



## تأثیر تسلیح ملات بر عملکرد دیوارهای خشتی

اصغر وطنی اسکویی\*، محمد افضلی، محمدرضا مددی پور

دانشکده عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۹ بهمن ۱۳۹۳  
بازنگری: ۱ اردیبهشت ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۱۳ شهریور ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

خشت  
آزمایش بارگذاری جانبی  
لیف خرما  
توری فلزی  
توری پلیمری

**چکیده:** با توجه به سالنامه آماری درصد قابل توجهی از ساختمان‌های مسکونی در ایران مربوط به ساختمان‌های خشتی و سنتی می‌باشد. این ساختمان‌های کوتاه مرتبه به علت داشتن سیستم سازه‌ای سنتی قادر به تحمل بارهای جانبی ناشی از زلزله نیستند. در این مقاله راهکارهایی برای افزایش عملکرد این ساختمان‌ها در برابر زلزله ارائه شده است. بدین منظور تعداد ۱۲ عدد دیوار خشتی با انواع مختلف ملات: معمولی، مسلح شده با توری فلزی (با قطر چشمه ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر)، توری پلیمری (با قطر چشمه ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر) و لیف خرما، در ابعاد  $120 \times 120 \times 22$  سانتی‌متر برای بررسی رفتار دیوار و ملات ساخته شده‌اند. دیوارها تحت بار جانبی یکنوا بارگذاری شده تا نوع ترک‌ها، نیروی نهایی، تغییر شکل نهایی و جذب انرژی آن‌ها بدست آیند. نتایج حاصل از آزمایش نشان می‌دهد که ملات به عنوان یکی از ضعیف‌ترین اجزای دیوار می‌باشد. در دیوارهای مسلح شده با توری پلیمری با قطر چشمه ۲۵ میلی‌متر افزایش ۸۳ درصدی در بار نهایی و افزایش ۱۶۵ درصدی در جذب انرژی مشاهده شده است. در دیوارهای مسلح شده با لیف خرما افزایش ۸۲ درصدی تغییر مکان نهایی و افزایش ۱۶۲ درصدی در جذب انرژی مشاهده شده است. بنابراین می‌توان با تقویت ملات با توری و لیف خرما عملکرد دیوار را بهبود بخشید.

### ۱- مقدمه

ساختمان‌های خشتی جزء قدیمی‌ترین ابنیه می‌باشند. باقیمانده کهن‌ترین نمونه‌های این نوع ساختمان‌ها، در دره‌های دهلران پیدا شده که متعلق به ۵۸۰۰ تا ۶۲۰۰ سال قبل از میلاد است [۱].

حدود ۳۰ درصد از جمعیت جهان در ساختمان‌های خشتی زندگی می‌کنند. علاوه بر آن تعدادی از ساختمان‌های تاریخی و باستانی از آجر خشتی ساخته شده است [۲]. در مطالعه‌ای که توتونچی و همکاران بر روی دیوارهای خشتی انجام داده‌اند، ۶ دیوار با ابعاد ۱ متر × ۱ متر ساخته شده است و در برابر بار جانبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. دیوارها با پروپیلن و کمربندهای تارپولین<sup>۱</sup> تقویت شده است، نتایج بهبود رفتار تقویت شده را نشان می‌دهد [۲]. در تحقیق دیگری سعی در تقویت خشت در صنعت ساخت و ساز و توسعه یک روش کم هزینه مسکن در کشوری مانند هند که دارای پتانسیل زیادی برای کاهش انرژی و هزینه را دارد و با توجه به حفاظت از محیط زیست مورد مطالعه قرار گرفته است [۳]. در روشی دیگر استفاده از شبکه‌های پلیمری در داخل ملات برای مقاومت دیوار پیشنهاد داده شده است [۴].

با تغییر نوع زندگی کم‌کم سازه‌های با مصالح نوین جایگزین مصالح سنتی از جمله خشت شدند ولی هنوز هم در کشورهای در حال توسعه از خشت برای ساخت و ساز استفاده می‌شود و از طرفی در کشورهای توسعه یافته نیز تمایل به استفاده از خشت به دلایل معماری، زیست محیطی و عایق بودن در برابر گرما و صدا، بوجود آمده است [۷-۵].

از طرفی سازه‌های خشتی اهمیت ویژه‌ای در میراث فرهنگی ایران نیز دارد چرا که سازه‌های خشتی زیادی از جمله: ارگ بم، مسجد فهرج یزد و طاق کسری وجود دارد [۹، ۸].

مسئله مهمی که در ارتباط با این ساختمان‌ها به چشم می‌آید، عدم طراحی بسیاری از آن‌ها برای مقابله با بارهای لرزه‌ای است. زلزله‌های اخیر نشان داده که به طور کلی سازه‌های بنایی غیر مسلح در برابر بارهای لرزه‌ای آسیب پذیرند و نیاز به مقاوم‌سازی دارند [۱۰].

مقاومت جانبی یک سازه خشتی از رفتار برشی درون صفحه دیوارهای خشتی بدست می‌آید. علاوه بر این، رفتار سازه‌های خشتی به صورت برون‌صفحه، از نوع خمشی است [۱۲، ۱۱]. در مناطق با لرزه خیزی زیاد، فقدان سختی درون-صفحه و برون-صفحه دیوارهای خشتی خطر بزرگی برای ساکنین است [۱۳]. بنابراین افزایش مقاومت مناسب، یکپارچگی و اتلاف انرژی در دیوارهای خشتی، یک مسأله‌ی بحرانی تحت بارهای شدید لرزه‌ای

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: vatani@srttu.edu

<sup>۱</sup> Tarpaulin

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

Table 1. Properties of clay used in mud brick and mortar

مشخصه	مقدار
وزن مخصوص خاک ( $\text{kN/m}^3$ )	۲/۷
مقدار رطوبت (%)	۳/۷
حد روانی (%) Liquid Limit	۲۹
حد خمیری (%) Plastic Limit	۱۶/۹۴
حد انقباض (%) Shrinkage Limit	۱۳/۵۹
نشانه خمیری (%) Plasticity Index	۱۲/۰۶
نشانه روانی (%) Liquid Index	-۱/۱۰
نشانه غلظت (%) Concentration Index	۲/۱۰

تحقیقات هوبن<sup>۴</sup> حد روانی خاک تثبیت نشده را بین ۵۰٪-۲۵٪ (بهتر است ۳۵٪ - ۳۰٪) و حد پلاستیک را بین ۲۵٪ - ۱۰٪ (بهتر است ۲۲٪-۱۲٪) بیان کرده است. شاخص پلاستیسیته که نشانگر ویژگی و فعالیت رس است، را کمتر از ۶٪ بیان کرده، تحقیقات اخیر مقدار بالاتر را نیز مجاز دانسته‌اند [۲۰].

۲-۱-۲- سنگدانه

سنگدانه استفاده شده در خشت، ماسه و شن بوده که 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 C۵۶۶ برای انجام آزمایش‌های سنگدانه استفاده شده است [۲۱].

جدول ۲: مشخصات سنگدانه

Table 2. Aggregate properties

شن	ماسه	نوع سنگدانه
۴۹۴/۴۴	۴۹۳/۶۶	$W_d$ (gr)
۵۰۵/۴۲	۵۱۱/۲۳	$W_{SSD}$ (gr)
۲۰۰	۲۷۰	$V_s$ (c.c)
۲/۴۷	۱/۸۳	$G_s$
۲/۲۲	۳/۶۶	% $W_{SSD}$

۲-۱-۳- الیاف

برای انجام آزمایش کشش، الیاف به صورت مستقیم در زیر دستگاه کششی قرار داده شده اند. روش انجام آزمایش بکار رفته در این تحقیق مشابه روش‌هایی است که در مطالعات قبلی نیز استفاده شده است [۲۲، ۲۳]. به دلیل طبیعت شکننده ساقه‌های کاه، اندازه‌گیری استحکام کششی آن‌ها کار مشکلی می‌باشد زیرا این امر باعث گسیختگی دو انت‌های نمونه در داخل

شده است.

برای افزایش مقاومت و بهبود رفتار دیوارهای خشتی تحقیقاتی بر روی رفتار و خواص خشت شده است که روش‌های مختلفی را برای افزایش مقاومت فشاری خشت مورد استفاده قرار داده‌اند [۱۷-۱۴]. استفاده از میلگردهای افقی و قائم در ساختار دیوارهای خشتی به وسیله بلوندت<sup>۱</sup> و همکاران مورد مطالعه قرار گرفته است، که موجب بهبود رفتار درون صفحه و برون صفحه دیوارهای خشتی شده است [۱۲].

داولینگ<sup>۲</sup> در تحقیقاتش برای بهسازی دیوار از تور در بین ملات استفاده کرده، که بیشتر در گوشه‌ها قرار داده شده اند [۱۸].

یکی از ضعف‌های دیوارهای مصالح بنایی و دیوارهای خشتی در برابر بارهای جانبی ملات آن است، در این تحقیق سعی شده، رفتار دیوارهای خشتی با ملات‌های مختلف تحت آزمایش بار جانبی مورد بررسی قرار گیرد. یکی از ملات‌ها فقط دارای خاک رس و ماسه بوده و در ملات‌های دیگر علاوه بر خاک رس و ماسه، از لیف خرما، توری‌های فلزی و پلیمری به‌عنوان مسلح کننده ملات استفاده شده است.

در این مطالعه سعی شده است، بر اساس هدف اصلی که بهبود رفتار دیوار خشتی است، آزمایش‌هایی در چندین بخش به شرح زیر انجام گیرد:

- آزمایش بر روی بلوک خشتی و بررسی رفتار آن
- آزمایش بر روی نمونه‌هایی با ابعاد کوچک جهت بررسی رفتار ملات و بلوک با هم
- آزمایش بار جانبی استاتیکی بر روی دیوار.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مصالح

برای ساخت خشت، از رس، ماسه و شن استفاده شده است تا مشابه مصالح موجود در دسترس برای ساخت خشت باشد. در خشت، سنگدانه (شن و ماسه) نقش پرکننده و جلوگیری از انقباض و ترک خوردن خشت را دارد و آب برای روان کردن و مخلوط کردن مواد با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۱-۱- خاک رس

برای تهیه خشت و ملات از یک نوع خاک رس استفاده شده است. مشخصات خاک رس با توجه به آزمایشات انجام شده در جدول ۱ ارائه شده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی خاک رس بر طبق استاندارد ASTM [۱۹] انجام شده است. بر طبق طبقه‌بندی سیستم متحد<sup>۳</sup> برای خاک، خاک از نوع رسی با خاصیت خمیری پایین (CL) تعیین شده است.

<sup>1</sup> Blondet

<sup>2</sup> Dowling

<sup>3</sup> Unified

<sup>4</sup> Houben

توری فلزی با قطر چشمه‌های ۱۲/۷ میلی‌متر (۰/۵ اینچ) و ۳/۱ kN/m<sup>۲</sup> و برای توری با قطر چشمه‌های ۱۹/۰۵ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ) ۳/۹ kN/m<sup>۲</sup> بدست آمده است.

### ۲-۱-۵- توری پلیمری

توری پلی‌مری استفاده شده از شبکه مشی از جنس پلی‌اتیلن سنگین با تحمل حرارتی ۵۰ درجه سانتی‌گراد زیر صفر و ۸۰ درجه سانتی‌گراد بالای صفر بوده است. ابعاد چشمه توری پلی‌اتیلن در دو اندازه ۲۵×۲۵ میلی‌متر و ۱۰×۱۰ میلی‌متر بوده است. وزن، ضخامت و مقاومت کششی توری با قطر چشمه ۲۵ میلی‌متر به ترتیب، ۰/۷ kg/m<sup>۲</sup>، ۶/۳ میلی‌متر و ۵/۸ kN/m<sup>۲</sup> بوده است. وزن، ضخامت توری و مقاومت کششی با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر نیز به ترتیب ۰/۴ kg/m<sup>۲</sup>، ۲/۵ میلی‌متر و ۴/۲ kN/m<sup>۲</sup> بوده است.

### ۲-۲- نحوه ساخت و آزمایش‌های انجام شده بر روی خشت

ابعاد خشت مورد استفاده برای ساخت دیوار خشتی، ۲۲×۲۲×۷ سانتی‌متر به عنوان خشت و ۲۲×۱۱×۷ سانتی‌متر به عنوان نیم‌خشت بوده است. نمونه‌های مکعبی، استوانه‌های و منشوری برای آزمایشات مختلف ساخته شده‌اند. ابعاد نمونه‌های ساخته شده برای تعیین ویژگی‌ها و مشخصات خشت در جدول ۵ نمایش داده شده است.

#### جدول ۵: ابعاد نمونه‌ها برای تعیین ویژگی‌های خشت

Table 5. Dimensions of samples to determine the properties of clay

نام - ابعاد	طول (cm)	عرض یا قطر (cm)	ارتفاع (cm)
خشت	۲۲	۲۲	۷
نیم خشت (آجر)	۲۲	۱۱	۷
مکعبی	۱۵	۱۵	۱۵
نمونه خمشی	۴۰	۱۰	۱۰
استوانه ای	-	۱۵	۳۰

بر اساس نوع مصرف این خشت، ترکیباتی انتخاب شده‌اند که در جدول ۶ درصد‌های وزنی آن‌ها داده شده است.

دانه بندی مصالح مورد استفاده در خشت در شکل ۲ نشان داده شده است. مصالح بر اساس ASTM D۴۲۲-۸۷ خوب دانه بندی شده، بوده است.

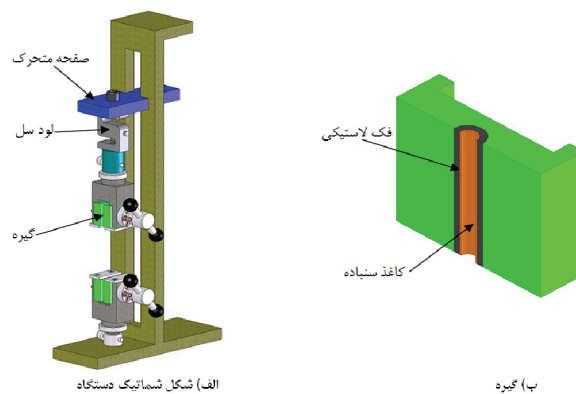
#### جدول ۶: درصد‌های ترکیب ثابت برای ساخت نمونه خشتی

Table 6. Percent of constant composition for the construction of mud brick

نمونه	لیف خرما %	کاه %	آب %	شن %	ماسه %	رُسب %
تقویت شده	۰/۸	۰/۸	۱۲/۷۹	۵/۹	۴۷/۲۳	۳۱/۴۹

گیره‌ها هنگام اعمال نیرو می‌شود [۲۴].

بنابراین یک دستگاه مکانیکی شامل دو گیره، طراحی و ساخته شده است. گیره‌ها توانایی ثابت نگهداشتن ساقه را داشته و شامل فک لاستیکی و کاغذ سمباده هستند که کاغذ سمباده بین ساقه و فک لاستیکی قرار می‌گیرد (شکل ۱). نمونه بعد از قرار داده شدن بین گیره‌ها، با استفاده از یک دستگاه آزمایش فشاری-کششی اختصاصی تحت کشش قرار گرفت [۲۴].



شکل ۱: دستگاه اندازه‌گیری استحکام کششی  
Fig.1. Tensile strength measuring device

### ۲-۳-۱-۲- کاه

مشخصات کاه مورد استفاده در خشت در جدول ۳ داده شده است.

#### جدول ۳: مشخصات کاه

Table 3. Straw properties

مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (kN/m <sup>۳</sup> )	دانسیته	طول (mm)	قطر (mm)
۵۰-۳۸	۱۲	۲/۰۵	۱۰-۴۰	۱-۴

### ۲-۳-۲-۱-۲- کاه

مشخصات لیف خرما مورد استفاده در خشت در جدول ۴ داده شده است.

#### جدول ۴: مشخصات لیاف خرما

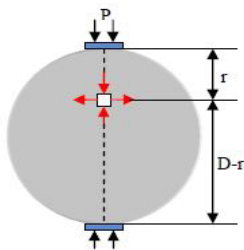
Table 4. Palm fiber properties

تنش کششی (MPa)	کرنش نهایی %	E (MPa)	نسبت پواسون	طول (mm)	قطر (mm)
۱/۶۵	۰/۰۳۷	۴۲۰۰	۰/۴۹	۴۰-۱۰	۲-۱

### ۲-۳-۱-۲- توری فلزی

توری فلزی مورد استفاده به عنوان توری مرغی از جنس گالوانیزه که قطر چشمه‌های آن ۱۲/۷ میلی‌متر و ۱۹/۰۵ میلی‌متر (۰/۵ و ۰/۷۵ اینچ) می‌باشد. وزن آن برای هر متر مربع برای هر دو نوع چشمه kg/m<sup>۲</sup> ۰/۱۶۷ و ضخامت سیم آن ۲/۴ میلی‌متر بوده است. مقاومت کششی برای

آزمایش برزیلی) نمونه‌های استوان‌های نمایش داده شده است.



شکل ۵: آزمایش برزیلی

Fig.5. Brazilian test

جهت انجام آزمایش خمشی برای آماده‌سازی نمونه‌ها ابتدا قالبی (به اندازه‌ی ارتفاع پنج نمونه خشت به همراه ملات) ساخته شده و سپس با همان درصد مصالحی که برای نمونه‌های خشتی در جدول ۶ ذکر شده، نمونه‌هایی با ابعاد  $10 \times 10 \times 40$  سانتی‌متر برای آزمایش خمشی با دست، به قالب زده شد. سپس مدول گسیختگی با استفاده از نتایج این نمونه‌ها اندازه‌گیری شد [۲۸].

برای اندازه‌گیری مدول گسیختگی نمونه خشتی، از رابطه زیر استفاده شده است:

$$S = \frac{3W \left( \frac{L_c}{2} - x \right)}{bh^3} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

در این رابطه پارامترها به شرح زیر می‌باشند:

S: مدول گسیختگی نمونه در صفحه گسیختگی،

W: بیشینه بار نشان داده شده به وسیله دستگاه آزمایش،

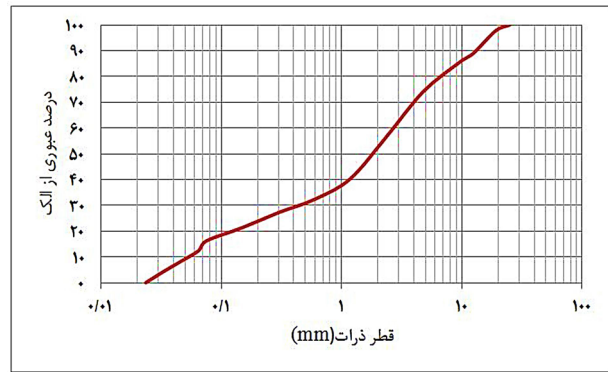
$L_c$ : فاصله بین تکیه‌گاه‌ها،

b: عرض مؤثر نمونه در صفحه گسیختگی،

h: عمق نمونه در صفحه گسیختگی، و

x: فاصله متوسط از وسط دهانه تا صفحه گسیختگی که این فاصله

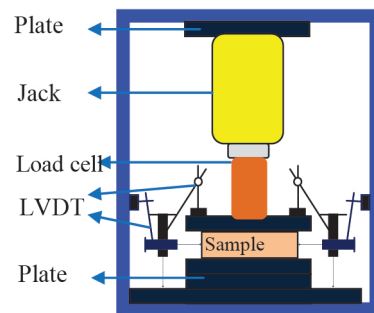
در جهت طول دهانه به موازات خط مرکزی سطح زیرین نمونه اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲: دانه بندی مصالح مورد استفاده در خشت

Fig.2. Aggregate materials used in mud brick

مقاومت فشاری هر یک از خشت‌ها تحت آزمایش فشاری با استفاده از نیروسنج<sup>۱</sup> و تغییرمکان‌سنج<sup>۲</sup> اندازه‌گیری شده است. شکل ۳ نحوه‌ی انجام آزمایش فشاری و وسایل قرار داده شده برای آزمایش را نمایش می‌دهد. برای بارگذاری، از استاندارد شماره ۷ ایران استفاده شده است [۲۵].



شکل ۳: نحوه‌ی قرارگیری ابزار و نمونه برای آزمایش فشاری

Fig.3. Insert tools and samples for compression test

برای آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها، از آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های استوان‌های شکل، استفاده شده است [۲۶]. نمونه‌های استوان‌های دارای قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر می‌باشند که در شکل ۴ نمایش داده شده اند. این آزمایش بر حسب استاندارد ASTM کد C۴۹۶ انجام شده است [۲۷].



شکل ۴: نمونه‌های استوان‌های برای آزمایش برزیلی

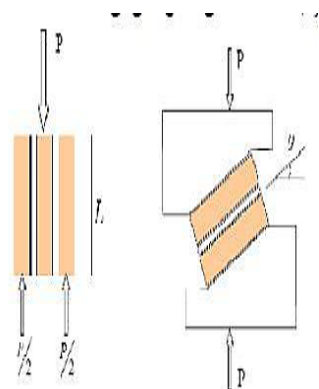
Fig.4. Cylindrical samples for Brazilian test

در شکل ۵ نحوه‌ی توزیع نیروها و انجام آزمایش مقاومت کششی

<sup>1</sup> Loadcell

<sup>2</sup> LVDT

نمونه های دوتایی برای انجام آزمایش برشی، در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۷: شمای آزمایش مقاومت برشی مصالح بنایی

Fig.7. Shear resistance test of masonry

درصدهای مصالح مورد استفاده در ملات در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸: درصدهای ترکیب ثابت برای ساخت انواع ملات

Table 8. Percent of constant composition for the construction of mortar

نوع ملات	رس (%)	ماسه (%)	آب (%)	کاه (%)
ملات معمولی	۶۴/۵	۱۶/۱	۱۹/۴	—
تقویت شده با لیف خرما	۶۳/۵۳	۱۵/۸۱	۱۹/۱۱	۱/۵

#### ۲-۴- نحوه ی ساخت و آزمایش بار جانبی بر روی دیوار

دیوار شامل دو قسمت بلوک و ملات می باشد.

در نمونه شاهد، از خشت تقویت شده (توسط لیاف خرما و کاه) و لیاف معمولی استفاده شده است.

در نمونه های تقویت شده، از خشت تقویت شده (توسط لیاف خرما و کاه) و ملات تقویت شده استفاده شده که انواع ملات آن به شرح زیر است:

- ملات تقویت شده با توری پلیمری با چشمه ۱۰ میلی متر؛
- ملات تقویت شده با توری پلیمری با چشمه ۲۵ میلی متر؛
- ملات تقویت شده با توری فلزی با چشمه ۱۰/۵ اینچ؛
- ملات تقویت شده با توری فلزی با چشمه ۰/۷۵ اینچ؛
- ملات تقویت شده با لیاف خرما.

دیوار کاری با ابزار بنایی انجام گردید و افقی بودن ردیف های آجر کاری و شاقولی بودن دیوار مورد توجه قرار گرفته شد. ضمناً ردیف های آجر کاری طوری چیده شده اند که درزهای قائم ملات روی هم قرار نگیرند.

برای چسبیدن بهتر ملات به خشت، سطح خشت ها هنگام استفاده مرطوب شده اند.

برای ساخت دیوار، ملات با درصد های ذکر شده در جدول ۸ ساخته شده،

#### ۲-۳- آزمایش های انجام شده برای تعیین مشخصات ملات

- برای تقویت ملات از مصالح زیر در ملات استفاده شده است:

- توری پلیمری با چشمه ۱۰ میلی متری؛
- توری پلیمری با چشمه ۲۵ میلی متری؛
- توری فلزی با قطر چشمه ۱۲/۷ میلی متری (۱/۲ اینچ)؛
- توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی متری (۳/۴ اینچ)؛
- لیاف خرما با درصد وزنی ۱/۵ از ترکیب ملات.

برای ارایه بهتر اشکال و نمودارها نام گذاری به مانند جدول ۷ انجام شده است.

جدول ۷: نام گذاری انواع ملات

Table 7. Naming types of mortar

نام گذاری لاتین	نمونه
Simple Mortar	ملات معمولی
SM+ PM10mm	ملات دارای توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی متر
SM+ PM25mm	ملات دارای توری پلیمری با قطر چشمه ۲۵ میلی متر
+SM (in 0.5)MM12.7	ملات دارای توری فلزی با قطر چشمه ۱۲/۷ میلی متری (۰/۵ اینچ)
+SM (in 0.75)MM19.05mm	ملات دارای توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی متری (۰/۷۵ اینچ)
+SM PF%1.5	ملات دارای افزودنی لیف خرما با درصد وزنی ۱/۵

برای مقایسه تاثیر توری بر روی ملات نمونه هایی در ابعاد مختلف، به شرح زیر برای آزمایشات مختلف ساخته شده اند:

نمونه های ۵ تایی به ارتفاع ۴۰ سانتی متری برای انجام آزمایش فشاری در شکل ۶

نمونه های ۶ تایی با فاصله دهانه ۴۵ سانتی متر برای انجام آزمایش خمشی ۲ نقطه ای.



شکل ۶: آزمایش فشاری نمونه های منشوری

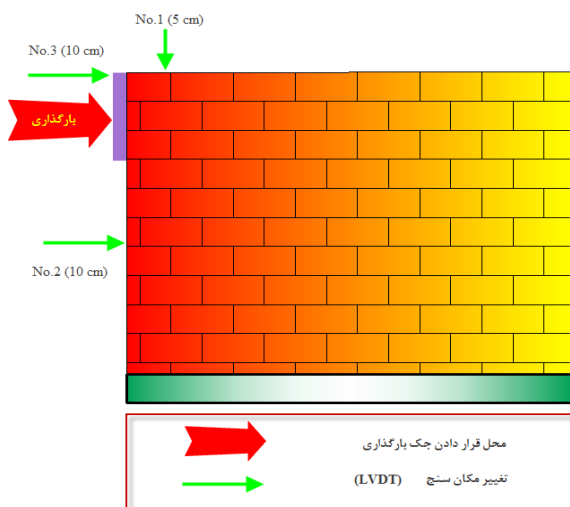
Fig.6. Compressive test of prism samples

جدول ۹: نام گذاری انواع دیوار  
Table 9. Naming types of wall

اسم لاتین	نمونه
Simple Wall	دیوار دارای ملات معمولی
SW+MM ۱۲,۷mm (۰,۵in)	دیوار دارای ملات تقویت با توری فلزی با قطر چشمه ۱۲/۷ میلیمتری (۰/۵ اینچ)
SW+MM ۱۹,۰۵mm (in ۰,۷۵)	دیوار دارای ملات تقویت با توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلیمتری (۰/۷۵ اینچ)
SW+PM ۱۰ (mm)	دیوار دارای ملات تقویت با توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلیمتر
SW+PM ۲۵ (mm)	دیوار دارای ملات تقویت با توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلیمتر
SW+۱,۵% PF	دیوار دارای ملات تقویت ۱/۵٪ لیف خرما

برای انجام آزمایش با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه، آزمایش بارگذاری جانبی یکنوا انتخاب شده است.

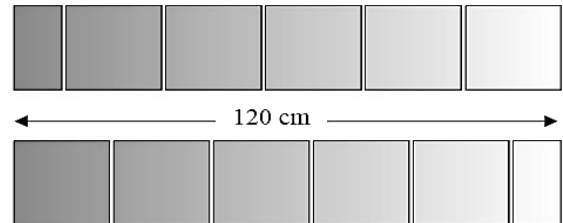
در شکل ۱۰ قسمت الف، دیوار و تجهیزات نصب شده بر روی آن برای انجام آزمایش نمایش داده شده است. در شکل ۱۰، قسمت ب، نحوه آماده سازی دیوار قبل از آزمایش نشان داده شده است. یک عدد جک فشاری و نیرو سنج در بالای دیوار قرار داده شده که به ترتیب اعمال تغییر مکان جانبی و ثبت نیروی جانبی را بر عهده داشته‌اند. از کف قوی آزمایشگاه برای سر نخوردن نمونه‌ها استفاده گردید بدین صورت تغییر مکان پایه دیوارها محدود گردید. با این سیستم بارگذاری، بار جانبی به دیوارها اعمال شده است.



(الف)

بدین صورت که ابتدا خاک، ماسه و آب مورد نیاز وزن شده و سپس خاک با ماسه مخلوط شده و آب خوره ایجاد شده است، آب به مخلوط اضافه شده و ملات را کمی مخلوط کرده و سپس ملات را به حال خود رها کرده تا خاک آب را جذب کند.

پلان دیوار ساخته شده در شکل ۸ نمایش داده شده است. دیوار با ضخامت ۲۲ سانتیمتر، ارتفاع و طول ۱۲۰ سانتیمتر برای آزمایش ساخته شده است.



شکل ۸: ردیف‌های آجرکاری زوج و فرد برای چیدن دیوارهای نمونه

Fig.8. Brick rows in wall samples

کار گذاشتن توری در ملات بدین صورت بوده است که ابتدا بر روی خشت هر ردیف آجر کاری مقداری گل ریخته و سپس توری گذاشته شده و دوباره بر روی آن نیز گل می‌ریزیم. دقت شده که ضخامت ملات در دیوارهای مختلف یکسان بوده باشند. در شکل ۹ دیوار جهت آزمایش قبل از بارگذاری نمایش داده شده است.



شکل ۹: دیوار قبل از آزمایش بدون بار ثقلی

Fig.9. Wall before test without vertical load

برای ارزیابی بهتر جداول و نمودارها، نمونه‌ها مانند جدول ۹ اسم گذاری شده‌اند:

در این تحقیق بر اساس نوع مصالح و درصد ترکیب آن‌ها مقاومت فشاری برای خشت به صورت میانگین  $4/37 \text{ MPa}$  و برای نیم‌خشت  $4/37 \text{ MPa}$  و  $3/29$  بدست آمده است. در تحقیقات کاواکو<sup>۲</sup> نیز ذکر شده که بلوک‌های دارای چسباننده رسی توانسته‌اند مقاومت فشاری بین ۳ تا  $4/5$  مگاپاسکال (MPa) را تحمل کنند [۲۹].

**جدول ۱۰: نتایج آزمایش فشاری بر روی خشت با ابعاد مختلف**

Table 10. Numerical results obtained in compressive test of specimens

مقاومت فشاری MPa		ابعاد (cm)			نوع نمونه
انحراف از معیار	میانگین	ارتفاع	عرض یا قطر	طول	
۰/۵۸	۴/۳۷	۷	۲۲	۲۲	خشت
۰/۵۷	۳/۲۹	۷	۱۱	۲۲	نیم خشت (آجر)
۰/۰۳۵	۱/۵۳	۱۵	۱۵	۱۵	مکعبی
۰/۰۱۵	۰/۱۸	۳۰	۱۵	-	استوانه ای

در شکل ۱۱ نمونه استوانه‌ای دارای الیاف کاه بعد از آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱: نمونه استوانه‌ای دارای الیاف کاه بعد از آزمایش برزیلی

Fig.11. Cylindrical sample with straw after Brazilian test

در جدول ۱۱ نتایج آزمایش برزیلی نمونه خشت تقویت شده مشاهده می‌شود. مقاومت کششی میانگین بر حسب آزمایش انجام شده مقدار  $14/0$  بدست آمده است.



(ب)

شکل ۱۰: الف- محل قرارگیری ابزار آزمایشگاهی بر روی دیوار-ب- آماده سازی دیوار برای انجام آزمایش

Fig.10. (A) The location of the laboratory equipment on the wall, (B) Preparing the wall for test

در تمام نمونه‌های آزمایشگاهی بار جانبی در تراز فوقانی در ارتفاع ۱۱۰ سانتی‌متری از کف دیوار اثر کرده است که با توجه به یکپارچگی دیوار بار جانبی به صورت یکنواخت در تمام طول دیوار توزیع شده است. برای این که بار بر سطح بیشتری از سطح جک به دیوار اعمال شود، چوبی به اندازه‌ی ۲۵ سانتی‌متر برش داده شده و سپس چوب با گچ به آجرهای خشتی سه ردیف آخر چسبانده شده است.

برای اندازه گرفتن تغییر مکان جانبی، دو تغییرمکان‌سنج در بالا و وسط دیوار نصب شده‌اند و برای اندازه گرفتن تغییر مکان عمودی نیز یک تغییرمکان‌سنج در بالای دیوار نصب شده است.

دستگاه ثبت داده‌ها (دیتالاگر<sup>۱</sup>) را برای انجام آزمایش تنظیم کرده و نیروی جانبی توسط جک هیدرولیکی ۱۰۰ تنی به دیوار اعمال شده و با استفاده از دستگاه تغییرمکان‌سنج و نیروسنج، تغییرمکان و نیروی وارده بر دیوار در هر لحظه اندازه‌گیری و ثبت شده است.

**۳- نتایج**

**۳-۱- نتایج آزمایشات بر روی خشت**

در جدول ۱۰ نتایج آزمایش فشاری بر روی خشت با ابعاد مختلف برای سه نمونه آزمایش به صورت میانگین نمایش داده شده است. در جدول ۱۰ مقادیر میانگین مقاومت فشاری محاسبه شده است.

با توجه به جدول ۱۰ مقاومت فشاری بیش‌تری برای نمونه‌های با نسبت عرض به طول بیشتر مشاهده می‌شود. با افزایش نسبت ارتفاع به عرض نمونه، ضریب لاغری عضو بیشتر شده و نمونه به حالت ستونی نزدیک‌تر شده است.

<sup>۱</sup> Data Logger

<sup>۲</sup> Kouakou

در جدول ۱۳ میانگین نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ۵ تایی مشاهده می‌شود.

**جدول ۱۳: میانگین نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ۵ تایی**

Table 13. The mean of the results obtained from the compressive strength test on the 5 bricks samples

مقاومت فشاری میانگین (مگاپاسکال)	نوع ملات
۰/۵۸۶۶۶۷	Simple Mortar
۰/۷۷۳۳۳	SM-PM۱۰mm
۰/۸۱۳۳۳۸	SM-PM۲۵mm
۰/۷۸	SM-MM۷/۱۲mm(۰/۵ in)
۰/۶۰۳۳۳۳	SM-MM۰.۵/۱۹mm(۰/۷۵ in)
۰/۸۵۲۲۵۸	SW%۰.۵/۱+PF

با توجه به جدول ۱۳ نتایج زیر مشاهده شده است:

در نمونه‌ای که از لیف خرما برای تقویت ملات استفاده شده است، بیشترین مقاومت فشاری بر روی نمونه ۵ تایی مشاهده شده است، در این نمونه ۴۵٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه با ملات معمولی مشاهده شده است.

در نمونه ملات تقویت شده با توری پلیمری با قطر چشمه ۲۵ میلی‌متر، بعد از لیف خرما بیشینه مقاومت فشاری را تحمل نموده است و ۴۰٪ نسبت به نمونه با ملات معمولی، افزایش در مقاومت فشاری مشاهده شده است.

در نمونه ملات تقویت شده با توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی‌متر (۰/۷۵ اینچ)، افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌های ۵ تایی مشاهده نشده است. نتایج میانگین آزمایش برشی در جدول ۱۴ ارائه شده است. با توجه به نتایج جدول ۱۴ مشاهده می‌شود که تنش برشی و فشاری در نمونه‌های تقویت شده پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متری بیشترین مقدار و تنش برشی و فشاری مربوط به نمونه توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی‌متری کمترین مقدار را تحمل نموده‌اند.

نتایج آزمایش خمشی بر روی انواع ملات در جدول ۱۵ ارائه شده است. در شکل ۱۳ نمونه‌های ساخته شده در زیر دستگاه مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳: آزمایش خمشی بر روی نمونه‌های منشوری ساخته شده با ۶ ردیف خشت

Fig.13. Flexural test on prism sample made with 6 rows of bricks

**جدول ۱۱: نتایج آزمایش برزیلی نمونه خشت تقویت شده**

Table 11. razilian test results of reinforcement sample

ابعاد نمونه	مساحت میلی‌متر مربع	نیروی گسیختگی F (KN)	مقاومت کششی مگاپاسکال
۳۰۰×۱۵۰	۷۰۶۵۰	۱۰/۲	۱/۱۴
۳۰۰×۱۵۰	۷۰۶۵۰	۹/۵	۰/۱۳
۳۰۰×۱۵۰	۷۰۶۵۰	۱۱/۱	۰/۱۶
۰/۰۱۵ ± ۰/۱۴			

مقاومت کششی ماکزیمم طبق استاندارد NZ۴۲۹۷ نیوزلند ۰/۱۳ مگاپاسکال توصیه شده است [۳۰، ۵].

برای آزمایش خمشی، ۵ نمونه آزمایش شده‌اند که نتایج در جدول ۱۲ ارائه شده است. میانگین مقاومت خمشی نمونه‌های آزمایش شده، ۰/۰۷۸ MPa بدست آمده است.

**جدول ۱۲: نتایج آزمایش تعیین مقاومت خمشی خشت تقویت شده**

Table 12. Test results of determining flexural strength of the reinforced clay

ردیف	L <sub>0</sub> (mm)	b,h (mm)	x (mm)	w (N)	s (N/mm <sup>2</sup> )
۱	۳۵۰	۹۹	۵	۱۴	۰/۰۰۷۵
۲	۳۵۰	۹۵	۴	۱۴	۰/۰۰۸۲
۳	۳۵۰	۹۹	۷	۱۲	۰/۰۰۶۴
۴	۳۵۰	۹۸	۶	۱۵	۰/۰۰۷۹
۵	۳۵۰	۹۴	۴	۱۵	۰/۰۰۹۱
میانگین					
۰/۰۰۱ ± ۰/۰۰۷۸					

۳-۲- نتایج آزمایشات بر روی انواع ملات

در شکل ۱۲ نمونه‌های ساخته شده با ۵ ردیف بلوک برای آزمایش مقاومت فشاری نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۲: نمونه ۵ تایی آزمایش مقاومت فشاری

Fig.12. 5 bricks samples for compressive strength test



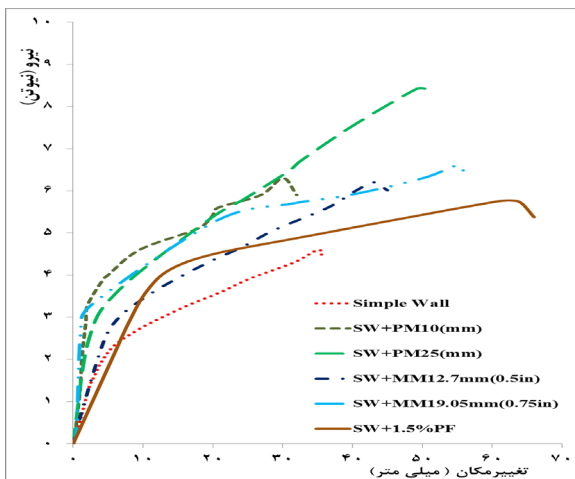
خشت بالا و پایین اتصال داشته، توری با عملکرد کششی و یکپارچه کردن ملات، باعث بهبود مقاومت کششی شده است. ولی در نمونه با توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر چون قطر چشمه از همه حالات کمتر بوده، ملات بخوبی از داخل سوراخ‌ها عبور نکرده و توری نقش مداخله کننده در عملکرد اتصال بلوک‌ها در ردیف بالا و پایین به یکدیگر توسط ملات را داشته است. ضمناً مقاومت خمشی نمونه ملات در ابعاد ۱۶×۴×۴ سانتیمتر برای ملات معمولی، ۱/۷۳ مگاپاسکال و برای ملات تقویت شده با ۱/۵ درصد وزنی ملات کاه نیز ۱/۴۵ مگاپاسکال بدست آمده است.

مقاومت فشاری نمونه در ابعاد ۵×۵×۵ سانتیمتر برای ملات معمولی، ۳/۲ مگاپاسکال و برای ملات تقویت شده با لیف خرما ۲/۸۷ مگاپاسکال بدست آمده است. همان طور که در نتایج مشاهده می‌شود، در ابعاد نمونه های ۱۶×۴×۴ سانتیمتر و ۵×۵×۵ سانتیمتر لیف خرما عملکرد خوبی از خود نشان نداده و با افزودن لیف خرما مقاومت خمشی و فشاری کاهش یافته است. هر چه ابعاد نمونه‌ها افزایش پیدا کند، لیف خرما در مقاومت فشاری و کششی تاثیر بیشتری از خود نشان می‌دهد و باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی می‌شود، شبیه این نتایج در کار پیاٹونی<sup>۱</sup> و همکاران نیز مشاهده شده است [۳۱].

### ۳-۳- نتایج آزمایشات بر روی انواع دیوار

#### نمودار کلی دیوارهای خشتی:

نمودار بار-تغییر مکان این دیوار در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.



شکل ۱۴: نمودار بار-تغییر مکان انواع دیوارهای مورد آزمایش

Fig.14. load-displacement diagram of different walls

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده شده است که:

در ابتدا چسبندگی ملات، اصطکاک بین ملات با خشت‌ها و توری با خشت‌ها عامل تحمل نیروی جانبی بوده ولی پس از شروع ترک‌ها، تغییر شکل‌های غیر قابل برگشتی در نمونه‌ها ایجاد شده‌اند.

### جدول ۱۴: میانگین نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت برشی

Table 14. The mean of the results obtained from the shear strength test

نمونه	بار حدی P (N)	تنش برشی و فشاری (MPa)	ضریب اصطکاک داخلی	زاویه اصطکاک داخلی
Simple Mortar	۳۴۰۷۶	۰/۵۰	۰/۹۹۹۸۹	۴۴/۹۹۷۷
SM-PM۱۰mm	۳۹۰۲۸	۰/۵۷	۰/۹۹۹۷۹	۴۴/۹۹۶۴
SM-PM۲۵mm	۳۴۸۴۴	۰/۵۱	۰/۹۹۹۸۴	۴۴/۹۹۵۵
-SM MM۱۲,۷mm (۰/۵ in)	۳۵۷۱۹	۰/۵۲	۰/۹۹۹۸۱	۴۴/۹۹۴۵
SM-۰,۵mm/MM۱۹ (۰/۷۵ in)	۳۱۲۳۲	۰/۴۶	۰/۹۹۹۸۰	۴۴/۹۹۴۴
PF٪۵/۱+SW	۳۵۶۱۵	۰/۵۲	۰/۹۹۹۸۴	۴۴/۹۹۵۳

### جدول ۱۵: میانگین نتایج تنش کششی بدست آمده از آزمایش تیر خمشی مصالح بنایی خشت تقویت شده

Table 15. The average tensile stresses obtained from the flexural beam of reinforced mud brick

نوع نمونه	تنش کششی میانگین مگاپاسکال	درصد نسبت به نمونه شاهد
Simple Mortar	۰/۰۰۲۲۶۶۶۷	۱
SM-PM۱۰mm	۰/۰۰۱۹۳۳۳۳	۰/۸۵۲
SM-PM۲۵mm	۰/۰۰۲۳	۱/۰۱۵
SM-MM۱۲,۷mm (۰/۵ in)	۰/۰۰۲۳۳۳۳۳	۱/۰۲۹
SM-MM۱۹,۰۵mm (۰/۷۵ in)	۰/۰۰۲۵۶۶۶۷	۱/۱۳۲
SW+۱/۵٪PF	۰/۰۰۲۴۷۳	۱/۰۹۱

با توجه به جدول ۱۵ نتایج زیر بدست آمده‌اند:

بیشینه تنش کششی مربوط به نمونه‌های منشوری تقویت شده با لیف خرما و با توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی‌متر است. حداقل تنش کششی مربوط به نمونه پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر است.

اتصال ملات به بلوک و اصطکاک و چسبندگی ملات با بلوک در افزایش مقاومت خمشی نمونه تأثیرگذار بوده است. در نمونه با توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی‌متر، چون ملات از داخل توری عبور کرده و به

<sup>۱</sup> Piattoni

در شکل ۱۵ و ۱۶ نمونه‌هایی از ترک ایجاد شده در آزمایش نیروی جانبی بر روی دیوار خشتی مشاهده می‌شود. در جدول ۱۶ نتایج بدست آمده از آزمایش برای دیوارهای ساخته شده آورده شده است. در شکل ۱۷ نمونه‌های از دیوار خراب شده که در آن ملات دیوار نمایان است، نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در ملات از توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است و این توری باعث شده است تا ملات به صورت یکپارچه باقی بماند و از انقباض ملات و ایجاد ترک در آن بر خلاف نمونه‌ی بدون تقویت، جلوگیری شده است. در شکل ۱۸ ملات دیواری که بدون تقویت می‌باشد نمایش داده شده است.



شکل ۱۷: نمونه‌ای از ملات دیوار آزمایش شده با توری پلیمری ۱۰ میلی‌متری

Fig.17. A sample of a mortar tested with a 10 mm polymer mesh



شکل ۱۸: ترک‌های ایجاد شده در ملات دیوار ساده بعد از آزمایش

Fig.18. Cracks occurred in a wall sample after the test

خرابی در کل نمونه‌ها در اثر ترک خوردگی در گوشه پایین سمت اعمال بار، در بین ردیف اول و دوم رخ داده است. گسیختگی همه نمونه‌ها، کنترل شونده توسط تغییر مکان بوده است. مد خرابی همه دیوارها، بلند شدگی بوده است. نتایجی که از این آزمایش‌ها حاصل می‌شود به شرح زیر است: این دیوارها ساده بوده و دارای اتصال کافی نبوده است؛ از طرفی بارمحوری بر روی دیوارها نبوده تا دچار خرابی‌های دیگر از جمله گسیختگی پاشنه یا ترک‌های دیگر شود؛ علاوه بر این چون در دیوارهای خشتی ضعف بیشتر در ملات بوده و یکی از ویژگی‌های خاک این است که در کشش، بسیار ضعیف‌تر از فشار می‌باشد، به علت گشتاور ایجاد شده بخاطر بار جانبی در گوشه پایین سمت اعمال نیرو، کشش به وجود آمده و نمونه از آنجا ترک خورده است. در مطالعه‌ای که روگبوس<sup>۱</sup> و همکاران بر روی سازه خشتی انجام دادند نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، که ملات یکی از ضعیف‌ترین بخش‌های ساختمان خشتی می‌باشد [۳۲].



شکل ۱۵: شکل ترک ایجاد شده در آزمایش نیروی جانبی در دیوار با ملات تقویت شده با توری پلیمری ۲۵ میلی‌متری

Fig.15. The cracks occurred in lateral force test on the wall with 25mm polymer mesh reinforced mortar



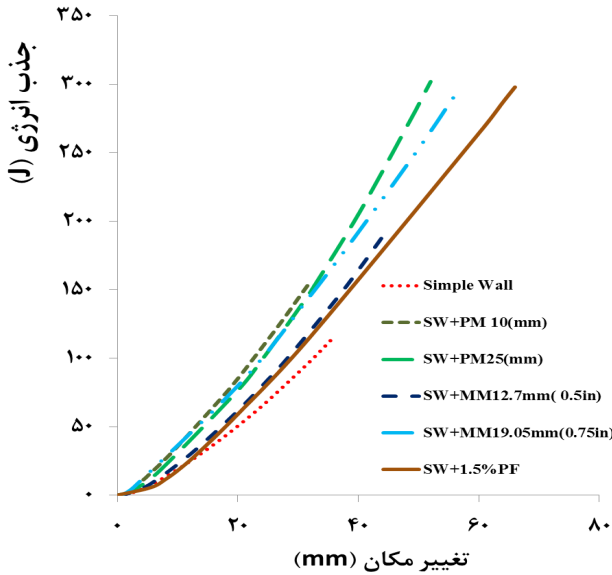
شکل ۱۶: ترک‌های ایجاد شده در دیوار مسلح شده با توری پلیمری ۱۰ میلی‌متری بعد از آزمایش

Fig.16. Cracks occurred in a reinforced wall with a 10 mm polymer mesh

<sup>۱</sup> Rogiros

با توجه به جدول ۱۷ نتایج زیر بدست آمده‌اند:

بیشترین تحمل بار جانبی، مربوط به نمونه با ملات تقویت شده با توری پلیمری با قطر چشمه ۲۵ میلی‌متر بوده است. در این نمونه، قطر چشمه‌ها بزرگ‌تر از بقیه نمونه‌ها بوده که باعث شده ملات از چشمه‌ها بهتر عبور کرده و بلوک‌ها بهتر توسط ملات به یکدیگر متصل شوند؛ از طرفی چون این توری ضخامت بیشتری داشته، اصطکاک بیشتری با بلوک بالا و پایین در هر ردیف داشته است. در نمونه‌های تقویت شده با توری، ملات‌های تقویت شده با قطر چشمه بزرگتر، تحمل نیروی جانبی بیشتری داشته‌اند. در نمونه‌هایی که قطر چشمه آن‌ها بزرگ‌تر بوده‌اند، ملات بهتر توانسته از بین چشمه عبور کند و باعث اتصال بهتر بلوک بالا به پایین شده است. انرژی جذب شده (به‌عنوان تابعی از تغییر شکل) توسط انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان، بدست آمده است. بر اساس شکل ۱۹ و جدول ۱۸ نتایج زیر بدست آمده‌اند: جذب انرژی دیوار با ملات تقویت شده با توری فلزی با قطر چشمه ۲۵ میلی‌متر و لیف خرما بیشترین مقدار بوده است. بر اساس شکل ۱۴ مشخص شده است که دیوار دارای لیاف خرما، بیشترین تغییر شکل را نیز داشته است که بخاطر شکل‌پذیری بیشتر لیاف خرما بوده است.



شکل ۱۹: نمودار جذب انرژی-تغییر مکان دیوارهای ساخته شده با انواع ملات

Fig.19. Energy absorption-displacement diagram of walls made of various types of mortar

جدول ۱۶: تغییر مکان بیشینه نمونه‌های دیوار با انواع ملات مختلف

Table 16. Maximum displacement of wall samples with different mortar types

نمونه	تغییر مکان بیشینه (میلی‌متر)	درصد نسبت به نمونه شاهد
Simple Wall	۳۵/۱۲	۱
SW-PM۱۰mm	۳۰/۰۴	۰/۸۵۵۳
SW+PM۲۵(mm)	۵۰/۵۲	۱/۴۴۸۵
SW+MM۱۲/۷mm (۰/۵ in)	۴۳/۰۹	۱/۲۲۷
SW+MM۱۹/۰.۵mm (۰/۷۵ in)	۵۵/۰.۸	۱/۵۶۸۳
SW+۱/۵٪PF	۶۳/۷۵	۱/۸۱۵۲

با توجه به جدول ۱۶ نتایج زیر بدست آمده اند:

تغییر مکان بیشینه دیوار تقویت شده با لیاف خرما بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده است. تغییر مکان بیشینه در نمونه‌ای که دارای لیف خرما می‌باشد، رخ داده است، چون لیاف خرما با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش، از سایر نمونه‌ها شکل‌پذیری بیشتری داشته‌اند، تغییر مکان بیشینه بیشتری در این نمونه رخ داده است. تغییر مکان بیشینه دیوار تقویت شده با توری پلی‌مری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر، کمتر از سایر نمونه‌ها حتی نمونه با ملات معمولی بوده است. توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر شکل‌پذیری پایینی داشته است. از طرف دیگر چون از درون سوراخ‌های آن ملات عبور نکرده مانعی برای اتصال ردیف بالا و پایین در هر بند ملات بوده است. توری پلیمری و فلزی با قطر چشمه‌های بزرگتر، تغییر مکان بیشتری نسبت به توری‌هایی با قطر چشمه کمتر داشته‌اند. توری‌های با قطر سوراخ بزرگتر شکل‌پذیرتر از توری‌های با قطر سوراخ کوچکتر بوده‌اند. از طرفی چون توری با قطر چشمه بزرگتر، ضخیم‌تر بوده، اصطکاک بیشتری را نیز ایجاد کرده است.

جدول ۱۷: بار بیشینه نمونه‌های دیوار با انواع ملات مختلف

Table 17. Maximum load of wall samples with different mortar types

نمونه	بار بیشینه کیلونیوتن	درصد نسبت به نمونه شاهد
Simple Wall	۴/۶	۱
SW+PM۱۰(mm)	۶/۳	۱/۳۶۹۶۳
SW+PM۲۵(mm)	۶/۴۲	۱/۸۳۰۴
SW+MM۱۲,۷mm (۰,۵in)	۶/۲	۱/۳۴۷۸
SW+MM۱۹,۰۵mm (۰,۷۵in)	۶/۶	۱/۴۳۴۸
PF٪۱,۵+SW	۵/۷۵	۱/۲۵

استفاده شده است مقدار بار جانبی نسبت به دیوار معمولی ۲۵ درصد افزایش داشته است.

مد خرابی همه دیوارها بلندشدگی از بین ردیف اول و دوم آجرکاری بوده که بدلیل عدم استفاده از دیوار اتصال، کلافبندی و بار ثقلی بر روی دیوارها بوده است.

در نمونه‌های تقویت شده با الیاف، افت پس از نقطه اوج کمتر است و رفتار شکننده شن و ماسه تا حدودی انعطاف پذیرتر شده است.

با قرار دادن توری فلزی، پلیمری و لیف خرما در بین ملات، ملات یکنواخت‌تر شده و علاوه بر آن توری و لیف خرما از ترک‌های بزرگی که هنگام انقباض ملات در اثر از دست آب ایجاد می‌شود، جلوگیری کرده و باعث می‌شود که سطح ملات یکپارچه شود.

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف که بر روی واحدهای مصالح بنایی و دیوارهای خشتی انجام شده است، مشاهده می‌شود یکی از ضعیف‌ترین قسمت‌ها در دیوار خشتی ملات می‌باشد که با تقویت ملات می‌توان درصد قابل توجهی (بین ۲۵ تا ۸۳ درصد) دیوارهای خشتی را در برابر بار جانبی وارده مقاوم نمود.

#### مراجع

- [1] A.U. Pope, *Introducing Persian Architecture*, Soroush press, 1976.
- [2] F. Tootoonchy, B. Asgarian, F. Danesh, Experimental in-plane behavior and retrofitting method of mud-brick walls, *International Journal of Civil Engineering*, 13(2) (2015) 191-201.
- [3] A. Garg, H. Yadav, Study of Red Mud as an Alternative Building Material for Interlocking Block Manufacturing in Construction Industry, (2015).
- [4] A.A. El-Derby, A. Elyamani, The adobe barrel vaulted structures in ancient Egypt: a study of two case studies for conservation purposes, *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 16(1) (2016) 295-315.
- [5] M.I. Gomes, M. Lopes, J. De Brito, Seismic resistance of earth construction in Portugal, *Engineering Structures*, 33(3) (2011) 932-941.
- [6] J. Revuelta-Acosta, A. Garcia-Diaz, G. Soto-Zarazua, E. Rico-Garcia, Adobe as a sustainable material: A thermal performance, *Journal of Applied Sciences(Faisalabad)*, 10(19) (2010) 2211-2216.
- [7] H. Binici, O. Aksogan, D. Bakbak, H. Kaplan, B. Isik, Sound insulation of fibre reinforced mud brick walls, *Construction and Building Materials*, 23(2) (2009) 1035-1041.
- [8] Zomarshidi H., "Iranian architecture of traditional materials science" *Tehran, Zomorod Publishing*, 1390, (In Persian.)
- [9] Shpoor, T.; Neeri, A.; "Design masonry buildings" Tehran,

#### جدول ۱۸: جذب انرژی نمونه‌های دیوار با انواع ملات مختلف

Table 18. Energy absorption of wall samples with different mortar types

نمونه	جذب انرژی کیلو نیوتن.میلی.متر	درصد نسبت به نمونه شاهد
Simple Wall	۱۱۳/۸۵۹	۱
SW+PM۱۰(mm)	۱۵۵/۷۶۱	۱/۳۶۸۰۱۸
SW+PM۲۵(mm)	۳۰۱/۹۳۵	۲/۶۵۱۸۴۱
SW+MM۱۲,۷mm	۱۹۴/۷۳۳	۱/۷۱۰۳۰۵
SW+MM۱۹,۰۵mm	۲۹۲/۴۱۲	۲/۲۶۸۲۰۱
PF%SW+۱,۵	۲۹۷/۹۴۸	۲/۶۱۶۸۲۹

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده بر روی نمونه‌های مصالح خشتی، نتایج زیر بدست آمده است:

در نمونه‌ای که از لیف خرما برای تقویت ملات استفاده شده است، مقاومت فشاری نمونه ۵ تا ۴۵٪ نسبت به نمونه معمولی افزایش مقاومت داشته است. علاوه بر مقاومت فشاری در مقاومت برشی و تنش کششی نیز به ترتیب برابر ۴٪ و ۹٪ افزایش نسبت به نمونه معمولی داشته است.

با جایگذاری توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ و ۲۵ میلی‌متر در بین ملات، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵ تا ۳۲ تا ۳۹ درصد افزایش یافته است.

با استفاده از توری فلزی با قطر چشمه ۱۲/۷ میلی‌متر و ۱۹/۰۵ میلی‌متر (۵/۰ و ۱۰/۷۵) در بین ملات، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵ تا ۳۳٪ نسبت به نمونه معمولی افزایش داشته است به طوری که در نمونه‌ای که توری فلزی با قطر چشمه ۱۲/۷ میلی‌متر استفاده شده است، به اندازه ۳۳ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه ساده داشته است. تنش کششی نمونه‌های ۶ تا ۱۳٪ نسبت به نمونه معمولی که از توری فلزی با قطر چشمه ۱۹/۰۵ میلی‌متر استفاده شده است، ۱۳ درصد نسبت به نمونه ساده افزایش داشته است. با توجه به آزمایشات انجام شده بر روی دیوارهای خشتی، نتایج زیر بدست آمده است:

با استفاده از توری پلیمری با قطر چشمه ۱۰ میلی‌متر، در بین ملات دیوار، بار جانبی نهایی و جذب انرژی به میزان ۳۷ درصد افزایش یافته است. با جایگذاری توری پلیمری (با قطر چشمه ۲۵ میلی‌متر)، توری فلزی (با قطر چشمه ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر) و لیف خرما در بین ملات دیوار، می‌توان بار جانبی نهایی، تغییر مکان نهایی و جذب انرژی، را افزایش داد. مقدار بار جانبی نهایی که نمونه‌های تقویت شده با توری فلزی با قطر چشمه ۱۲/۷ و ۱۹/۰۵ میلی‌متر تحمل نموده‌اند به ترتیب برابر ۶/۲ کیلو نیوتن و ۶/۶ کیلو نیوتن می‌باشد که نسبت به دیوار معمولی ۳۴ و ۴۳ درصد افزایش در بار جانبی نهایی نشان می‌دهند. در دیواری که برای تقویت ملات از لیف خرما

- University of Bath, (2003).
- [21] ASTM, "Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying", ASTM C566-97, West Conshohocken, PA, USA, 1997.
- [22] M. O'dogherty, A review of research on forage chopping, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 27(4) (1982) 267-289.
- [23] M. O'Dogherty, J. Huber, J. Dyson, C. Marshall, A study of the physical and mechanical properties of wheat straw, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(2) (1995) 133-142.
- [24] Nazari, M., Jafari, A., Tabatabaifar, A., Sharifi, Malvajerd, A., Tavakoli, H.; "The effect of moisture content, fast loading and high areas on the tensile strength of alfalfa", Fifth National Conference on Agricultural Machinery Engineering, Mechanisation Ferdowsi University of Mashhad, 2008.
- [25] Islamic Republic of Iran, Iranian National Standardization Organization, Clay brick- Specifications and Test Methods, INSO 7 5th .Revision, 2016, ICS:91.100.15, In Persian.
- [26] L. Mbumbia, A.M. de Wilmars, Behaviour of low-temperature fired laterite bricks under uniaxial compressive loading, *Construction and Building Materials*, 16(2) (2002) 101-112.
- [27] ASTM C.496-96 : Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
- [28] A.W. Hendry, *Structural masonry, Scholium International*, 1990.
- [29] C. Kouakou, J. Morel, Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder, *Applied Clay Science*, 44(1) (2009) 27-34.
- [30] NZ 4297; "Earth Building Association of New Zealand", *Engineering design of earth buildings, New Zealand: EBA*, 1998.
- [31] Q. Piattoni, E. Quagliarini, S. Lenci, Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 2067-2075.
- [32] R. Illampas, D.C. Charnpiss, I. Ioannou, Laboratory testing and finite element simulation of the structural response of an adobe masonry building under horizontal loading, *Engineering Structures*, 80 (2014) 362-376.
- science and literature Publishing, 1383, In Persian.
- [10] Mirgoozar langerody, M.M., Mirgoozar langerody, S.S. and Rajabi, A. Retrofitting adobe buildings against earthquake, Retrofit National Conference on Iran, Yazd, Yazd University; (1387) , In Persian.
- [11] E.L. Tolles III, H. Krawinkler, Seismic studies on small-scale models of adobe houses, (1990).
- [12] M. Blondet, G.V. Garcia, S. Brzey, A. Rubiños, Earthquake-resistant construction of adobe buildings: A tutorial, *EERI/IAEE world housing encyclopedia*, (2003).
- [13] L. Turanli, A. Saritas, Strengthening the structural behavior of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh, *Construction and Building Materials*, 25(4) (2011) 1747-1752.
- [14] Oskouei, A.Vatani., M. Afzali. and M. Madadipour., "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, Proland*, 978-83-7125-216-7, 2012.
- [15] Oskouei, A.Vatani., M. Afzali. and M. Madadipour., "Effect of some natural additives on the mechanical properties of mud brick", *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Proland*, 978-83-7125-216-7, 2012.
- [16] Oskouei, A.Vatani., M. Afzali. and M. Madadipour., "Effect of some synthetic fibers on the mechanical properties of mud brick", *Structural Analysis of Historical Constructions – Jerzy Jasieńko (ed) DWE, Proland*, 978-83-7125-216-7, 2012.
- [17] Ş. Yetgin, Ö. Çavdar, A. Cavdar, The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes, *Construction and Building Materials*, 22(3) (2008) 222-227.
- [18] Dowling Dominic., "Improved adobe mud brick", in application –child-care center construction in El Salvador, *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- [19] ASTM, Volume 04.08, Soil and Rock (I:D420-D5779), March 2003.
- [20] V. Maniatidis, P. Walker, A review of rammed earth construction, Innovation Project "Developing Rammed Earth for UK Housing", Natural Building Technology Group, *Department of Architecture & Civil Engineering*,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Please cite this article using:

A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipours , "Effect of reinforcement the mortar on adobe walls performance". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 403-415.

DOI:10.22060/ceej.2016.700