



## بررسی تأثیر سربار قائم بر رفتار دیوارهای خشتی تحت بار جانبی چرخه ای

علی میرجلیلی<sup>۱</sup>، رضا مرشد<sup>۲\*</sup>، ابوالفضل اسلامی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده عمران، دانشگاه یزد  
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد  
<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۱۶  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۴-۰۱  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۵-۰۲

### کلمات کلیدی:

دیوار خشتی  
مد شکست  
بار چرخه ای  
مقاومت جانبی  
میرایی چرخه‌ای

**خلاصه:** ساختمان های خشتی از بناهای آسیب‌پذیر در برابر بارهای جانبی محسوب می‌شوند، به طوری که خرابی آن‌ها در زلزله‌های گذشته با خسارت و تلفات جانی زیادی همراه بوده است. با این وجود، هنوز ساختمان های خشتی زیادی در مناطق لرزه‌خیز جهان از جمله در کشور ایران در حال استفاده است که بسیاری از آنها دارای ارزش تاریخی نیز هستند. لذا، شناخت رفتار این گونه ساختمان‌ها در برابر بارهای جانبی از اهمیت به‌سزایی برخوردار بوده و منجر به اتخاذ تصمیم مناسب در چگونگی حفظ بنا خواهد شد. در تحقیق حاضر رفتار جانبی دیوارهای ساخته شده از خشت و ملات گل که تحت اثر بار محوری ثابت قرار داشتند، تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۴ دیوار خشتی به طول ۱۰۰۰ میلی‌متر، ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر بودند. متغیر اصلی آزمایشگاهی، تنش محوری قائم روی نمونه‌های دیوار بود. نتایج آزمایشگاهی به صورت منحنی‌های چرخه‌ای بار-جابجایی، الگوی ترک‌خوردگی، مد شکست، افت سختی، اتلاف انرژی تجمعی و میرایی چرخه‌ای با یکدیگر مقایسه گردیدند. بر اساس نتایج تحقیق، میزان تنش محوری دیوار تأثیر زیادی روی نحوه شکست و رفتار دیوار خشتی تحت بارهای جانبی و در نتیجه اتخاذ روش مناسب مقاوم سازی دارد. با افزایش تنش محوری از ۰/۱ به ۰/۷ مگاپاسکال مد شکست از گهواره ای-برشی به برشی - فشاری تغییر کرد. همچنین با افزایش تنش محوری مقاومت جانبی افزایش اما جابجایی متناظر شکست کاهش یافت.

### ۱ - مقدمه

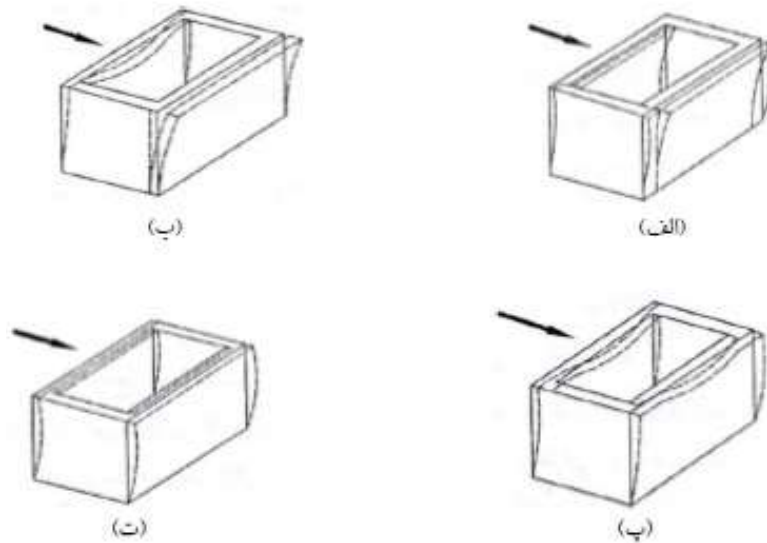
برخی از آن‌ها دارای قدمت و ارزش تاریخی نیز می‌باشند. در حال حاضر دو سوم بناهای موجود در بافت های تاریخی با ارزش کشور از سازه های خشتی تشکیل شده اند. ۳۰ درصد جمعیت جهان و ۵۰ درصد جمعیت جهان سوم در خانه های خشتی زندگی می کنند [۱]. بنابراین شناخت و بررسی رفتار این بناها از اهمیت بالایی برخوردار است.

سازه های خشتی معمولاً از دو عنصر سقف و دیوار تشکیل می‌شوند. سقف ها نقش انتقال بارهای قائم به دیوار را داشته و دیوارها علاوه بر تحمل بارهای قائم، نقش عناصر باربر جانبی را ایفا می‌کنند،

خشت به عنوان مصالح در دسترس و ارزان در بسیاری کشورها به عنوان ماده اصلی ساخت و ساز استفاده می گردیده است. امروزه نیز خشت به عنوان یک مصالح سبز شناخته شده که ضمن مقرون به صرفه بودن موجب کاهش گازهای گلخانه ای نیز می گردد. احیاء روشهای نوین استفاده از این مصالح با افزودن الیاف و مواد تثبیت کننده در حال بررسی و تحقیق است. سازه های خشتی طی سالیان متمادی به عنوان سرپناه قشر زیادی از مردم مورد استفاده قرار گرفته اند که

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: morshed@yazd.ac.ir





شکل ۱. تغییر شکل دیوار تحت اثر بارهای برون صفحه  
**Fig. 1. Wall displacements under the effect of off-plane loads**

مناسبتی به سقف متصل باشند. هنگامی که مقاومت کششی دیوار در اثر ضعف کششی مصالح به کار رفته یا در اثر اتصال نامناسب دیوارها با هم، کمتر از تلاش‌های ایجاد شده در این اعضا باشد، ترک‌های قائم در گوشه دیوارهایی که دچار خمش خارج از صفحه شده‌اند به وجود می‌آید. در این شرایط ارتعاش دیوارها یکی نبوده و دچار فروریختگی می‌شوند. (شکل ۱ الف تا ت)

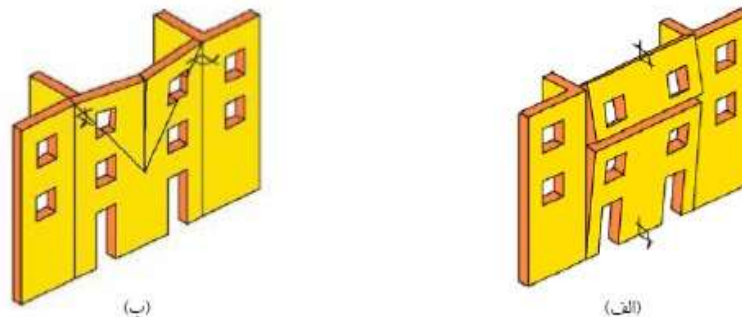
وجود اتصال مناسب بین دیوارها با یکدیگر و نیز با سقف مطابق شکل ۱-پ باعث ارتعاش دیوارها به طور هم‌زمان می‌گردد. با این وجود خمش خارج از صفحه دیوارها، باعث کاهش مقاومت ساختمان‌ها می‌شود. بدیهی است هنگامی که دیوارها به وسیله دال‌های بتن مسلح صلب و کلاف‌های افقی و قائم در تراز سقف و در محل تلاقی دیوارها به یکدیگر متصل هستند، رفتار بهتری خواهند داشت به طوری که در این حالت ارتعاش دیوارها به صورت هم‌زمان انجام می‌گردد (شکل ۱-ت) و خمش خارج از صفحه دیوارها محدودتر می‌شود. در این حالت هر دیوار از چهار طرف توسط تکیه‌گاه‌های صلب محصور شده و مقاومت ساختمان در برابر بارهای جانبی افزایش می‌یابد.

نیروهای زلزله وارد بر دیوارهای عرضی باعث ایجاد ترک‌های افقی و قائم در دیوار می‌گردد. بدیهی است نوع ترک ایجاد شده

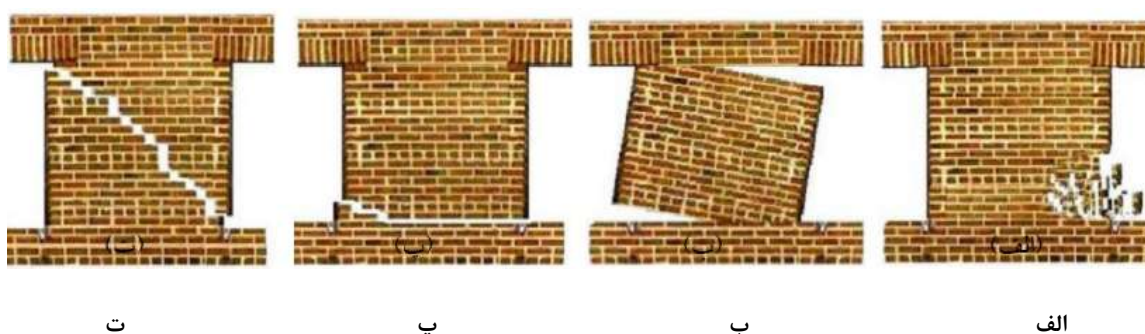
با توجه به تغییرات زیاد در رفتار خشت و سازه‌های خشتی به دلیل عدم وجود استاندارد مشخصی برای این گونه سازه‌ها و خصوصیات محلی مصالح، مطالعات آزمایشگاهی روش ارجح در ارزیابی و بررسی سازه‌های خشتی شناخته شده است [۲].

مکانیزم‌های گسیختگی دیوارهای بنایی غیرمسلح به دو دسته گسیختگی برون صفحه (تحت اثر نیروهای خارج از صفحه) و گسیختگی درون صفحه (تحت اثر نیروهای درون صفحه) تقسیم می‌شود. گسیختگی‌های داخل صفحه گسیختگی‌هایی هستند که در صفحه دیوار به وقوع پیوسته و باعث ایجاد ترک و یا حرکت جانبی در امتداد صفحه دیوار می‌شوند. خرابی‌های خارج صفحه نیز خرابی‌هایی هستند که باعث وقوع فروریختگی، واژگونی و یا حرکت دیوار در امتداد عمود بر صفحه خود می‌شوند.

از متداول‌ترین مدهای شکست در سازه‌های مصالح بنایی، شکست خارج از صفحه دیوارها می‌باشد. از آنجا که معمولاً دیوارها دارای مقاومت برشی مناسبی در داخل صفحه خود می‌باشند، در صورتی که توزیع سختی و مقاومت اعضایی که بار زلزله را تحمل می‌نمایند، به نحو مناسبی بوده و مشکل پیچش نیز موجود نباشد، تنها مود محتمل برای شکست، به صورت شکست خارج از صفحه دیوار خواهد بود. برای جلوگیری از این مود شکست باید دیوارهای عمود بر هم دارای اتصال مناسبی بوده و نیز تمامی دیوارها به نحو



شکل ۲. حالت های شکست خارج از صفحه دیوار، الف: ترک افقی (شکست طولی) و ایجاد قوس قائم، ب: ترک قائم (شکست عرضی) و ایجاد قوس افقی  
 Fig. 2. Off-plane failure modes of masonry walls: (a) Horizontal cracking (b) Vertical cracking



شکل ۳. مکانیزم های شکست درون صفحه ای دیوار بنایی، الف: شکست خردشدگی پنجه، ب: شکست بر اثر حرکت گهواره ای، پ: شکست لغزشی، ت: شکست قطری  
 Fig. 3. In-plane failure modes of masonry walls: (a) Toe crushing failure (b) Rocking motion failure (c) Slip failure (d) Diagonal failure

خمشی اتفاق می افتد. همچنین اگر مقدار بار قائم اندک باشد، در صورت زیاد بودن مقاومت برشی نیز شکست خمشی رخ می دهد. این نوع شکست شکل پذیری زیادی را برای دیوار به همراه ندارد و از مودهای غیر شکل پذیر محسوب می شود، این حالت از خرابی معمولاً بعد از حرکت گهواره ای و به دلیل ضعف مقاومتی که مصالح بنایی دارد به وقوع می پیوندد در شکل ۳-الف این نوع شکست به صورت شماتیک نشان داده شده است.

بلندشدگی (حرکت گهواره ای)

این نوع زوال در دیوارهای بنایی با نسبت لنگر خمشی به نیروی برشی زیاد و نیز در دیوارهایی با چسبندگی مناسب بین آجر و ملات و با نسبت طول به ارتفاع کم رخ می دهد. در این حالت پاشنه دیوار در اثر خمش زیاد، ترک خورده و دیوار مانند یک جسم صلب حول پنجه می چرخد. تغییر شکل های دیوار در این حالت پس از ترک خوردگی زیاد بوده و می تواند برای سیکل های زیادی پایدار باشد. همچنین

در دیوار بسته به نحوه اتصال دیوارها، سقف و همچنین فاصله بین تکیه گاه های عرضی دیوار خواهد داشت. (شکل ۲)

مودهای شکست درون صفحه یک دیوار بنایی شامل گسیختگی در اثر لغزش<sup>۱</sup> بندهای ملات، ترک خوردگی قطری<sup>۲</sup>، حرکت گهواره ای<sup>۳</sup> یا بلندشدگی دیوار و همچنین شکست فشاری پاشنه دیوار<sup>۴</sup> می باشد. این مکانیزم های شکست به ابعاد دیوار (نسبت ارتفاع به طول) شرایط تکیه گاهی، مقادیر بارهای قائم و افقی و مشخصات مصالح مصرفی بستگی دارد مودهای شکست درون صفحه دیوارهای بنایی در شکل ۳ نشان داده شده است.

خرد شدگی فشاری پنجه (شکست خمشی)

در صورتی که مقاومت خمشی دیوار به اندازه کافی نباشد و نیز نسبت ارتفاع به طول دیوار حدود ۲ به ۱ و بیشتر باشد، شکست

- 1 Sliding Failure
- 2 Shear Failure
- 3 Rocking Failure
- 4 Toe Crushing Failure

این مود گسیختگی (شکل ۳-ب) در دیوارهای ساخته شده با مصالح بنایی مقاوم، محتمل تر است.

لغزش بندهای افقی ملات (برشی- لغزشی)

در صورتی که مقاومت برشی دیوار، اندک و بار جانبی در مقایسه با بار قائم، بزرگ باشد شکست برشی-لغزشی رخ خواهد داد. این حالت شکست معمولاً در نسبت ارتفاع به طول دیوار  $1/5$  به  $1$  یا حدود  $1$  به  $1$  حادث می شود، این مود گسیختگی (شکل ۳-پ) یک مود شکل پذیر با اتلاف انرژی زیاد می باشد.

شکست قطری (رفتار برشی)

در صورتی که دیوار تحت بار قائم زیاد و نسبت ارتفاع به طول، کمتر از واحد باشد، مود شکست قطری محتمل خواهد بود. همچنین در نسبت ارتفاع به طول بزرگ تر از واحد (تقریباً برابر  $2$ ) و مقدار بار قائم زیاد نیز، امکان شکست قطری فراهم است. ترک های قطری می توانند از بین بندهای قائم و افقی دیوار یا از بین واحدهای آجرکاری و یا به صورت ترکیبی از این دو الگو، در راستای قطر دیوار گسترش یابند. در بیشتر اوقات ترک خوردگی در این نوع مکانیزم گسیختگی (شکل ۳-ت)، با سرعت زیاد و به صورت شکست ترد رخ می دهد و پس از آن باربری دیوار به سرعت کاهش می یابد. [۳]

طی سالیان گذشته تحقیقات زیادی به منظور بررسی خواص مکانیکی مصالح خشتی با استفاده از مصالح خشتی ساخته شده با روش های سنتی رایج در محل، و نیز کرگیری از خشت های موجود در سازه های قدیمی انجام گرفته است. ایلامپاس<sup>۱</sup> و همکاران [۴] اقدام به ساخت  $25$  آجر خشتی به ابعاد  $450 \times 300 \times 50$  میلی متر به دو روش نمودند و پس از برش نمونه هایی از آجرهای خشتی در اشکال استوانه ای، به قطر و ارتفاع  $50$  میلی متر، مکعبی به ابعاد  $50$  میلی متر و منشوری به ابعاد  $100 \times 100 \times 50$  میلی متر، خصوصیات مکانیکی خشت را مورد ارزیابی قرار دادند. سیلوپرا<sup>۲</sup> و همکاران [۵] با نمونه گیری از دیوار محوطه باغ ها و ساختمان های خشتی، نمونه های استوانه ای با قطرهای بین  $80$  الی  $90$  میلی متر با نسبت ارتفاع به قطر تقریباً  $2$  تهیه نمودند و با انجام آزمایش های فشاری و کششی با کمک آزمایش برزلی نسبت به بررسی رفتار تنش کرنش نمونه ها پرداختند. آدورنی<sup>۳</sup> و همکاران [۶] با انجام یک تحقیق میدانی در

1 Illampas  
2 Silveira  
3 Adorni

منطقه باستانی قلعه نیسا واقع در کشور ترکمنستان، اقدام به نمونه برداری از خشت های تاریخی نموده و از نظر مشخصات فیزیکی و کانی شناسی نمونه ها را ارزیابی نمودند. در تحقیقی دیگر، سیلوپرا و همکاران [۷] با نمونه گیری از  $3$  ساختمان قدیمی، تعداد  $30$  خشت برای آزمایش های خود تهیه کردند.  $10$  نمونه اول از یک سازه نوسازی شده با خشت هایی به ابعاد  $410 \times 280 \times 130$  میلی متر و وزن مخصوص  $16/2$  کیلونیوتن بر متر مکعب،  $10$  نمونه دوم از یک ساختمان تخریب شده با خشت هایی به ابعاد  $460 \times 320 \times 120$  میلی متر و وزن مخصوص  $15$  کیلونیوتن بر متر مکعب و  $10$  نمونه آخر از یک ساختمان در حال تخریب با خشت هایی به ابعاد  $440 \times 240 \times 120$  میلی متر و وزن مخصوص  $15/1$  کیلونیوتن بر متر مکعب تهیه گردید. سپس به وسیله اره کردن و مغزه گیری نمونه هایی برای انجام آزمایشات فشاری، کششی برزلی و خمشی تهیه و مورد آزمایش قرار دادند.

واریوم<sup>۴</sup> و همکاران [۸] رفتار کلی ساختمان های خشتی را با انجام آزمایشاتی بر روی ساختمان هایی با مقیاس واقعی مورد بررسی قرار دادند. تحقیقاتی نیز در زمینه تقویت دیوارهای خشتی و بنایی با مش های پلیمری نصب شده در دو طرف دیوار انجام گرفته است و به بهبود رفتار این دیوارها تحت بارهای چرخه ای اشاره شده است [۱۱-۹]. وو<sup>۵</sup> و همکاران [۲] به بررسی رفتار هیستریزس دیوارهای خشتی به ارتفاع  $1300$  و با طول های  $1650$ ،  $1750$  و  $2000$  میلی متر تحت بارهای چرخه ای پرداختند. بدین منظور نمونه های دیوار تحت سربارهای  $0$ ،  $0/47$  و  $0/94$  مگاپاسکال و بارهای جانبی چرخه ای مورد آزمایش قرار گرفتند. خشت های مورد استفاده برای ساخت دیوارها به ابعاد  $200 \times 90 \times 50$  میلی متر و با مقاومت فشاری متوسط  $1/66$  مگاپاسکال بودند. نتایج نشان داد با افزایش نسبت ارتفاع به طول، مود شکست از قطری-برشی به لغزشی تغییر یافته و همچنین ضریب شکل پذیری افزایش می یابد.

سیلوپرا و همکاران [۱۲] دیواری را در مقیاس واقعی با مقطع I شکل (استفاده از مقطع I شکل برای مدل سازی اتصال متعامد دیوارها به یکدیگر بوده است.) تحت بارگذاری جانبی چرخه ای و سربار قائم  $19/7$  کیلوپاسکال مورد آزمایش قرار دادند. دیوار مورد آزمایش به ارتفاع  $3/07$ ، طول جان  $3/5$ ، طول بال  $1/7$  و ضخامت

4 Varum  
5 Feng Wu

جدول ۱. نامگذاری دیوارها  
Table 1. Wall specimens

ارتفاع (mm)	تنش محوری (MPa)	نمونه
۹۰۰	۰/۱	W۹۰-۱
	۰/۳	W۹۰-۳
	۰/۵	W۹۰-۵
	۰/۷	W۹۰-۷

معمولی ۱۶/۶ و مسلح شده با درصد کاه ۰/۸، ۲۱/۰۵ کیلونیوتن بود که ۲۶/۷۸ درصد افزایش در بار و ۹۴/۲۲ درصد در جذب انرژی بدست آمد. رفتار نمونه های مسلح شده در زمان شکست به صورت توزیع ترک در کل نمونه بر خلاف نمونه ساده با ترک عمیق در محل بود.

مرور تحقیقات گذشته بر روی رفتار دیوارهای خشتی نشان می‌دهد که مطالعات محدودی در خصوص تاثیر سربار قائم بر روی رفتار چرخه ای دیوار صورت گرفته است. علاوه بر آن، خشت های مورد استفاده در تحقیقات گذشته از نظر ابعاد و مصالح تشکیل دهنده متفاوت از خشت های سنتی مورد استفاده در ساختمان های خشتی ایران می باشند به طوری که در برخی از آن ها از ترکیبات آهکی، مخلوط خاک دانه بندی شده و الیاف استفاده گردیده، در حالی که خشت های ایران از ترکیب خاک رس و ماسه بادی ساخته شده اند. در این تحقیق با در نظر گرفتن محدوده تنش های قائم محتمل وارد بر دیوارهای خشتی، رفتار چرخه ای و مدهای شکست این دیوارها تحت تنش های قائم ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ مگاپاسکال، بررسی می گردد.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات نمونه ها

نمونه های دیوار خشتی با نسبت ابعادی حدود یک سوم و به طول یک متر، ارتفاع ۹۰۰ و عرض ۲۰۰ میلی متر ساخته شدند. این نمونه های دیوار خشتی، تحت تنش های قائم ثابت ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ مگاپاسکال و بارگذاری جانبی چرخه ای آزمایش شدند. نحوه نام گذاری نمونه ها و مشخصات آن ها در جدول ۱ ارائه شده است.

ساخت نمونه ها و خشت ها توسط استادکاران محلی با تجربه کافی در زمینه دیوار چینی با مصالح خشتی انجام شد. چیدمان خشت ها به صورتی انجام گرفت که تمامی جزئیات اجرایی که در ساخت دیوارهای قدیمی به کار گرفته می شد رعایت گردد. در ساخت نمونه ها ضخامت درز ملات ها تقریباً برابر ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد. در فرآیند ساخت نمونه ها، سعی شد تا تمامی نمونه ها با ابعاد یکسان ساخته شود و خطاهای انسانی به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد. بدین منظور ساخت نمونه ها به صورت همزمان و با استفاده از سکوی طولی مناسب صورت پذیرفت. شکل ۴ نمایی از سکوی ساخت

جان ۰/۲۹ متر از خشت های جمع آوری شده از یک سازه قدیمی به ابعاد ۱۲۰×۲۴۰×۴۴۰ میلی متر ساخته شده بود. بر اساس نتایج آزمایشات، مود خرابی دیوار به صورت کشش قطری و حداکثر ظرفیت آن برابر ۵۸/۱ کیلونیوتن به دست آمد.

کاپوزوکا<sup>۱</sup> [۱۳] توسط برش از یک سازه قدیمی اقدام به تهیه خشت هایی با مقاومت ۳/۴۳ مگاپاسکال به ابعاد ۱۷×۵۰×۱۰۰ میلی متر و در مقیاس ۱ به ۳ نمود. سپس با ساخت ۱۲ عدد دیوارچه به ابعاد ۵۰×۱۹۵×۲۰۵ میلی متر و ۶ دیوار با مقطع T شکل به ابعاد ۵۰×۶۳۰×۶۳۰ رفتار آن ها را بررسی نمود. دیوارچه ها تحت نسبت های مختلف تنش های نرمال اصلی مورد آزمایش واقع گردیدند که ترک های مشاهده شده در آن ها به صورت شکافت در وسط نمونه و ترک های لغزشی در ملات بود. دیوارها به صورت T شکل ساخته شدند تا از ترک های خمشی جلوگیری شود سپس با اعمال سربارهای فشاری ۰/۵، ۰/۷۵، ۰/۳، ۱/۱۵، ۲/۲۵ و ۳ مگاپاسکال، تحت نیروی برشی یک طرفه قرار گرفتند. ظرفیت برشی نمونه ها به ترتیب مقادیر ۱۷/۵، ۱۹، ۱۸، ۴۵، ۶۰ و ۶۰ کیلونیوتن به دست آمد. وطنی اسکویی و همکاران [۱۴] با ساخت ۱۲ دیوار خشتی با ملات معمولی و مسلح شده با کاه به درصدهای مختلف نسبت به بررسی مقاومت کششی نمونه ها تحت آزمایش کشش قطری پرداختند. خشت های به کار رفته در آزمایش به ابعاد ۷×۲۲۰×۲۲۰ و ۷×۱۱۰×۲۲۰ میلی متر با متوسط مقاومت فشاری ۴/۳۷ و ۳/۲۹ مگاپاسکال بود. ملات در دو نوع ساده و مسلح شده با درصد های مختلف الیاف کاه اشباع با سطح خشک به ترتیب ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ ساخته شد که متوسط مقاومت فشاری معمولی و مسلح شده به ترتیب ۳/۰۸ و ۱/۸۲ مگاپاسکال بود. حداکثر بار اعمالی به نمونه های

1 Capozucca



محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. سپس نمونه‌های خشک شده دیوار خشتی تحت آزمایش قرار گرفتند.

### ۲-۲- مشخصات مصالح

مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه های دیوار کاملاً مشابه مصالح رایج ساختمان های خشتی یزد بودند. بدین منظور از خشت های خام به ابعاد  $۲۰۰ \times ۲۰۰ \times ۴۵$  میلی متر و ملات گل استفاده شد. در ساخت ملات از نسبت حجمی ۱ به ۱ خاک رس و ماسه با نسبت آب به گل  $۰/۵$  استفاده شد. جدول ۲ نتایج مقاومت فشاری مصالح مصرفی شامل خشت، ملات گل و منشور خشتی را نشان می‌دهد. این نتایج به صورت میانگین مقاومت های به دست آمده از ۳ نمونه مکعبی ملات، ۴ نمونه خشت و ۶ نمونه منشور خشتی می باشد را ارائه می کنند.

مقاومت فشاری ملات بر اساس مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه مکعب استاندارد به ابعاد  $۵۰ \times ۵۰ \times ۵۰$  میلی متر و بر اساس استاندارد ملی شماره ۲۱۰۸۲ [۱۵] و مقاومت فشاری نمونه های خشت بر اساس آزمایش نمونه‌ها بصورت ایستاده بدست آمده است. همچنین جهت تعیین مقاومت فشاری منشور خشتی از نمونه هایی با ترکیب ۵ ردیف خشت و ۴ ردیف ملات استفاده گردید. در انجام این آزمایش‌ها از استانداردهای ASTM C617 [۱۶]، ASTM C472-06 [۱۷] و ASTM C1314-16 [۱۸] استفاده شد. شکل ۵ نمونه های مورد استفاده برای تعیین مقاومت فشاری منشور خشتی را نشان می دهد.

### ۲-۳- نحوه آزمایش

شکل ۶ چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. بارگذاری قائم روی نمونه های دیوار توسط جک دستی و یک تیرورق قوی برای انتقال یکنواخت بار قائم به نمونه ها صورت گرفت. اتکای تیرورق روی نمونه های دیوار به صورت غلتکی بود تا امکان جابجایی آزادانه افقی دیوار فراهم گردد. پس از اعمال بار فشاری قائم ثابت توسط جک دستی، بار جانبی توسط دستگاه اکچوپتور به صورت رفت و برگشتی و با کنترل تغییر مکان اعمال گردید و تغییرات بار جانبی اعمالی در برابر جابجایی دیوار ثبت شد.

با توجه به تحقیقات گذشته [۱۱، ۱۹]، در بارگذاری جانبی از فرکانس  $۰/۱$  هرتز و گام های افزایش جابجایی  $۲/۵$  میلی متر و به



شکل ۴. سکوی طولی جهت ساخت هم زمان نمونه ها  
Fig. 4. Wall making platform

جدول ۲. مقاومت فشاری متوسط مصالح مصرفی در تحقیق  
Table 2. Average compressive strength of materials used

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)
ملات	۳/۳۱
خشت	۳/۶۱
منشور خشتی	۲/۳۲

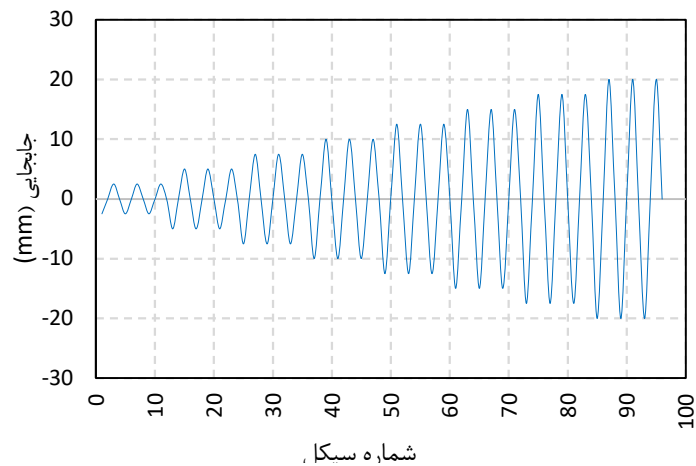


شکل ۵. نمونه های مورد استفاده برای تعیین مقاومت فشاری منشور خشتی  
Fig. 5. Adobe prism specimens for compression test

نمونه ها را نشان می دهد. بعد از ساخت، نمونه ها به منظور خشک شدن به مدت ۴۵ روز در



شکل ۶. نحوه بارگذاری  
Fig. 6. Test setup



شکل ۷. پروتکل بارگذاری با فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز و گام های افزایشی ۲/۵ میلی متر  
Fig. 7. Loading regime with 0.1 Hz frequency and 2.5 mm incremental displacement

بود، اندازه گیری می گردید.

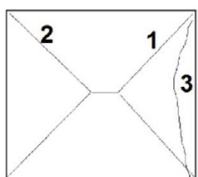
صورت رفت و برگشتی با کنترل جابجایی مطابق شکل ۷ استفاده گردید.

### ۳- ارائه و تحلیل نتایج

اندازه گیری و کنترل تنش محوری و نیروی جانبی با کمک از دو عدد نیروسنج نصب شده بر روی جک های افقی و عمودی صورت پذیرفت. برای ثبت تغییر شکل جانبی و بلندشدگی ۳ عدد جابجایی سنج برای تعیین حرکت عمودی، و یک عدد برای تعیین جابجایی افقی بر روی نمونه نصب شد. همچنین نیروی محوری در مهار تیر ورق نیز توسط یک عدد کرنش سنج که به روی مهار چسبانیده شده

#### ۳-۱- الگوی ترک خوردگی و مد شکست

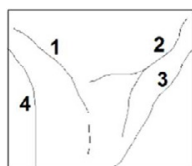
در شکل ۸ الگوی شکست و مراحل ترک خوردگی نمونه های دیوار نشان داده شده است. نمونه W۹۰-۱ از ابتدای آزمایش با بلندشدگی در طرفین مواجه گردید به گونه ای که در اثر کشش در امتداد ۱ و ۲ مطابق شکل ۸ (الف) دچار ترک خوردگی شد. سپس در زمان



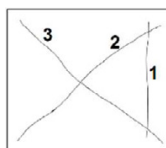
ب:W3-90



الف:W1-90



ت:W7-90



پ:W5-90

شکل ۸. الگوی ترک خوردگی نمونه‌های دیوار خشتی  
Fig. 8. Cracking patterns of adobe wall specimens

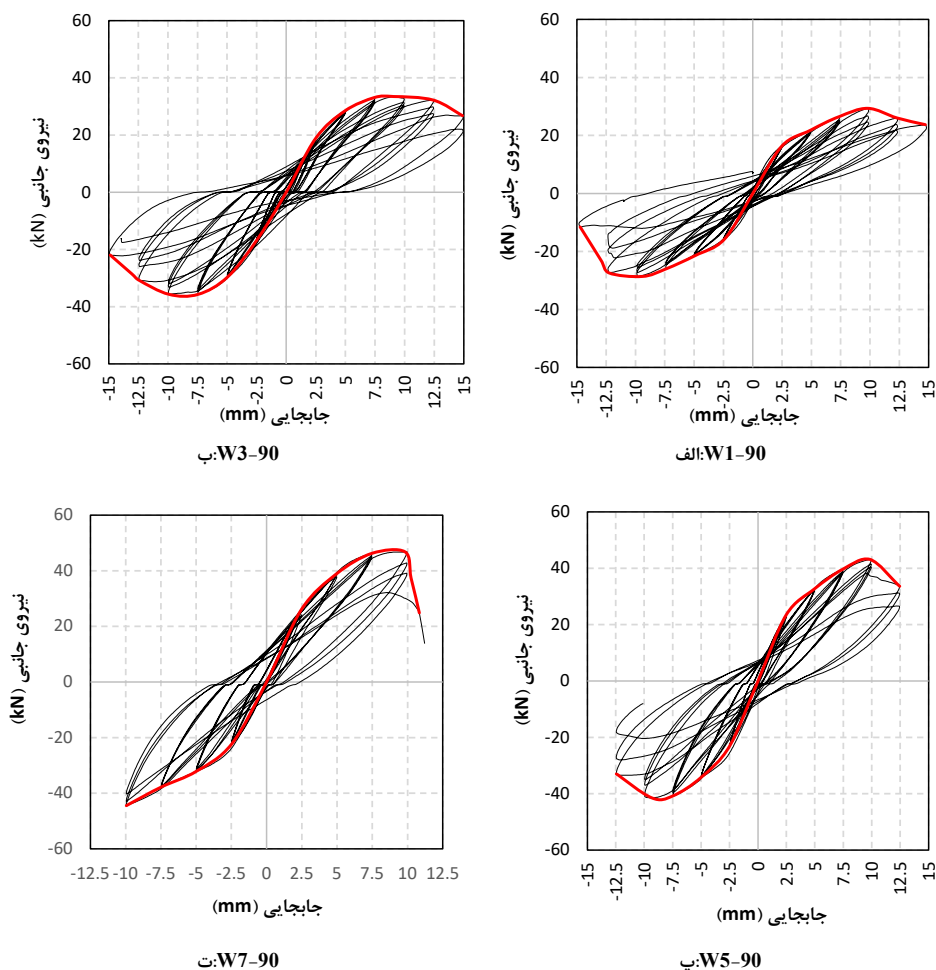
نمونه تا لحظه خرابی به صورت گهواره ای-برشی بود. نمونه W۹۰-۵ به دلیل تنش محوری بالاتر فاقد حرکت گهواره ای از زمان شروع آزمایش بود. مطابق شکل ۸ (پ)، اولین آثار ترک به صورت فشاری در زمان هل دادن جک و سیکل ۷ با جابجایی ۲/۵ میلی‌متر و نیروی ۲۳/۰ کیلونیوتن بر روی دیوار ظاهر گردید. سپس رفتار نمونه به برشی تغییر یافته و در سیکل ۸ و با جابجایی ۰/۸ میلی‌متر و نیروی ۰/۳ کیلونیوتن دچار ترک قطری در زمان کشش جک گردیده و تا ترک قطری دوم در سیکل ۱۰ با جابجایی ۴/۳ میلی‌متر و نیروی ۳۰/۵۹ کیلونیوتن در مسیر هل دادن جک ادامه پیدا نمود. حداکثر ظرفیت باربری این نمونه در فشار ۴۱/۵ و در کشش ۴۳/۱ کیلونیوتن بوده که به ترتیب در جابجایی های ۹/۳۴ و ۹/۸۴ میلی‌متر اتفاق افتاد. رفتار این نمونه تا لحظه خرابی به صورت فشاری-برشی بود.

نمونه W۹۰-۷ به دلیل تنش بالای محوری با مود فشاری- برشی رفتار نمود به گونه ای که مطابق شکل ۸ (ت) در سیکل ۵ و در جابجایی ۲/۰۴ میلی‌متر و نیروی متناظر ۲۲/۶ کیلونیوتن اولین ترک

هل دادن جک و در جابجایی ۱۱/۹ میلی‌متر و نیروی معادل ۲۲/۱ کیلونیوتن در سیکل ۱۴ دچار ترک قطری در امتداد ۳ و خرد شدگی پاشنه در ناحیه ۴ گردید. در ادامه روند بارگذاری، حرکت دیوار حول نقطه ۵ ادامه داشت. حداکثر ظرفیت باربری جانبی این نمونه در فشار برابر ۲۸/۶ و در کشش برابر ۲۹/۳ کیلونیوتن بوده که به ترتیب در جابجایی هایی برابر ۹/۸ و ۹/۸ میلی‌متر اتفاق افتاد. رفتار این نمونه تا لحظه خرابی به صورت گهواره ای- برشی بود.

نمونه W۹۰-۳ از ابتدا با حرکت خفیف گهواره ای شروع به نوسان نمود، اولین ترک قطری در سیکل ۸ و زمان کشیدن جک و در جابجایی ۳/۹۳ میلی‌متر و نیروی متناظر ۲۱/۴ کیلونیوتن و ترک دوم در همان سیکل و در زمان هل دادن جک با جابجایی ۱/۰۳ میلی‌متر و نیروی متناظر ۶/۳ کیلونیوتن نمایان گردید. در پایان و پس از افت ۲۰ درصد نیروی جانبی حداکثر، در زمان هل دادن جک، ناحیه ۳ مطابق شکل ۸ (ب) دچار جداشدگی گردید؛ حداکثر ظرفیت باربری این نمونه در فشار ۳۵/۷ و در کشش ۳۳/۵ کیلونیوتن بوده که به ترتیب در جابجایی های ۹/۹ و ۹/۱ میلی‌متر اتفاق افتاد. رفتار این





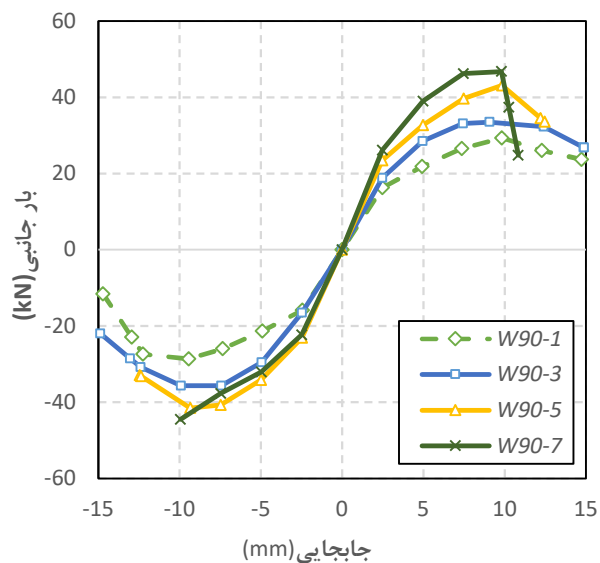
شکل ۹. منحنی‌های چرخه ای نمونه‌های دیوار خشتی  
**Fig. 9. Hysteresis curves of adobe wall specimens**

برشی-فشاری در دیوار ظاهر شد و با ادامه یافتن آزمایش ترک‌های راستای ۲ و ۳ در زمان کشیدن جک در نمونه ظاهر گردیدند، سپس با تخریب ناحیه ۴ و افت ۲۰ درصدی نیروی حداکثر جانبی آزمایش به پایان رسید. حداکثر ظرفیت باربری این نمونه در فشار ۴۴/۵ و در کشش ۴۶/۸ کیلونیوتن بوده که به ترتیب در جابجایی‌های ۱۰ و ۹/۸ میلی‌متر اتفاق افتاد. رفتار این نمونه تا لحظه خرابی به صورت برشی-فشاری بود.

بررسی مد شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش نیروی محوری مد شکست از حالت گهواره‌ای و خرد شدن پاشنه به مد شکست فشاری-برشی تغییر یافته است.

### ۳-۲- نمودارهای بار-تغییر مکان جانبی

در شکل ۹ منحنی‌های چرخه ای بار-جابجایی نمونه‌ها ارائه

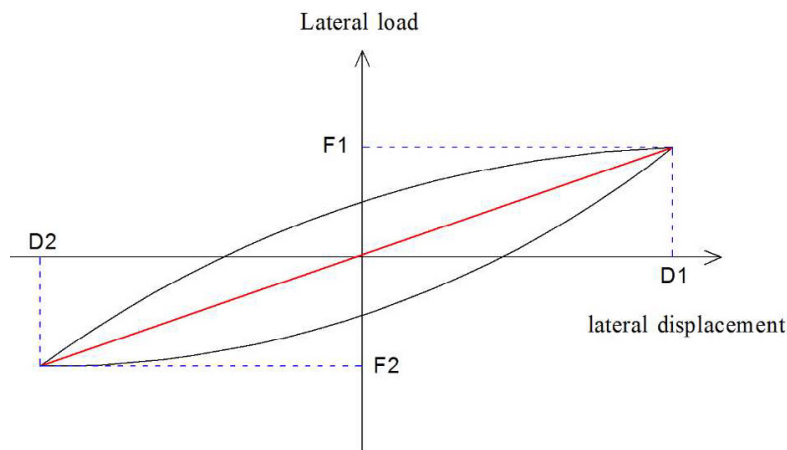


شکل ۱۰. مقایسه پوش منحنی‌های بار-جابجایی  
**Fig. 10. The envelopes of hysteretic load-displacement curves**

جدول ۳. مقایسه متوسط مقاومت جانبی و جابجایی حداکثر نمونه‌ها

Table 3. Comparison of average compressive strength and maximum displacements

نمونه		تنش محوری (MPa)			
		۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷
W90	جابجایی حداکثر (mm)	۱۳/۸	۱۴/۰	۱۲/۳	۱۰/۱
	مقاومت جانبی (kN)	۲۹/۰	۳۴/۶	۴۲/۳	۴۵/۶



شکل ۱۱. نحوه تعیین سختی از روی سیکل‌های نمودار چرخه ای

Fig. 11. Equivalent stiffness of cyclic load-displacement curve

که در این رابطه  $K_i$  ضریب سختی سیکل،  $F_1$  نیروی حداکثر هر سیکل و  $D_1$  جابجایی متناظر در نیروی حداکثر می باشد. حلقه اول از هر سیکل سه تایی بارگذاری برای محاسبه در نظر گرفته شد و بر این اساس تغییرات سختی در بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌ها در شکل ۱۱ مورد مقایسه قرار گرفته است. همان گونه که در شکل ۱۲ مشخص است، سختی جانبی نمونه‌های با تنش محوری بالاتر بیشتر است و این سختی با افزایش تغییر شکل جانبی کاهش می یابد. البته شیب یا سرعت کاهش سختی برای نمونه‌ها قدری تفاوت دارد و برای نمونه‌های با تنش محوری بالاتر کمی بیشتر است.

#### ۳-۴- اندرکنش تنش محوری و مقاومت جانبی

همان گونه که انتظار می رفت، تنش محوری تأثیر به سزایی بر روی مقاومت جانبی نمونه‌های دیوار داشت به طوری که با افزایش بار مجوری مقاومت جانبی دیوار نیز افزایش می‌یابد. در شکل ۱۳ نتایج بدست آمده از آزمایشات در محدوده تنش های محتمل دیوار

شده است. همچنین پوش منحنی‌های بار-جابجایی در شکل ۱۰ مورد مقایسه قرار گرفته است. با افزایش تنش محوری دیوار خستگی مقاومت جانبی زیاد گردید در حالی که جابجایی متناظر با شکست نمونه‌ها کاهش یافت. این مقادیر در جدول ۳ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با توجه به پوش منحنی‌های چرخه ای، مقاومت جانبی حداکثر نمونه‌های دیوار در تغییر مکان جانبی ۷/۵ تا ۱۰ میلی متر که متناظر با دریافت نسبی حدود ۱٪ است به دست آمده است.

#### ۳-۳- کاهش سختی

سختی جانبی نمونه که به صورت مقاومت در برابر تغییرشکل جانبی واحد تعریف می‌گردد، در یک بارگذاری رفت و برگشتی به دلیل گسترش ترک خوردگی و خرابی تغییر می کند. برای رفتار چرخه‌ای می‌توان مطابق شکل شیب خط واصل بین نقطه حداکثر مثبت و منفی نمودار هیستریزس در یک سیکل را به عنوان سختی به صورت رابطه (۱) تعریف نمود [۲۰].

$$K_i = \frac{F_{i1} - F_{i2}}{D_{i1} - D_{i2}} \quad (1)$$

خشتی به همراه رابطه خطی برآزش شده بین این دو پارامتر ترسیم شده است. در رابطه برآزش شده،  $P$  میزان تنش محوری و  $V$  مقاومت جانبی می باشد.

### ۳-۵- اتلاف انرژی تجمعی

اتلاف انرژی توسط سازه در زمان وقوع زمین لرزه منجر به کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه می‌گردد. اتلاف انرژی در هر سیکل بارگذاری چرخه‌ای را می‌توان از طریق محاسبه سطح محصور حلقه‌های نمودار هیستریزس به دست آورد و اتلاف انرژی تجمعی از جمع انرژی‌های تلف‌شده سیکلی محاسبه می‌گردد. در شکل ۱۴ منحنی‌های انرژی تجمعی تا تغییرشکل نهایی نمونه‌ها مقایسه گردیده است. هرچند در سیکل‌های اولیه بارگذاری اتلاف انرژی در نمونه‌های با تنش محوری بالاتر بیشتر بوده است ولی در نهایت بیشترین اتلاف انرژی چرخه‌ای مربوط به نمونه با تنش محوری  $0/3$  مگاپاسکال در سیکل با دامنه  $10$  میلی‌متر بود. در این نمونه در عین حال که لغزش‌های اصطکاکی قابل توجه منجر به اتلاف انرژی گردید، تنش فشاری آنقدر زیاد نبود که منجر به شکست فشاری زود هنگام نمونه گردد.

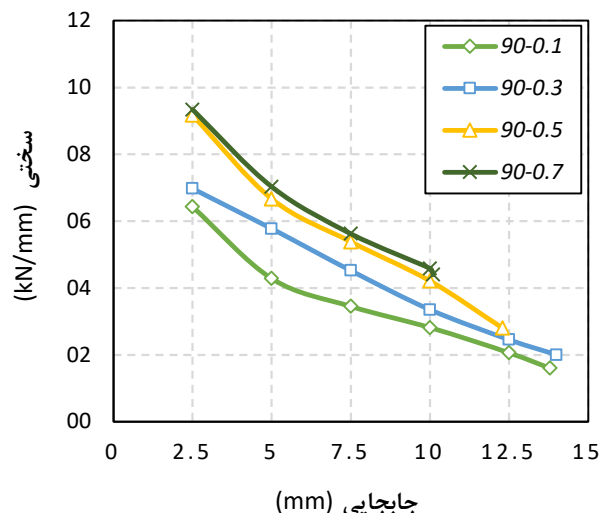
### ۳-۶- نسبت میرایی معادل

در اثر اعمال بار رفت و برگشتی به نمونه بخشی از انرژی اعمالی در اثر تغییرشکل و ترک‌های داخلی در دیوار تلف و بخشی نیز به صورت الاستیک ذخیره می‌گردد. نسبت میرایی چرخه‌ای را می‌توان به عنوان معیاری برای سنجش میزان اتلاف انرژی در هر سیکل با توجه به شکل ۱۵ به صورت رابطه (۲) محاسبه نمود [۲۱].

$$\xi_{eqi} = \frac{E_i}{2\pi F_i D_i} \quad (2)$$

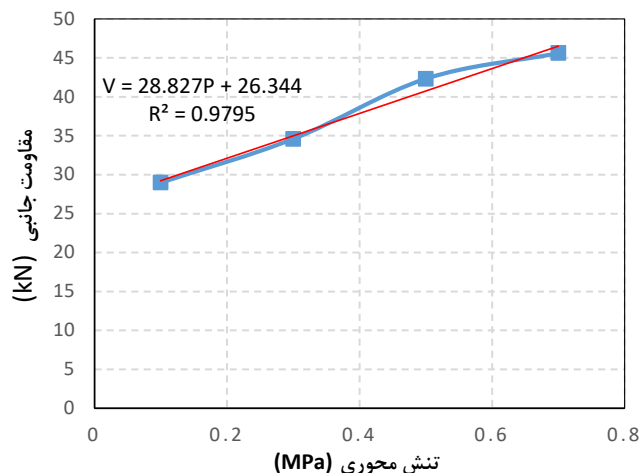
که در این رابطه  $\xi_{eqi}$  نسبت میرایی چرخه‌ای در هر سیکل،  $E_i$  انرژی اتلاف شده در سیستم و  $F_i D_i$  حاصلضرب حداکثر متوسط نیروی حداکثر سیکل در جابجایی متوسط متناظر می‌باشد که بیان‌کننده نیروی الاستیک اعمالی به مجموعه می‌باشد.

با توجه به مفاهیم بالا، منحنی‌های نسبت میرایی نمونه‌ها بر اساس حلقه اول از هر دامنه تغییر مکان اعمالی در شکل ۱۶ نشان داده شده است.



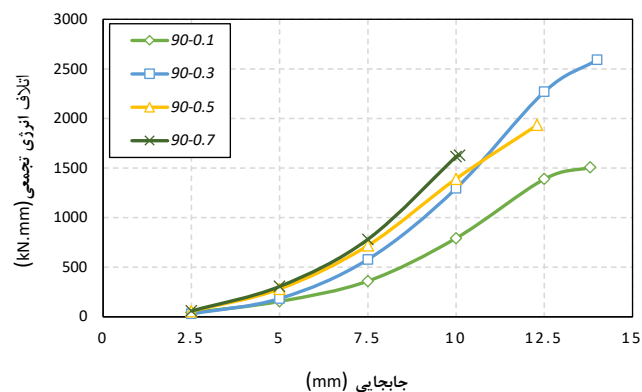
شکل ۱۲. مقایسه تغییرات سختی نمونه‌ها

Fig. 12. Comparison of stiffness degradation of specimens



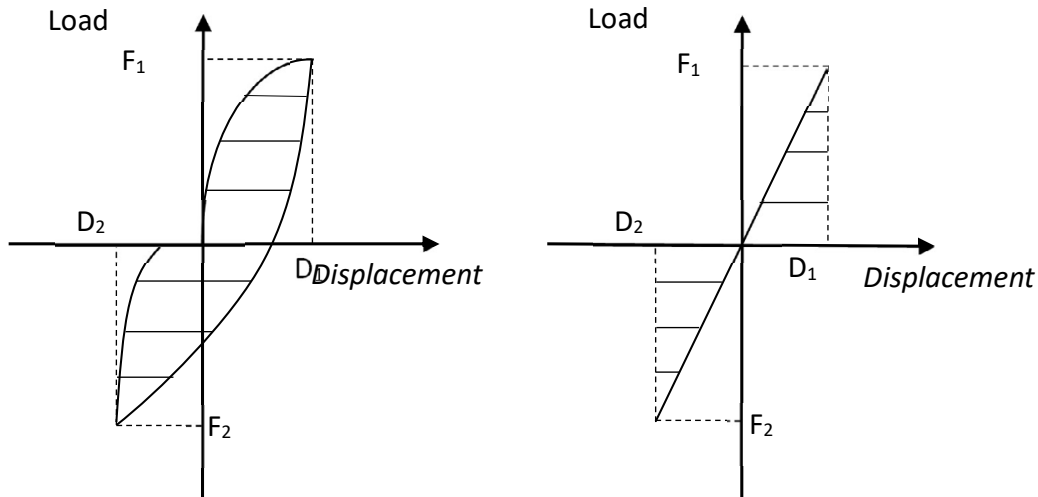
شکل ۱۳. نمودار اندرکنش تنش محوری و مقاومت جانبی

Fig. 13. Interaction of lateral strength and axial stresses



شکل ۱۴: مقایسه منحنی‌های اتلاف انرژی تجمعی نمونه‌های دیوار

Fig. 14. Comparison of cumulative energy dissipation curves

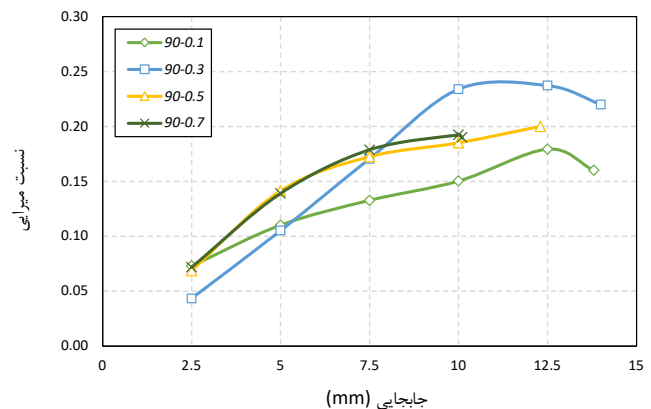


شکل ۱۵. انرژی الاستیک و انرژی تلف‌شده در هر سیکل بار  
 Fig. 15. Elastic energy and dissipated energy per cycle

#### ۴- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق که بخشی از یک تحقیق گسترده در رابطه با دیوارهای خشتی در دانشکده عمران دانشگاه یزد می‌باشد، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر بار محوری بر رفتار جانبی دیوارهای خشتی پرداخته شد. بدین منظور ۴ دیوار خشتی تحت اثر توأم تنش‌های محوری ثابت ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ مگاپاسکال و بارگذاری جانبی چرخه‌ای با افزایش دامنه ۲/۵ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفتند. بر اساس بررسی نتایج آزمایش‌ها، نتیجه‌گیری‌های زیر به عمل آمد:

- ۱- با افزایش تنش محوری در محدوده تنش‌های محوری مورد آزمایش، ظرفیت باربری جانبی نمونه‌های دیوار خشتی افزایش یافت. حداکثر میزان افزایش در تنش محوری ۰/۷ مگاپاسکال نسبت به تنش محوری ۰/۱ مگاپاسکال و در حدود ۵۷٪ بود.
- ۲- با افزایش تنش محوری، مد شکست از گهواره‌ای-برشی به برشی-فشاری تغییر یافت.
- ۳- با افزایش تنش محوری، حداکثر تغییر شکل جانبی قابل تحمل توسط دیوارهای خشتی کاهش یافت. جابجایی حداکثر دیوار با تنش محوری ۰/۷ مگاپاسکال تا حدود ۲۸٪ کاهش یافت.
- ۴- حداکثر ظرفیت باربری جانبی نمونه‌های دیوار مستقل از تنش محوری و در دریافت نسبی حدود ۱٪ به دست آمد.
- ۵- سختی جانبی نمونه‌های دیوار خشتی با افزایش تنش محوری افزایش یافت که البته این سختی با افزایش دامنه تغییرمکان



شکل ۱۶. نسبت میرایی چرخه‌ای نمونه‌های دیوار خشتی  
 Fig. 16. Cyclic damping ratio of wall specimens

محدوده‌ی نسبت میرایی چرخه‌ای دیوارهای خشتی آزمایش شده در این تحقیق ۰/۰۴ الی ۰/۲۴ بود که در مقایسه با دیوارهای بنایی آجری با محدوده ۰/۰۵ الی ۰/۱۶ [۲۲] و دیوارهای بنایی بتن مسلح با محدوده ۰/۰۸ الی ۰/۳ [۲۳] از قابلیت مناسبی در استهلاک انرژی برخوردار بودند. در جابجایی‌های کم نسبت میرایی دیوارهای با تنش محوری بالا بیشتر بود اما در جابجایی‌های بیشتر دیوار خشتی با تنش محوری ۰/۳ مگاپاسکال بیشترین میرایی را نشان داد. نسبت میرایی در نمونه با کمترین بار محوری از بقیه نمونه‌ها کمتر بود که دلیل آنرا می‌توان به رفتار گهواره‌ای دیوار تحت بارهای چرخه‌ای نسبت داد.



- [7]-Dora Silveira, Humberto Varum, Aníbal Costa, "Influence of the testing procedures in the mechanical characterization of adobe bricks," *Construction and Building*, vol. 40, p. 719–728, 2013.
- [8]-Humberto Varum, Aníbal Costa, Jorge Fonseca, André Furtado, "Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction," *ScienceDirect*, vol. 114, pp. 714-721, 2015.
- [9]-Mohamed A. ElGawady, Pierino Lestuzzi, Marc Badoux, "Static Cyclic Response of Masonry Walls Retrofitted with Fiber-Reinforced Polymers," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 50, 2007.
- [10]-A. Figueiredo • H, Varum • A. Costa, D. Silveira, C. Oliveira, "Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall," *Materials and Structures*, vol. 46, pp. 203-219, 2013.
- [11]-Stanislav Hrac̆ov , Stanislav Pospı's'il, Angelo Garofano, Shota Urushadze, "In-plane cyclic behaviour of unfired clay and earth brick walls in both unstrengthened and strengthened conditions," *Materials and Structures*, vol. 49, p. 3293–3308, 2016.
- [12]-Dora Silveira, Humberto Varum, Anibal Costa, Henrique Pereira, Laura Sarchi & Ricardo Monteiro, "Seismic behavior of two Portuguese adobe buildings: Part I - in-plane cyclic testing of a fullscale adobe wall," *International Journal of Architectural Heritage*, 2018.
- [13]-R. Capozucca, "Experimental response of historic brick masonry under biaxial loading," *Construction and Building Materials*, vol. 154, p. 539–556, 2017.
- [14]-A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M.R. Madadipour, A. Bakhshi, "Experimental Investigation on Mud Brick Walls with Mortar Containing Straw Fibers," *Sharif J. of Civil Engineering*, 1395, pp. 65-73.
- [15]-"Determination of compressive strength of chemical-resistant mortars, grouts, monolithic surfacings, and polymer concretes," *Iranian National Standardization Organization*, vol. INSO 21082, 2016.
- [16]-ASTM, "Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens," ASTM, 2003.
- [17]-ASTM, "Standard Test Methods for Physical Testing
- جانبی سریعاً کاهش یافت. سرعت کاهش سختی نیز در نمونه‌های با تنش محوری بالاتر بیشتر بود.
- ۶- در سیکل های اولیه بارگذاری چرخه‌ای اتلاف انرژی در نمونه‌های دیوار با تنش محوری بالاتر بیشتر بود اما با افزایش دامنه تغییرمکان بیشترین اتلاف انرژی در نمونه با تنش محوری ۰/۳ مگاپاسکال مشاهده گردید. کمترین اتلاف انرژی نیز مربوط به نمونه دیوار با کمترین تنش محوری بود.
- ۷- بیشترین نسبت میرایی چرخه‌ای در نمونه دیوار با تنش محوری ۰/۳ مگاپاسکال و در حدود ۰/۲۴ مشاهده گردید که مقدار بسیار قابل توجهی است و می تواند نشان‌دهنده امکان استهلاک مناسب شتاب لرزه‌ای در دیوارهای خشتی باشد.

## مراجع

- [1]-Ahmadi Nejad Qarache.M, Foroghi.M, Rahimi.H.A, "Investigating Methods to Retrofit Mud and Adobe Construction against Eearthquake," *Master's Thesis of Structural Engineering, Yazd Univesity*, 2016.
- [2]-Feng Wu, Hai-Tao Wang, Gang Li, Jin-Qing Jia, Hong-Nan Li, "Seismic performance of traditional adobe masonry walls subjected to in-plane cyclic loading," *Materials and Structures*, pp. 50-69, 2017.
- [3]-Fadakar.S, Eftekhari.M.R, "The Effect of Engineered Cement Composite [ECC] on the Reinforcement of the In-Plane walls," *Master's Thesis of Civil Engineering of Esfahan University*, 2017.
- [4]-Rogiros Illampas, Ioannis Ioannou, Dimos C. Charmpis, "Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation," *Construction and Building Materials*, vol. 53, no. 1, pp. 83-90, 2014.
- [5]-Dora Silveira, Humberto Varum, Aníbal Costa, Tiago Martins, Henrique Pereira, João Almeida, "Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 36-44, 2012.
- [6]-Elisa Adorni, Eva Coisson, Daniele Ferretti, "In situ characterization of archaeological adobe bricks," *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 1-9, 2013.

- [21]-Davood Mostofinejad, Alireza Akhlaghi, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beam-Column Joints Using Innovative Anchorage System," *ACI Structural Journal*, vol. 114, no. Davood Mostofinejad, Alireza Akhlaghi, 2017.
- [22]-Magenes G, Calvi GM, "In-plane seismic response of brick masonry walls," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 26, pp. 1097-1111, 1997.
- [23]-Shedid MT, EI-Dakhakhni WW, "Behavior of fully grouted reinforced concrete masonry shear walls failing in flexure: analysis. Eng Struct," *Drysdale RG*, vol. 31, p. 2032-2044, 2009.
- of Gypsum, Gypsum Plasters and Gypsum Concrete," ASTM, 2004.
- [18]-ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms1," 2016.
- [19]-L Miccoli, U Müller, S Pospíšil, "Rammed earth walls strengthened with polyester fabric strips: Experimental analysis under in-plane cyclic loading," *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 29-36, 2017.
- [20]-Davood Mostofinejad, Alireza Akhlaghi, "Experimental Investigation of the Efficacy of EBROG Method in Seismic Rehabilitation of Deficient Reinforced Concrete Beam-Column Joints Using CFRP Sheets," *ASCE*, 2016.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Mirjalili, R. Morshed, A. Eslami, Investigating the effect of vertical load on the behavior of adobe walls under cyclic lateral loading, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(11) (2021) 2677-2690.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16076.6118](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16076.6118)

