

بررسی آزمایشگاهی دیوار خشتی با ملات مسلح شده با کاه تحت کشش قطری

اصغر وطنی اسکویی* (دانشیار)

محمد افزلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمدرضا مددی پور (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

علی بخشی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

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

در این نوشتار عملکرد آزمایشگاهی دیوار خشتی با درصدهای مختلف الیاف کاه در ملات تحت بار استاتیکی قطری مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد ۱۲ عدد دیوار با انواع مختلف ملات (ملات معمولی، ملات مسلح شده با درصدهای وزنی: ۰/۴٪، ۰/۶٪، ۰/۸٪، ۱٪، ۱/۲٪ الیاف کاه) با خشت غیرمسلح در ابعاد $22 \times 12 \times 12$ سانتی متر ساخته شده اند. دیوارها تحت بار فشاری قطری بارگذاری شده اند تا نوع ترک ها، نیروی نهایی، تغییر شکل نهایی، و جذب انرژی آن ها به دست آید. در دیوارهای با ملات مسلح شده با ۰/۸٪ کاه، مقدار نیرو به اندازه ۲۶/۷۸٪ و جذب انرژی دیوارهای مذکور به اندازه ۹۴/۲۲٪ بیشتر از دیوارهای با ملات ساده و غیرمسلح بوده است. نتایج نشان داده اند که می توان از افزودنی کاه به عنوان تسلیح کننده 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 زلزله هایی که در چند سال اخیر در ایران و سایر نقاط جهان رخ داده است، ساختمان های خشتی خسارت جانی و مالی زیادی داشته است. نبود آیین نامه و استاندارد برای طراحی ساختمان های خشتی از جمله موارد دیگری است که نیاز به مطالعه دیوارهای خشتی جهت بررسی رفتار این دیوارها را دو چندان می کند. عمده ساختمان های واقع در مناطق روستایی ایران را ساختمان های خشتی و گلی تشکیل می دهند، که به دلایل: سقف سنگین و متعاقب آن افزایش شتاب زلزله، عدم یک پارچگی کافی سقف با دیوارها، و نامشخص بودن اتصال اجزاء سازه ای به یکدیگر، و مقاومت ناکافی ملات این گونه ساختمان ها را عموماً با خسارت های جدی مواجه کرده است. همچنین نامشخص بودن اجزاء سازه ای و نوع مصالح مصرف شده از یک سو و عدم تطابق ساختمان های موجود با مدل های کلاسیک سازه ای نظیر قاب های گیردار و غیره از سوی دیگر، تخمین مقاومت لرزه ای این ساختمان ها را بسیار دشوار می کند. براساس آمار، ۷۰٪ از واحدهای مسکونی موجود در کشور بی دوام، و کم دوام هستند که در هنگام زلزله، ساکنان ساختمان حتی مهلتی برای فرار و خارج شدن از ساختمان را نیز به دست نمی آورند.^[۱]

ساخت و سازهای خشتی و گلی در نقاط مختلف دنیا و از جمله در کشور ما، ایران، به دلایل مزایای زیاد آن رواج بسیاری دارد. سازگاری مناسب، اقتصادی بودن و سهولت و سرعت در تهیه، از جمله ویژگی های مثبت این نوع مصالح محسوب می شود، که به دلیل مسائل اقتصادی، هم اکنون نیز ساخت و ساز غالب بسیاری از نقاط کشور، از نوع خشتی و گلی است. اما مسئله مهمی که در ارتباط با این ساختمان ها به چشم می خورد، عدم طراحی بسیاری از آن ها برای مقابله با بارهای لرزه ای است. زلزله های اخیر نشان داده است که به طور کلی سازه های بنایی غیرمسلح در برابر بارهای لرزه ای آسیب پذیرند و نیاز به بهسازی دارند.^[۱]

اصلی ترین دلایل برای استفاده از خشت را می توان در این موارد خلاصه کرد:^[۱]

الف) ماده ای که در همه جا در دسترس است؛ ب) برای تولید خشت و سازه های خشتی، مهارت و تکنولوژی بالایی مورد نیاز نیست؛ پ) تعمیر و نگهداری سازه های خشتی، نیاز به آزمایشگاه خاصی ندارد؛ ت) خواص ذاتی خاک، آن را عایق صدا و گرما می سازد.^[۲] علاوه بر موارد فوق، عدم دسترسی به مصالح نوین و اقتصاد خانواده در نقاط دوردست باعث شده است هنوز در نقاط زیادی، استفاده از این گونه مصالح رایج باشد.

مقاومت جانبی یک سازه ی خشتی از رفتار برشی درون - صفحه ای دیوارهای خشتی به دست می آید. علاوه بر این، رفتار سازه های خشتی به صورت برون - صفحه ای از نوع خمشی است.^[۳] در مناطق با لرزه خیزی زیاد، فقدان سختی درون - صفحه و برون - صفحه ای دیوارهای خشتی خطر بزرگی برای ساکنان است.^[۴] از آنجایی که سازه های خشتی مقاومت و شکل پذیری کافی ندارند، پایداری یک سازه ی خشتی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۳/۱۲/۲۵

است علاوه بر هنگام ساخت، در بهسازی و مقاوم سازی دیوارهای خشتی نیز از ملات با کاه استفاده شود.

۲. روش آزمایش

۱.۱.۲. مصالح

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

در خشت، سنگ دانه (شن و ماسه) نقش پرکننده و جلوگیری از انقباض و ترک خوردن خشت را دارد و از آب برای روان کردن و مخلوط کردن مواد با یکدیگر استفاده می شود.

۱.۱.۲. خاک رس

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

تحقیقات هوبن، حد روانی خاک تثبیت نشده 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 دانسته اند.^[۱۷]

۲.۱.۲. سنگ دانه

سنگ دانه ای استفاده شده 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 آزمایش های سنگ دانه استفاده شده است.^[۱۹]

۳.۱.۲. کاه

مشخصات کاه مورد استفاده در ملات در جدول ۳ ارائه شده است. وجود کاه باعث اتصال دانه های خاک به یکدیگر شده است، در واقع همانند آرماتور در بتن، دانه های رس و ماسه را به هم نگه داشته است و مانع از ترک خوردن آن ها می شود.^[۲۰] برای انجام آزمایش کشش کاه، مستقیماً الیاف در زیر دستگاه کششی قرار داده شده اند.

معمولی و بدون تقویت بعد از یک زلزله ی شدید ممکن نیست.^[۷] بنابراین افزایش مقاومت مناسب، یک پارچگی، و اتلاف انرژی در دیوارهای خشتی، یک مسئله ی بحرانی تحت بارهای شدید لرزه یی شده است.

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

آئین نامه ی نیوزلند (NZ ۴۲۹۷)، مدول یانگ $E = ۲۰۰ \text{ MPa}$ ، نسبت پواسون $\nu = ۰/۳۵$ ، و بیشینه ی تنش فشاری $\sigma_c = E/۳۰۰$ را توصیه کرده است. براساس مطالعات واریوم و همکاران، بیشینه ی تنش کششی را می توان ۲٪ مقاومت فشاری در نظر گرفت و برای تنش برشی مجاز نیز فرمول های ۱ و ۲ را توصیه کرده اند:^[۱۲]

$$\tau = ۰/۷ \times \sigma_c \quad (۱)$$

$$\tau = ۷۰ + ۵ \times H \text{ (kPa)} \quad (۲)$$

که در آن ها، H نشان دهنده ی 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 - صفحه و برون - صفحه شده است.^[۶] در پژوهش دیگری (۲۰۰۳) نیز برای بهسازی دیوار از تور در بین ملات گوشه های 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 به عنوان تقویت کننده به خاک اضافه شده اند، خواص مهندسی خاک را بهبود بخشیده اند.^[۱۴، ۱۵] قدیمی ترین مثال از کامپوزیت ها مربوط به افزودن کاه به گل جهت تقویت گل و ساخت آجرهای مقاوم جهت استفاده در بناها بوده است. قدمت این کار به ۴۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح باز می گردد. در این مورد کاه نقش تقویت کننده و گل نقش زمینه یا ماتریس را دارد. ارگ بم، که شاهرکار معماری ایرانیان بوده است، نمونه ی بارزی از استفاده از تکنولوژی کامپوزیت ها 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 حفره های خاک را به میزان کمیته رساند. خاک بدون حفره از لحاظ تئوری خاکی با ذرات کره یی شکل است، که درصد آن ها تابع فرمول فولر (رابطه ی ۳) باشد:^[۱۷]

$$p = ۱۰۰ (d/D)^n \quad (۳)$$

که در آن، p نسبت دانه به قطر، d قطر دانه برای یک مقدار معین از p، D بزرگ ترین قطر دانه، و n ضریب درجه بندی است. وقتی که دانه ها کاملاً گروی باشند، مقدار n برابر ۰/۵ است.

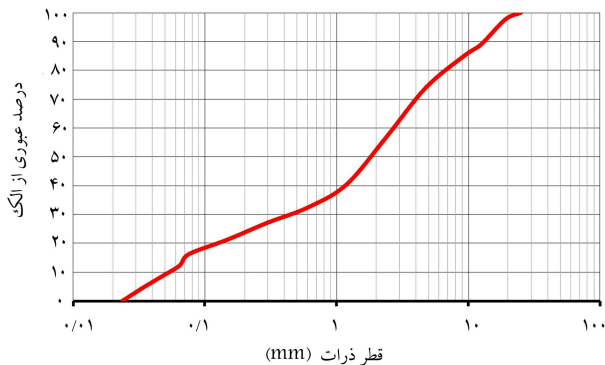
مکانیزم های مختلفی برای شکست دیوارهای خشتی وجود دارد. یکی از ضعف های دیوارهای مصالح بنایی و دیوارهای خشتی در برابر بارهای جانبی، ملات آن است. در این نوشتار سعی شده است که مقایسه یی بین رفتار ملات گل و کاه گل که به صورت متداول در ایران و کشورهای دیگر استفاده می شود، بررسی شود. بدین منظور رفتار دیوارهای خشتی با دو نوع ملات تحت فشار قطری مورد بررسی قرار گرفته است. در یکی از ملات ها از خاک رس و ماسه و در ملات دیگر علاوه بر مصالح نام برده شده، از درصد های مختلفی از کاه (که ماده یی طبیعی، ارزان، سازگار با محیط زیست و در دسترس) نیز به عنوان تقویت کننده ی ملات استفاده شده است. با توجه به اینکه در ساختمان های خشتی، آسیب عمده در ملات رخ داده، لازم

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
نشانه ی خمیری (PI)	%	۱۲/۰۶
نشانه ی روانی (LI)	%	-۱/۱۰
نشانه ی غلظت (CI)	%	۲/۱۰

جدول ۴. درصد مصالح استفاده شده در خشت.

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



شکل ۲. نمودار دانه بندی مصالح مورد استفاده در خشت.

۲.۲. مشخصات خشت

برای رعایت اصول دیوار چینی از خشت (۲۲ × ۲۲ × ۷ cm) و نیم خشت (۲۲ × ۱۱ × ۷ cm) استفاده شده است. درصدهای مصالح استفاده شده برای ساخت خشت در جدول ۴ ارائه شده است. نمودار دانه بندی مصالح مورد استفاده در خشت، در شکل ۲ نشان داده شده است.

مقاومت فشاری هر یک از خشت ها تحت آزمایش فشاری با استفاده از نیروسنج و تغییر مکان سنج اندازه گیری شده است. برای بارگذاری از استاندارد شماره 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] عدد از هر کدام از ابعاد خشت و نیم خشت مورد آزمایش قرار گرفته اند. مقاومت فشاری متوسط نمونه های با ابعاد ۲۲ × ۲۲ × ۷ cm (خشت)، برابر با ۴٫۳۷ مگاپاسکال و مقاومت فشاری متوسط نمونه های با ابعاد ۲۲ × ۱۱ × ۷ cm (نیم خشت)، برابر با ۳٫۲۹ مگاپاسکال تعیین شده است. نتایج مقاومت فشاری نمونه های آزمایش شده برای مقاومت فشاری نیم خشت و خشت به ترتیب با ابعاد ۲۲ × ۱۱ × ۷ سانتی متر و ۲۲ × ۲۲ × ۷ سانتی متر در جدول های ۵ الف و ۵ ب نمایش داده شده است. مقاومت فشاری خشت های با ابعاد ۲۲ × ۱۱ × ۷ سانتی متر، کمتر از مقاومت فشاری خشت های با ابعاد ۲۲ × ۲۲ × ۷ سانتی متر است، که یکی از دلایل آن سطح توزیع تنش کمتر و متفاوت بودن شکل مستطیلی نمونه های نیم خشت و شکل مربعی نمونه های خشتی است. انحراف معیار و خطا در آزمایش فشاری برای نمونه های نیم خشت به ترتیب ۰٫۵۷ و ۰٫۲۵ و برای نمونه های خشتی به ترتیب ۰٫۵۸ و ۰٫۲۷ به دست آمده است.

۳.۲. مشخصات ملات

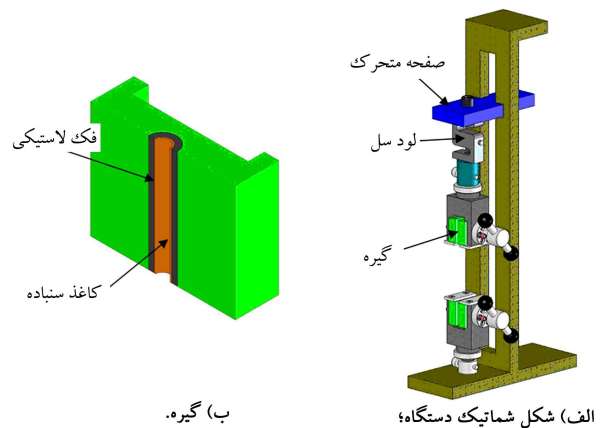
برای ساختن ملات گِل، آخوره می بندند و در آن آب می اندازند و صبر می کنند تا پولک های خاک رس آب را بکنند، پس از آن ملات را خوب ورز می دهند و به مصرف می رسانند. چون ملات گِل پس از خشک شدن جمع می شود و ترک می خورد، به آن کاه می زنند، که آن را مسلح می کند و از ترک خوردن آن جلوگیری می کند. ۶ نوع

جدول ۲. مشخصات سنگ دانه.

پارامتر	واحد	نوع سنگ دانه
W_d	(gr)	شن ۴۹۳٫۶۶
W_{SSD}	(gr)	ماسه ۴۹۴٫۴۴
V_S	(C.C)	۲۷۰
G_S		۲٫۴۷
$WSSD$	%	۳٫۶۶

جدول ۳. مشخصات کاه.

پارامتر	واحد	مقدار
طول	(mm)	۱۰ - ۴۰
قطر	(mm)	۱ - ۴
وزن مخصوص	(KN/m ^۳)	۰٫۱۲
مقاومت کششی	(MPa)	۳۸ - ۵۰
دانسیته		۲٫۰۵



شکل ۱. دستگاه اندازه گیری استحکام کششی.

از دستگاه کششی که مقاومت کششی الیاف را در صنایع چوب اندازه گیری می کنند، استفاده شده و برای آماده سازی نمونه و قرار دادن نمونه در زیر دستگاه در دو طرف کاه، که در زیر فک دستگاه قرار می گیرد، دو عدد چوب به اندازه ی فک دستگاه بریده شده است، که کاه بین دو عدد چوب با چسب چوب قرار گیرد و از زیر گیره های دستگاه سر نخورد. اندازه گیری استحکام کششی در یک ماشین آزمون مواد در محدوده ی کرنشی نسبتاً پایینی صورت گرفته است. روش های به کاررفته در این پژوهش مشابه روش هایی است که در مطالعات پیشین استفاده شده است.^[۲۱، ۲۲] به دلیل طبیعت شکننده ی ساقه های علوفه، اندازه گیری استحکام کششی آنها کار مشکلی است، زیرا این امر باعث گسیختگی دو انتهای نمونه در داخل گیره ها هنگام اعمال نیرو می شود.^[۲۳]

یک دستگاه مکانیکی شامل دو گیره، طراحی و ساخته شده است. گیره ها توانایی ثابت نگه داشتن ساقه را دارند و شامل فک لاستیکی و کاغذ سمباده هستند، که کاغذ سمباده بین ساقه و فک لاستیکی قرار می گیرد (شکل ۱). نمونه بعد از قرار داده شدن بین گیره ها با استفاده از یک دستگاه آزمون فشار - کشش اختصاصی تحت کشش قرار می گیرد.^[۲۳]

جدول ۵ الف) مقاومت فشاری نیم خشت.

ردیف	A (mm ²)	F (KN)	P = F/A (MPa)
۱	۲۴۴۲۰	۷۰٫۴	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 ۵ ب) مقاومت فشاری خشت.

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

جدول ۶. درصد وزنی مصالح استفاده شده در ملات.

نوع ملات	رس (%)	ماسه (%)	آب (%)	کاه (%)
معمولی	۶۴٫۵	۱۶٫۱	۱۹٫۴	--
۰٫۴	۶۴٫۲۴	۱۶٫۰۴	۱۹٫۳۲	۰٫۴
۰٫۶	۶۴٫۱۱	۱۶٫۰۰	۱۹٫۲۸	۰٫۶
مسلح شده 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

جدول ۷. نتایج مقاومت فشاری میانگین انواع ملات.

نوع ملات	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	انحراف معیار	خطا
معمولی	۳٫۰۸	۰٫۲۲	۰٫۰۳
۰٫۴ کاه	۲٫۶۲	۰٫۲۷	۰٫۰۵
۰٫۶ کاه	۲٫۲۶	۰٫۱۵	۰٫۰۲
مسلح شده با 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	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	انحراف معیار	خطا
معمولی	۱٫۷۳	۰٫۱۳	۰٫۰۱
۰٫۴ کاه	۱٫۱۱	۰٫۱۸	۰٫۰۲
۰٫۶ کاه	۰٫۹۷	۰٫۱۱	۰٫۰۰۸
مسلح شده با 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 استفاده شده در هر دو نوع دیوار یکسان بوده است. نمونه‌ی دیوارهای خمشی ساخته شده بعد از ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته است. برای جلوگیری از آسیب دیدن نمونه‌ها قبل از آزمایش، نمونه‌ها در نزدیکی محل آزمایش ساخته شده و اطراف دیوارها چوب قرار داده شده، سپس درون قاب فلزی پیچ و مهره‌بی 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]

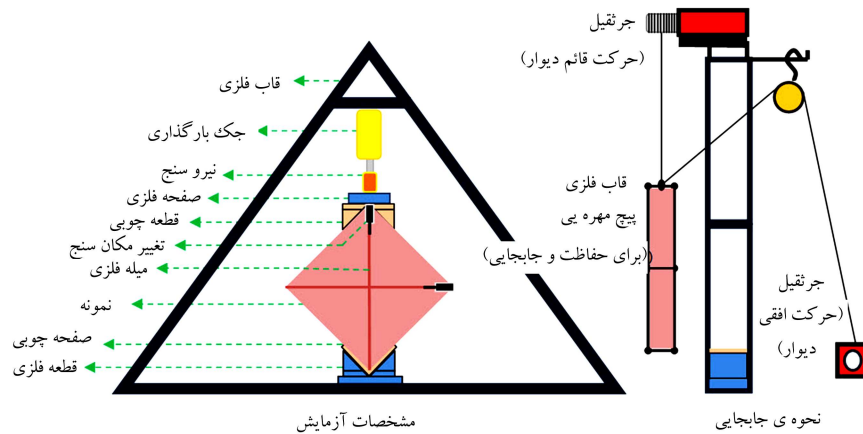
برای توزیع بهتر نیروی فشاری و خردنشدن گوشه‌ها تحت بار متمرکز، در قسمت بالا و پایین دیوار، قطعات چوبی قرار داده شده است. [۷] سپس در بالای دیوار و در زیر جک هیدرولیکی، نیروسنج قرار داده شده است. برای اندازه‌گیری تغییر مکان دیوار در دو راستای قطر، تغییر مکان سنج نصب شده است. شکل‌های ۳ و ۴ مشخصات دیوار را قبل از شروع آزمایش نشان می‌دهند. تمامی دیوارها در شرایط یکسانی بارگذاری شده‌اند. سرعت بارگذاری در تمامی آزمایش‌های یکسان بوده است.

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.

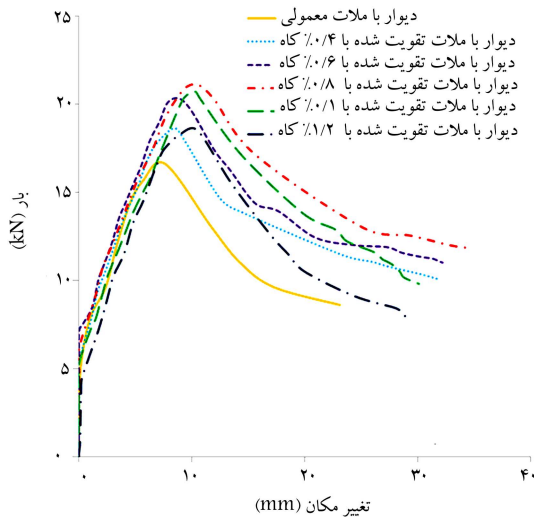
الیاف کاه اشباع سطح خشک به ترکیب اضافه شده‌اند. و از استاندارد ASTM C952 برای انجام این آزمایش استفاده شده است. [۲۶]

ملات‌های ساخت شده 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 مورد نظر 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 ساخته شده در قالب‌های 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 مورد نظر 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.



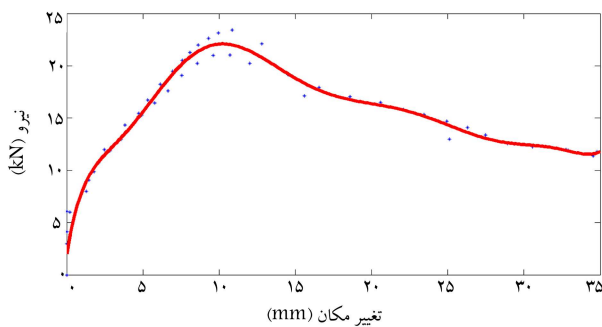
مشخصات آزمایش
شکل ۳. جزئیات انجام آزمایش.



شکل ۵. میانگین نمودار بار - تغییر مکان دیوارهای خشتی.



شکل ۴. آماده سازی دیوار قبل از آزمون.



شکل ۶. نمودار دیوار تقویت شده با ۰/۸ کاه.

نمودار جذب انرژی - تغییر مکان دیوارهای خشتی، که جذب انرژی به عنوان تابعی از تغییر مکان است، در شکل ۷ نمایش داده شده است. در شکل ۸، نمودار مقایسه‌ی 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 $268/16 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ و دیوار خشتی با ملات کاهگل برابر $520/82 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ بوده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، جذب انرژی دیوارهای مسلح شده با ملات کاهگل بیشتر از دیوارهای

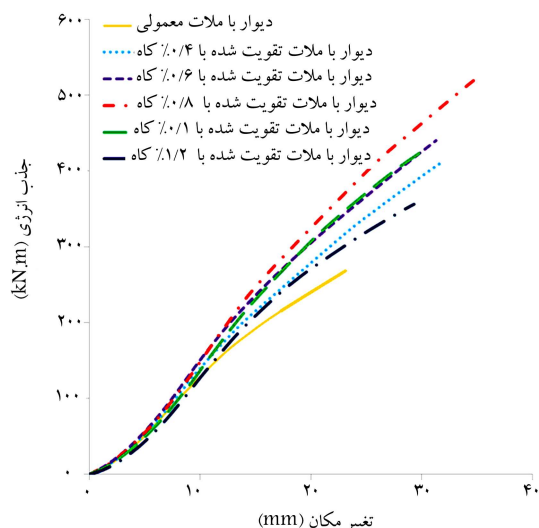
۴. مقایسه‌ی نتایج

منحنی بار - تغییر مکان به صورت میانگین برای دیوارهای خشتی در شکل ۵ نشان داده شده است. برای به دست آوردن نمودار دیوارها، از درون‌یابی خطی داده‌های دیوارها توسط نرم‌افزار متلب استفاده شده است. از داده‌های هر دو دیوار آزمایش شده، برای رسم نمودار دیوار مورد نظر استفاده شده است. در شکل ۶، نمودار به دست آمده از درون‌یابی خطی برای دیوار با ملات تقویت شده با ۰/۸ کاه نمایش داده شده است.

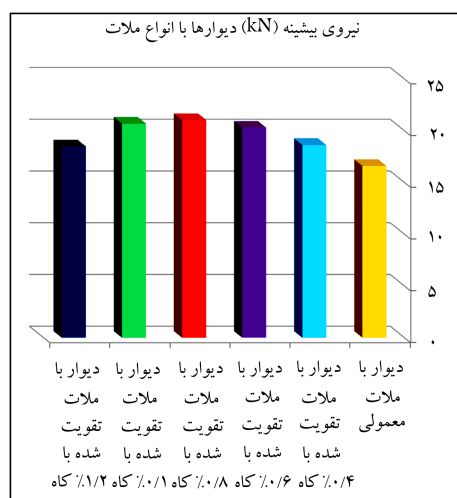
مقدار بار بیشینه‌ی دیوار خشتی با ملات ساده و ملات کاهگل با ۰/۸٪ به ترتیب برابر با $16/6 \text{ kN}$ و $21/5 \text{ kN}$ بوده است. با توجه به نیروی بیشینه‌ی دیوار خشتی ساده و ملات کاهگل مشاهده می‌شود که دیوار با ملات کاهگل به اندازه‌ی $26/78\%$ نیروی بیشتری نسبت به دیوار ساده تحمل کرده است. در نمونه‌های تقویت شده با الیاف، آفت پس از نقطه‌ی اوج کمتر است و رفتار شکننده‌ی شن و ماسه تا حدودی انعطاف پذیرتر شده است، در پژوهشی در سال 2002 [۲۹] نیز این نکته مورد توجه قرار گرفته است. عملکرد خوب الیاف در زمانی است که ترک‌ها بزرگ می‌شوند و الیاف از نمونه بیرون می‌زنند و مانند پلی دو قطعه‌ی نمونه را به یکدیگر متصل نگه می‌دارد. [۳۰]

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

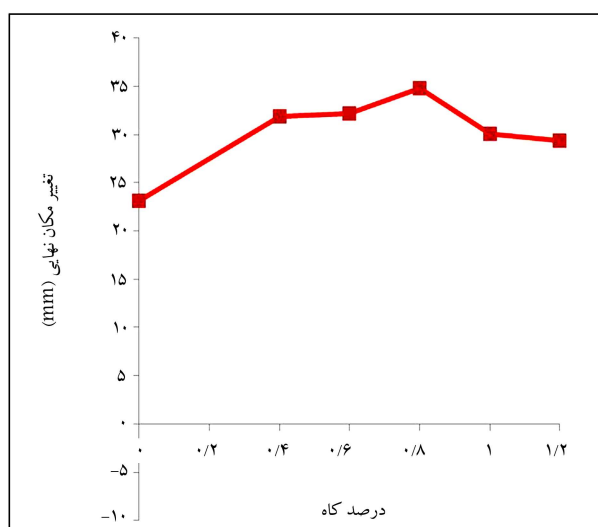
نمونه	تغییر مکان نیروی بیشینه (mm)	نیروی بیشینه (KN)
دیوار با ملات معمولی	۷٫۶۵	۱۶٫۶
دیوار با ملات مسلح شده با ۰٫۴٪ کاه	۸٫۴۷	۱۸٫۶۳
دیوار با ملات مسلح شده با ۰٫۶٪ کاه	۸٫۹۲	۲۰٫۳
دیوار با ملات مسلح شده با ۰٫۸٪ کاه	۱۰٫۷	۲۱٫۰۵
دیوار با ملات مسلح شده با ۱٪ کاه	۱۰٫۳۲	۲۰٫۷
دیوار با ملات مسلح شده با ۱٫۲٪ کاه	۱۰٫۵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



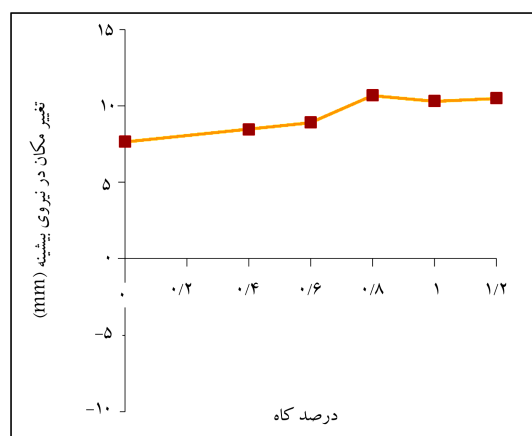
شکل ۷. نمودار جذب انرژی - تغییر مکان دیوارهای خشتی.



شکل ۸. نمودار مقایسه‌ی نیروی بیشینه‌ی دیوارهای خشتی.



شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان در نیروی بیشینه (mm) در درصد کاه.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ی تغییر مکان 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	۰٫۴۳
دیوار با ملات مسلح شده با ۰٫۴٪ کاه	۲۱۹۸٫۲	۳٫۷۶	۰٫۵۵
دیوار با ملات مسلح شده با ۰٫۶٪ کاه	۲۲۷۶٫۲۳	۳٫۶۱	۰٫۵۷
دیوار با ملات مسلح شده با ۰٫۸٪ کاه	۱۹۶۶٫۰۹	۳٫۲۵	۰٫۵۹
دیوار با ملات مسلح شده با ۱٪ کاه	۲۰۰۵٫۸۱	۲٫۹۲	۰٫۵۸
دیوار با ملات مسلح شده با ۱٫۲٪ کاه	۱۷۶۱٫۹	۲٫۷۹	۰٫۵۵

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 ملاحظه‌ی 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 جذب شده‌ی نمونه‌های با الیاف بهبود یافته است، که این نتایج با تحقیقات قبلی^[۹] نیز همخوانی دارد.

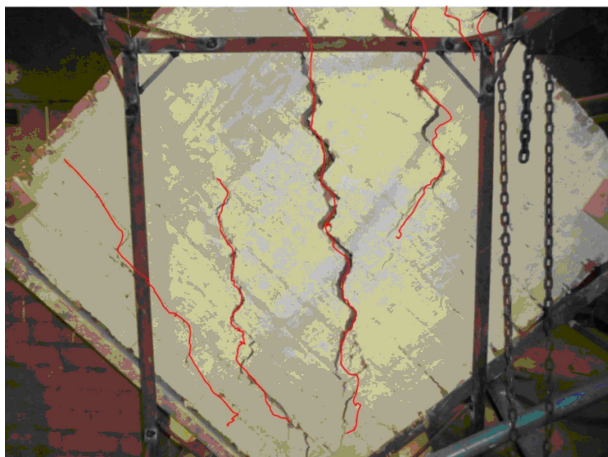
در جدول ۹، میانگین نتایج دیوار خشتی با گل و کاه‌گل نمایش داده شده است. در شکل ۹، نیروی بیشینه‌ی که دیوارهای خشتی تحمل کرده‌اند، با هم مقایسه شده است. مطابق شکل مذکور، دیوارهای با ملات مسلح شده با کاه، نیروی بیشتری نسبت به دیوار معمولی تحمل کرده‌اند. دیوارهای مسلح بین ۱۱٫۴۵ تا ۲۶٫۷۸ درصد نسبت به دیوار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

همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، رفتار هر دو دیوار در قسمت کشسان یکسان است. بنابر قانون موهر - 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 همان‌طور که در نتایج مشخص شده است، افزودنی کاه در نمودارها تا قسمتی باعث افزایش نیروی بیشینه، تغییر مکان بیشینه، تغییر مکان 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 یک پارچه تر شدن ملات و مسلح شدن آن شده است، ولی با افزودن بیشتر با نقش تداخل در اصطکاک ماسه و چسبندگی رس، باعث کاهش خواص مکانیکی شده است.

همان‌طور که 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 ناحیه قطر فشاری است و پس از ضعیف شدن قطر فشاری به دلیل عملکرد خوب ملات نه فقط دیوار فرو نریخته است، بلکه در اطراف قطر فشاری، قطرهایی مجازی



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



شکل ۱۴. ترک‌های ایجاد شده در دیوار خشتی با ملات مسلح شده با ۰/۸٪ کاه پس از آزمایش کشش قطری.

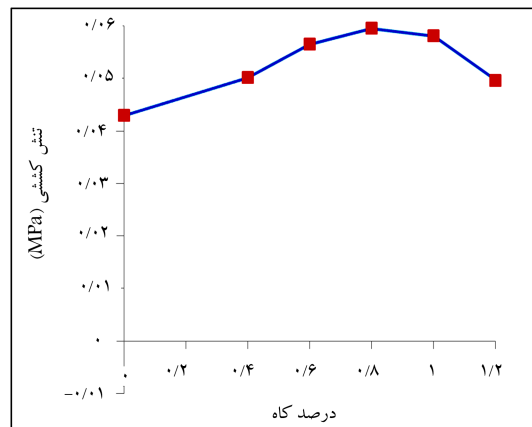
در شکل ۱۱، تنش کششی دیوارهای آزمایش شده نمایش داده شده است. با مقایسه دیوارها مشاهده می‌شود که دیوار با ۰/۸٪ کاه بیشترین مقدار تنش کششی را در بین دیوارهای آزمایش شده تحمل کرده است.

پس از شکست دیوارها، ملات دیوارها با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ملات معمولی ترد است و پس از شکست، از روی بلوک جدا و به ذراتی ریزتر از ۲ تا ۸ سانتی‌متر تبدیل شده است؛ اما در ملات‌های کاه‌گِل، ملات یک پارچه است و به راحتی از بلوک جدا نشده است، که این می‌تواند اولاً به دلیل نقش کاه در اتصال اجزاء ملات به یکدیگر و ثانیاً به دلیل خشک شدن متعادل تر و انقباض کمتر در خشک شدن ملات در دیوارهای با ملات مسلح باشد. در آزمایش کشش قطری در همه‌ی نمونه‌ها، شکست دیوار از ملات رخ داده است، که نشان دهنده‌ی 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 ایجاد شده در دیوار با ملات کاه‌گِل 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.

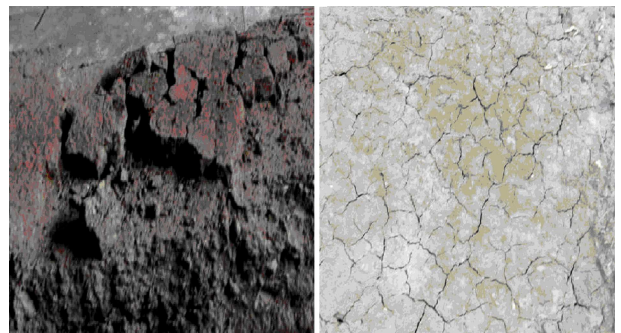
با توجه به آزمایش‌های انجام شده در نمونه‌های با ملات مسلح شده با لیاف کاه، این دو فرایند انجام شده است:

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

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



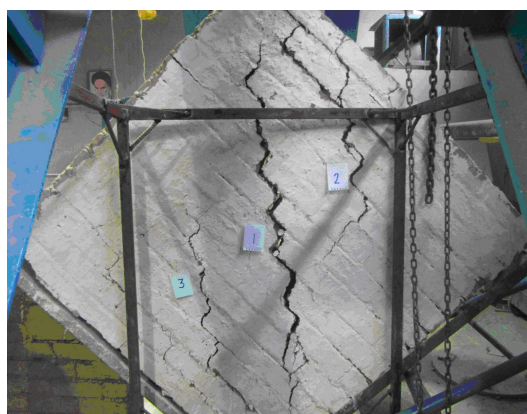
شکل ۱۱. تنش کشش دیوارهای خشتی.



ملات معمولی ملات کاه‌گِل

شکل ۱۲. مقایسه عملکرد ملات به کار رفته.

- پس از خشک شدن 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 نشان‌دهنده این است که یکی از ضعف‌های دیوارهای خشتی در محل اتصال بلوک‌های خشتی با ملات است.
- میانگین تنش کششی دیوار معمولی 0.43 MPa به دست آمده است. در دیوارهای با ملات مسلح شده با کاه، این موارد رخ داده است:
- پس از خشک شدن، ترک‌های بسیار کمتری از دیوار معمولی مشاهده شده و در صورت وجود نیز بسیار ریزتر بوده است.
- در هنگام بارگذاری به جای یک ترک عمیق چند ترک به وجود آمده است.
- تغییر مکان بیشینه، نیروی بیشینه و تغییر مکان نهایی برای همه‌ی نمونه‌های با ملات مسلح شده 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 پس دادن آن به ملات به صورت تدریجی مانند یک عایق عمل کرده و مانع از انقباض ملات شده است. با یک پارچه شدن ملات مسلح به علت کاهش ترک‌ها باعث عملکرد بهتری در ملات شده است.
- افزودن کاه تا 0.8% 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 11.45 تا 26.78 درصد نسبت به دیوار با ملات معمولی نیروی بیشتری را تحمل کرده‌اند.
- تنش کششی دیوار با ملات مسلح شده با کاه، 21.05 کیلو نیوتن به دست آمده است، که 27% 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.



شکل ۱۵. ترک‌های ایجاد شده در دیوار خشتی با ملات مسلح شده با 0.8% کاه پس از آزمایش کشش قطری به ترتیب ایجاد ترک.

نیز تا حدی تحمل بار کرده‌اند. ترک‌های ایجاد شده در دیوارهای مسلح تا حدودی متقارن بوده‌اند، که در شکل ۱۵ برای دیوار با ملات مسلح شده با 0.8% کاه نشان داده شده است.

ترک‌های ایجاد شده در دیوارهای معمولی متقارن نیستند و در سمتی رخ داده‌اند که هنگام ساخت دیوار، رج‌های بالایی دیوارها بوده‌اند، که این نشان‌دهنده این است که کاه در ملات به دلیل فاصله انداختن در بین ملات، رج‌های مساوی‌تر و یکپارختری 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 $22 \times 120 \times 120 \text{ cm}$ است، که نسبت طول به عرض دیوار نیز برابر ۱ است. در دیوارهای با ملات معمولی این موارد رخ داده است:

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-

- 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-Dakhkhni, 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 Malva-jerd, 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).