‌شدن آن شده است، ولی با افزودن بیشتر با نقش تداخل در اصطکاک ماسه و چسبندگی رس، باعث کاهش خواص مکانیکی شده است.

همان‌طورکه در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزودن کاه به ملات، یک ترک عمیق به چند ترک تبدیل شده و از طرفی ترتیب ایجاد ترک‌ها ابتدا در ناحیه‌ی قطر فشاری است و پس از ضعیف‌شدن قطر فشاری به‌دلیل عملکرد خوب ملات نه فقط دیوار فرو نریخته است، بلکه در اطراف قطر فشاری، قطرهایی مجازی

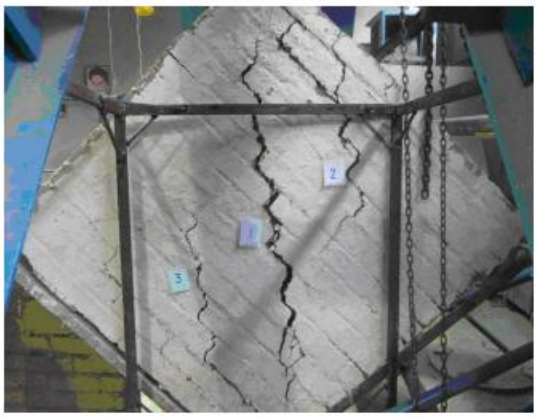
شکل ۱۳. ترک‌های ایجادشده در دیوار خشتی با ملات ساده پس از آزمایش کشش قطری.



شکل ۱۴. ترک‌های ایجادشده در دیوار خشتی با ملات مسلح‌شده با ۰/۸٪ کاه پس از آزمایش کشش قطری.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۵. ترک‌های ایجادشده در دیوار خشتی با ملات مسلح‌شده با ۰٫۸٪ کاه پس از آزمایش کشش قطری به ترتیب ایجاد ترک.

نیز تا حدی تحمل بار کرده‌اند. ترک‌های ایجادشده در دیوارهای مسلح تا حدودی متقارن بوده‌اند، که در شکل ۱۵ برای دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰٫۸٪ کاه نشان داده شده است.

ترک‌های ایجادشده در دیوارهای معمولی متقارن نیستند و در سمتی رخ داده‌اند که هنگام ساخت دیوار، رج‌های بالایی دیوارها بوده‌اند، که این نشان‌دهنده‌ی این است که کاه در ملات به‌دلیل فاصله‌انداختن در بین ملات، رج‌های مساوی‌تر و یکنواخت‌تری را باعث شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بعد از انجام ۱۲ آزمایش بر روی رفتار دو نوع دیوار خشتی با استفاده از ملات ساده و ملات کاه‌گل تحت بار فشاری قطری بررسی شده است. ابعاد دیوار ۲۲ × ۱۲۰ × ۱۲۰ cm است، که نسبت طول به عرض دیوار نیز برابر ۱ است. در دیوارهای با ملات معمولی این موارد رخ داده است:

- پس از خشک‌شدن ملات، ترک‌هایی به علت تبخیر آب و انقباض خاک بر روی ملات ایجاد شده است.
- در اثر بارگذاری دیوار، خرابی و شکست دیوار در مرز بین آجرهای خشتی و ملات مشاهده شده است، که نشان‌دهنده‌ی این است که یکی از ضعف‌های دیوارهای خشتی در محل اتصال بلوک‌های خشتی با ملات است.
- میانگین تنش کششی دیوار معمولی ۰٫۰۴۳ MPa به‌دست آمده است.

در دیوارهای با ملات مسلح‌شده با کاه، این موارد رخ داده است:

- پس از خشک‌شدن، ترک‌های بسیار کمتری از دیوار معمولی مشاهده شده و در صورت وجود نیز بسیار ریزتر بوده است.
- در هنگام بارگذاری به‌جای یک ترک عمیق چند ترک به‌وجود آمده است.
- تغییرمکان بیشینه، نیروی بیشینه و تغییرمکان نهایی برای همه‌ی نمونه‌های با ملات مسلح‌شده با کاه بیشتر از دیوار معمولی بوده است.
- در دیوارهایی که ملات آن با کاه مسلح شده بود، بعد از شکست دیوار، ملات داخل دیوار ترک‌های کمتری داشته است، که یکی از دلایل آن وجود کاه در ملات است، که با جذب آب و پس‌دادن آن به ملات به‌صورت تدریجی مانند یک عایق عمل کرده و مانع از انقباض ملات شده است. با یک‌پارچه‌شدن ملات مسلح به علت کاهش ترک‌ها باعث عملکرد بهتری در ملات شده است.
- افزودن کاه تا ۰٫۸٪ در ملات باعث بهبود خواص مکانیکی ملات و در نتیجه دیوار شده است، ولی با افزودن بیشتر کاه افزایشی مشاهده نشده است، بلکه در برخی موارد کاهش نیز اتفاق افتاده است.
- دیوارهای مسلح بین ۱۱٫۴۵ تا ۲۶٫۷۸ درصد نسبت به دیوار با ملات معمولی نیروی بیشتری را تحمل کرده‌اند.
- تنش کششی دیوار با ملات مسلح‌شده با ۰٫۸٪ کاه، ۲۱٫۰۵ کیلونیوتن به‌دست آمده است، که ۲۷٪ بیشتر از دیوار با ملات معمولی نیرو وارد شده است.

در نتیجه می‌توان با استفاده از کاه در ملات دیوار خشتی باعث بهبود خواص مکانیکی آن شد و حتی در صورت داشتن امکانات آزمایشگاهی با توجه به خاک منطقه، بهترین درصد کاه را نیز برای آن خاک تعیین کرد.

منابع (References)

1. Mirgzar Langroodi, M.M., Mirgzar Langroodi, S.S. and Rajabi Kanaf Gurabi, A. "Resistant of adobe building against earthquake", *The National Conference on Retrofitting of Iran*, Yazd, Yazd University (2008).
2. Turanli, L. and Erdogan, T.Y. "Improving the mechanical properties of adobe blocks used in low-cost rural housing", 14th IAHS World Housing Congress, Ankara, Turkey (1996).
3. Revuelta-Acosta, J.D., Garcia-Diaz, A., Soto-Zarazua, G.M. and Rico-Garcia, E. "Adobe as a sustainable material: A thermal performance", *J. Appl. Sci.*, **10**(19), pp. 2211-2216 (2010).
4. Binici, H., Aksogan, O., Bakbak, D., Kaplan, H. and Isik, B. "Sound insulation of fiber reinforced mud brick walls", *Construct Build Materials*, **23**(2), pp. 1035-1041 (2009).
5. Tolles, E.L. and Krawinkler, H., *Seismic Studies on Small-Scale Models on Adobe Houses*, Stanford, The John A. Blume Earthquake Engineering Center (1990).
6. Blondet, M., Garcia, G.V. and Brzev, S., *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*, EERI (Earthquake Engineering Research Institute), IAEE World Housing Encyclopedia, (2003). www.worldhousing.net,
7. Turanli, L. and Saritas, A. "Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster rein-

www.SID.ir

Archive of SID

forcement mesh", *Construction and Building Materials*, **25**(4), pp. 1747–1752 (2011).

8. Vatani Oskouei, A., Afzali, M. and Madadipour, M.R. "Effect of lime and rice husk ash stabilization and compaction on mud brick reinforced with synthetic fibers", Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Poland, ISSN 0860-2395, ISBN 978-83-7125-216-7 (2012).
9. Vatani Oskouei, A., Afzali, M. and Madadipour, M.R. "Effect of some natural additives on the mechanical properties of mud brick", Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Poland, ISBN 978-83-7125-216-7 (2012).
10. Vatani Oskouei, A., Madadipour, M.R. and Afzali, M. "Effect of some synthetic fibers on the mechanical properties of mud brick", Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Poland, ISBN 978-83-7125-216-7 (2012).
11. Yetgin, S., Cavdar, O. and Cavdar, A. "The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes", *Construct Build Materials*, **22**(3), pp. 222-227 (2008).
12. Gomes, I.M., Lopes, M. and de Brito, J. "Seismic resistance of earth construction in Portugal", *Engineering Structures*, **33**(3), pp. 932-941 (2010).
13. Dowling, D. "Improved adobe mudbrick in application - child- care center construction in El Salvador", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada (March 2003).
14. Shedid, M.T., Drysdale, R.G. and El-Dakhakhni, W.W. "Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure: Experimental results", *Journal of Structural Engineering*, **134**(11), pp. 1754-1767 (2008).
15. Dehghan Banadaki, A., Ghannad, M.A., Bakhshi, A. and Lotfalipour, M. "A numerical study on seismic behavior of a typical rural house of Iran", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China (12-17 October 2008).
16. Zomarshidy, H., *Iranian Architecture Building with Traditional Materials*, Zomar Publications, Tehran, 80 p. (2006).
17. Maniatidis, V. and Walker P. *A Review of Rammed Earth Construction, for DTi Partners in Innovation Project, Developing Rammed Earth for UK Housing*, Natural Building Technology Group Department of Architecture & Civil Engineering University of Bath (2003).
18. ASTM, *Standard Test Method for Field Determination of Apparent Specific Gravity of Rock and Manmade Materials for Erosion Control*, ASTM D420-D5779, Vole. **04.08**, March Soil and Rock, PA, USA (2003).
19. ASTM, *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*, ASTM C566-97, West Conshohocken, PA, USA (1997).
20. Tayefi Nasrabadi, A.A. and Rashidi Mehrabad, M.H. "Methods of retrofitting brick masonry structures against earthquakes", *Journal of Civil Engineering*, Islamic Azad University, **1**(2), pp.58-70, Iran (2008).
21. O'Dogherty, M.J. "A review of research on forage chopping", *J. Agric. Eng. Res.*, **27**(4), pp. 267-289 (1981).
22. O'Dogherty, M.J., Hubert, J.A., Dyson, J. and Marshall, C.J. "A study of the physical and mechanical properties of wheat straw", *J. Agric. Eng. Res.*, **62**(2), pp. 133-142 (1995).
23. Nazari, M., Jafari, A., Tabatabaifar, A., Sharifi Malvajerd, A. and Tavakoli, H. "The effect of moisture content, fast loading and high areas on the tensile strength of alfalfa", *5th National Conference on Agricultural Machinery Engineering*, Mechanisation Ferdowsi University of Mashhad (2008).
24. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, *Clay Brick - Specification and Test Methods*, ISIRI7, 4th Revision, Tehran, Iran (2009).
25. ASTM, *American Standard Testing Material*, ASTM Standards on Masonry, Third Edition (1997).
26. ASTM, *Standard Test Method for Bond Strength of Mortar to Masonry Units*, ASTM C952-02, Vole. **04.01** (2003).
27. Quintilio, P., Quagliarini, E. and Lenci, S. "Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks", *Construction and Building Materials*, **25**(4), pp. 2067-2075 (2011).
28. Standard American Society for Testing and Materials, *Standard test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*, ASTM E519, USA (1999).
29. Yetimoglu, T. and Salbas, O. "A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers", *Geotextiles and Geomembranes*, **21**(2), pp. 103-110 (2002).
30. Aymerich, F., Fenu, L. and Meloni, P. "Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material", *Construction and Building Materials*, **27**(1), pp. 66-72 (2011).

www.SID.ir