



## مطالعه آزمایشگاهی دیوارهای خشتی تقویت شده به روش کاشت نزدیک سطح تحت بار جانبی چرخه ای

حسین میرابی بنادکی<sup>۱</sup>، رضا مرشد<sup>۲\*</sup>

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

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۱  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۲-۰۷  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۲-۱۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۲۳

### کلمات کلیدی:

دیوار خشتی  
بار چرخه ای  
کاشت نزدیک سطح  
مقاوم سازی  
شکل پذیری

**خلاصه:** در سازه های بنایی، دیوارهای باربر نقشی مهم و اساسی در عملکرد لرزه ای کلی و حفظ یکپارچگی سازه دارند. بنابراین استراتژی های مقاوم سازی این نوع سازه ها عموماً شامل مقاوم سازی دیوارها می شود. از روش های تقویت دیوارهای بنایی، روش کاشت در نزدیک سطح با استفاده از مصالح فولادی یا کامپوزیتی است. هرچند سازه های خشتی نیز جزئی از سازه های بنایی محسوب می شوند، ولی تحقیقات کمتری در مورد مقاوم سازی این سازه ها نسبت به سایر انواع سازه های بنایی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر مقاوم سازی لرزه ای دیوارهای خشتی در برابر بارهای جانبی با استفاده از روش کاشت نزدیک سطح میلگردهای فولادی مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفته است. نمونه های آزمایشگاهی شامل چهار نمونه دیوار خشتی با مقیاس یک سوم به طول یک متر، ارتفاع ۸۰۰ میلیمتر و ضخامت ۲۰۰ میلیمتر بودند. میلگردهای تقویت به روش کاشت نزدیک سطح به صورت شبکه متعامد در هر دو طرف نمونه های دیوار نصب شدند. نمونه ها همزمان تحت تنش فشاری محوری ثابت ۰/۱ مگاپاسکال و بارگذاری جانبی درون صفحه ای چرخه ای افزایش یافته با کنترل تغییر مکان قرار گرفتند. بر اساس نتایج آزمایش ها، روش کاشت نزدیک سطح میلگرد فولادی با قلاب انتهایی تاثیر قابل توجهی در بهبود مقاومت جانبی، سختی جانبی درون صفحه ای و شکل پذیری نمونه های دیوار خشتی داشت.

### ۱- مقدمه

سازه های خاکی علاوه بر میراث معماری، خانه های ساده در مناطق روستایی و حاشیه ی شهرها را نیز شامل می شود. با این حال، نگرانی هایی در مورد عملکرد این نوع ساخت و ساز به هنگام زلزله وجود دارد. خسارات وارده به سازه های خشتی در زلزله های چند دهه اخیر گواهی بر آسیب پذیری این نوع سازه ها است. برخی از آن ها عبارتند از: زمین لرزه ی ال سالوادور در سال ۲۰۰۱ [۴]، زمین لرزه ی بم (ایران) در سال ۲۰۰۳ [۵]، زمین لرزه ی پرو در سال ۲۰۰۷ [۶]، زمین لرزه ی شیلی در سال ۲۰۱۰ [۷] و زمین لرزه ی نپال در سال ۲۰۱۵ [۸]. به عنوان مثال در زمین لرزه ی ال سالوادور در سال ۲۰۰۱، بیش از یک میلیون نفر خانه ی خود را از دست

بخش عمده ای از میراث معماری در مناطق جهان با فعالیت های لرزه ای بالا از خاک ساخته شده است. برآورد شده است که حدود ۳۰ درصد از جمعیت جهان در ساختمان های خاکی (ساخته شده با استفاده از خاک کوبیده و یا خشت) زندگی می کنند [۱، ۲]. سازه های خشتی در ایران و بسیاری از کشورهای دیگر در سراسر جهان رایج است. عایق بودن در برابر صوت و حرارت، مقرون به صرفه بودن، در دسترس بودن و سرعت در ساخت و ساز از ویژگی های مثبت سازه های خشتی هستند [۳]. در کشورهای در حال توسعه،

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: morshed@yazd.ac.ir



دادند و شدیدترین آسیب به خانه های خشتی وارد شد [۹]. در زمین لرزه ی سال ۲۰۱۰ شیلی و سونامی بعد از آن حدود ۳۷۰/۰۰۰ خانه آسیب دیدند که تقریباً ۳۷ درصد از آن ها خشتی بودند [۷]. در منطقه ی مول (نیپال)، در کیوریکو، نیز حدود ۹۰ درصد از سازه های خشتی تخریب شدند [۷]. در نتیجه، تعریف اقدامات پیشگیرانه و روش های مقاوم سازی لرزه ای با هزینه کم، یک جنبه کلیدی در حفظ این نوع سازه ها است [۱۰]. از طرف دیگر این مسئله به طور گسترده پذیرفته شده است که عملکرد سازه های خشتی به مقدار قابل توجهی به رفتار دیوارهای آن بستگی دارد. بنابراین مقاوم سازی دیوارها در سازه های خشتی، می تواند پاسخ لرزه ای آن ها را به طور قابل ملاحظه ای بهبود بخشد [۱۱]. از نظر سازه ای، خاک به عنوان یک ماده ساختمانی در برابر نیروهای فشاری عملکرد قابل قبولی دارد اما مقاومت کششی آن کم است [۱۲]. بنابراین باید عناصر سازه ای ساخته شده با این ماده به سمت نیروهای فشاری تنظیم شده و نیروهای کششی ایجاد شده هنگام زمین لرزه به عناصر تقویت منتقل شوند [۱۳]. با وجود اینکه که ساخت و ساز با خاک دیگر شکل غالب ساخت و ساز نیست، هنوز تعداد زیادی از ساختمان های خشتی در اکثر مناطق جهان وجود دارند و بخش مهمی از میراث معماری جهانی را تشکیل می دهند [۱۴]. البته در حال حاضر تلاش هایی برای معرفی خشت به عنوان معماری پایدار معاصر صورت می گیرد [۱۵].

روش های مقاوم سازی مرسوم استفاده شده در تحقیقات گذشته به دو گروه تقویت خارجی و کاشت نزدیک سطح تقسیم می شوند. در بیشتر تحقیقات انجام شده روی مقاوم سازی دیوارهای خشتی از روش مقاوم سازی خارجی استفاده شده و این روش تا حدودی در بهبود رفتار لرزه ای این نوع دیوارها مؤثر بوده است. محققان همچنین مشکلات مربوط به این روش از قبیل جدا شدگی و شکست ترد ناشی از آن را بررسی کرده و روش هایی نیز برای جلوگیری یا به تاخیر انداختن آن پیشنهاد داده اند. مروری بر تحقیقات پیشرفته در مورد مقاوم سازی خارجی سازه های خشتی در برابر زلزله با استفاده از مش های پلیمری توسط وارگاس و همکاران [۱۱] انجام شده است. تولز و همکاران در تحقیق خود از تسمه های از جنس نایلون در جهت های افقی و قائم به صورت یک حلقه ی بسته جهت مقاوم سازی یک اتاقک خشتی استفاده کردند [۱۶، ۱۷]. این روش مقاوم

سازی توانست تا حدودی از ریزش مدل های خشتی جلوگیری کند و با وجود اینکه تسمه ها نتوانست مانع شروع ترک خوردگی شود، در حفظ انسجام سازه تحت جابجایی های بزرگ موفق بود. در تحقیق دیگر، هراکف و همکاران [۱۰] از مش های مصنوعی از جنس جنس پلی اتیلن و پلی پروپیلن به روش چسباندن روی سطح برای ترمیم و مقاوم سازی دیوارهای خشتی استفاده کردند. آنها افزایش مقاومت جانبی ۳۵ تا ۴۸ درصد و افزایش حداکثر جابجایی ۲۶ تا ۴۸ درصد را برای نمونه های مقاوم سازی شده گزارش دادند. دیوار ترمیم و مقاوم سازی شده در تحقیق هراکف و همکاران توانست به حداکثر مقاومت جابجایی جانبی نمونه ی شاهد برسد. علاوه بر این آنان از روش کاشت نزدیک سطح کابل فولادی به قطر ۴ میلیمتر با چیدمان قطری نیز برای تقویت نمونه های دیوار استفاده نمودند که با این روش افزایش مقاومت جانبی تا ۹۱ درصد بدست آمد و نشاندهنده برتری روش کاشت نزدیک سطح نسبت به چسباندن مش بود. بلوندت و همکاران [۱۸] در تحقیق خود یک مدل خشتی که با استفاده از طناب های مصنوعی به روش چسباندن روی سطح خارجی مقاوم سازی شده بود را آزمایش کردند. مدل اصلی، بدون تقویت، ابتدا روی میز لرزه و تحت زلزله متوسط آزمایش شد. سپس مدل با استفاده از ترزیق ملات با پایه رسی به داخل شکاف ها و ترک های ایجاد شده ترمیم و با استفاده از قرار گیری طناب های مصنوعی روی سطح خارجی مقاوم سازی و دوباره مورد آزمایش قرار گرفت. پس از وقوع ترک، طناب ها به خوبی قادر به کنترل جابجایی و جلوگیری از فروریزش دیوار بودند. فیگوردو و همکاران [۱۹] در تحقیق خود از مش پلیمری به روش چسباندن روی سطح خارجی جهت ترمیم و مقاوم سازی دیوارهای خشتی استفاده کردند. در تحقیق فیگوردو و همکاران [۱۹] بعد از ترمیم و مقاوم سازی دیوار آسیب دیده، مقاومت برشی دیوار ۲۳/۴ درصد و حداکثر جابجایی ۲۲۰ درصد نسبت به دیوار اصلی بهبود یافت. روش مقاوم سازی خارجی با استفاده از نوارهای لاستیکی بدست آمده از لاستیک های فرسوده توسط محققین دانشگاه ویکتوری ولینگتون و دانشگاه کاتولیک مقدس پرو تجربه گردید [۲۰، ۲۱]. نوارهای لاستیکی با استفاده از برش حلزونی یک لاستیک فرسوده و تبدیل آن به نوار پیوسته تهیه شدند و به صورت افقی و عمودی روی دیوارهای خشتی قرار گرفتند. مدل خشتی که با استفاده از این روش مقاوم سازی شده بود روی میز لرزه آزمایش

روش چسباندن روی سطح خارجی دارد. به عنوان مثال، روش کاشت نزدیک سطح روی ظاهر و زیبایی سازه اثر کمتری دارد و در این روش کرنش بیشتری در ماده مسلح کننده قبل از جداشدگی ایجاد شده و از حداکثر مقاومت کششی آن استفاده می شود. همچنین صدمات و خسارات ناشی از تصادف، زلزله، قرار گرفتن در دماهای بالا و آتش سوزی نیز در این روش کاهش می یابد.

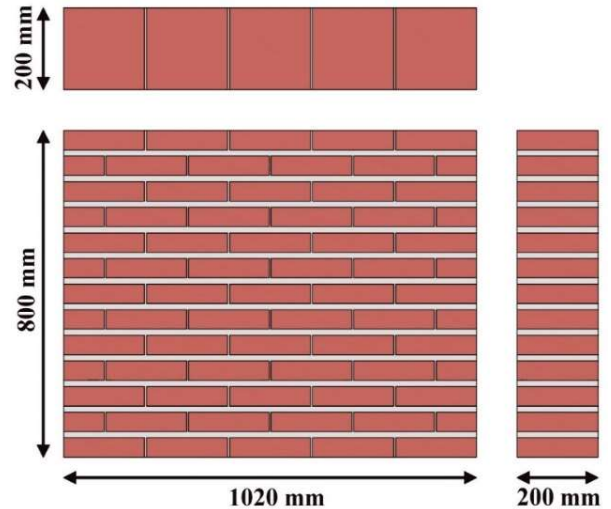
با وجود تحقیقات زیاد انجام شده روی مقاوم سازی و ترمیم سازه های خشتی، هنوز دانش کافی در مورد رفتار لرزه ای و نحوه ی مقاوم سازی مؤثر آن ها وجود ندارد. تحقیق آزمایشگاهی حاضر بخشی از یک تحقیق گسترده آزمایشگاهی درباره ی رفتار لرزه ای و بهسازی دیوار های خشتی در دانشکده عمران دانشگاه یزد است. هدف اصلی این تحقیق بررسی آزمایشگاهی تأثیر مقاوم سازی با میلگردهای فولادی به روش کاشت نزدیک سطح بر روی رفتار درون صفحه ای دیوارهای خشتی آسیب دیده و بدون آسیب است. بدین منظور، چهار نمونه دیوار خشتی تحت بارگذاری درون صفحه ای قرار گرفتند و نتایج نمونه های مقاوم سازی شده با نمونه ی شاهد جهت ارزیابی اثر مقاوم سازی روی مقاومت جانبی، حداکثر جابجایی، شکل پذیری و اتلاف انرژی مقایسه شده اند.

## ۲- برنامه ی آزمایشگاهی

### ۲-۱- نمونه های آزمایشگاهی

با در نظر گرفتن محدودیتهای آزمایشگاهی نمونه های دیوار خشتی با مقیاس یک سوم ساخته شدند. ارتفاع دیوارها ۸۰۰ میلی متر (ارتفاع مؤثر دیوار تا محل اعمال بار جانبی: ۷۰۰ میلی متر)، طول دیوارها ۱۰۲۰ میلی متر و ضخامت دیوارها ۲۰۰ میلی متر بود. شکل ۱ جزئیات هندسی و نحوه ی چیدمان بلوک های خشتی در نمونه ها را نشان می دهد.

چهار نمونه دیوار خشتی برای تحقیق حاضر در نظر گرفته شد. تعداد و چیدمان میلگردهای تقویتی و شرایط دیوار قبل از تقویت (آسیب دیده یا بدون آسیب قبلی) در نمونه های آزمایشگاهی متفاوت بودند. برای شبیه سازی بهتر شرایط واقعی، سربار ثابت ۰/۱ مگاپاسکال روی تمام نمونه های دیوار اعمال گردید. نمونه ی W0.1 به عنوان نمونه ی شاهد بدون تقویت مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۱). این نمونه بعد از آزمایش، ترمیم و تقویت گردید و مجدداً مورد آزمایش



شکل ۱. جزئیات هندسی و نحوه ی چیدمان بلوک های خشتی در دیوارهای ساخته شده

Fig. 1. Geometric details and bond pattern of wall panels

شد. نتایج بدست آمده افزایش قابل توجه در ظرفیت جابجایی دیوار را بدون فروریزش آن نشان داد. مقاوم سازی دیوارهای بنایی آجری نیز به روش چسباندن نوارهای پلیمری روی سطح خارجی تجربه شده و به نتایج رضایت بخشی منجر شده است. فاروق و همکاران [۲۲] در تحقیق خود از چسباندن نوارهای CFRP و فولادی روی سطح خارجی برای مقاوم سازی دیوارهای بنایی استفاده کردند. آنها افزایش ۲/۱۴ و ۱/۵۷ برابری مقاومت جانبی دیوارهای مقاوم سازی شده با نوارهای CFRP و فولادی را گزارش دادند. همچنین جابجایی نهایی دیوارها نیز در مقایسه نمونه ی غیر مسلح افزایش ۴/۲۸ و ۳/۴۰ برابری را از خود نشان داد.

یکی از ضعف های دیوارهای مصالح بنایی و خشتی در برابر بارهای جانبی ملات آن است و مقاوم سازی دیوارها بوسیله ی تسلیح ملات بخشی از تحقیقات را به خود اختصاص داده است. به عنوان مثال وطنی اسکویی و همکاران [۲۳] تعدادی دیوار خشتی با انواع مختلف ملات معمولی، مسلح شده با توری فلزی، توری پلیمری و لیف خرما را مورد آزمایش قرار دادند. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق آنان، تسلیح ملات دیوارهای خشتی با توری پلیمری و یا لیف خرما توانست بار نهایی و جذب انرژی دیوار را به ترتیب تا ۸۰ و ۱۶۰ درصد افزایش دهد.

مقاوم سازی به روش کاشت نزدیک سطح مزایای زیادی در برابر

جدول ۱. معرفی نمونه‌های دیوار خشتی  
Table 1. Test Specimens

نام نمونه	نوع نمونه	توضیح
W0.1	شاهد	نمونه ی غیر مسلح تحت تنش محوری ثابت ۰/۱ مگاپاسکال
W0.1RS1	ترمیم و مقاوم سازی شده	نمونه ی ترمیم و تقویت شده با چیدمان اول تحت تنش فشاری ثابت ۰/۱ مگاپاسکال
W0.1S1	مقاوم سازی شده	نمونه ی سالم مقاوم سازی با چیدمان اول تحت تنش فشاری ثابت ۰/۱ مگاپاسکال
W0.1S2	مقاوم سازی شده	نمونه ی سالم مقاوم سازی شده با چیدمان دوم (جهت بررسی اثر افزایش میزان تقویت) تحت تنش فشاری ثابت ۰/۱ مگاپاسکال

در دیوار مقاومت کند. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده در گذشته [۲۴-۲۷] بر روی مقاوم سازی دیوار بنایی غیر مسلح آسیب دیده و یا بدون آسیب به روش کاشت نزدیک سطح، از شبکه متعامد قائم و افقی جهت مقاوم سازی دیوارها به روش کاشت نزدیک سطح استفاده شد.

در مورد نمونه آسیب‌دیده، قبل از مقاوم سازی، آسیب‌های وارده با توجه به توصیه‌های موجود در راهنمای MVCS [۲۸] ترمیم گردید. بدین منظور ابتدا تمامی گوشه‌های خرد شده و بلوک‌های خشتی سست شده از روی نمونه برداشته شدند. سپس قسمت‌های جدا شده و ترک‌ها با استفاده از پمپ باد (فشار هوا) تمیز شدند. در مرحله ی بعد قسمت‌های آسیب‌دیده با خشت سالم و ملات گل جایگزین و ترک‌ها با استفاده از ملات سیمانی به صورت سطحی ترمیم شدند. ملات سیمانی با استفاده از ترکیب سیمان و ماسه بادی به نسبت حجمی ۱ به ۲ ساخته شد. مقدار آب مورد نیاز جهت ساخت ملات در حدی در نظر گرفته شد تا ملات کارایی و روانی لازم را داشته باشد. در نهایت ملات سیمانی به ضخامت حدود ۵ میلی‌متر روی سطح دیوار به صورت پلاستر قرار گرفت. مقاومت فشاری میانگین ملات سیمانی استفاده شده جهت ترمیم دیوارها بعد از ۲۸ روز ۱۶/۶ مگاپاسکال بود.

در این تحقیق دو چیدمان جهت مقاوم سازی دیوارهای خشتی مورد استفاده قرار گرفت. این دو چیدمان تنها در تعداد میلگردهای کاشته شده تفاوت داشتند. بدین ترتیب که در چیدمان اول دو میلگرد عمودی و دو میلگرد افقی به روش کاشت نزدیک سطح در دیوار قرار

قرار گرفت (نمونه W0.1R1). نمونه‌های W0.1S1 و W0.1S2 نیز بدون آسیب قبلی و با دو چیدمان مختلف آرماتور تقویت آزمایش شدند. در جدول ۱ مشخصات نمونه‌های دیوار خشتی ارائه شده است.

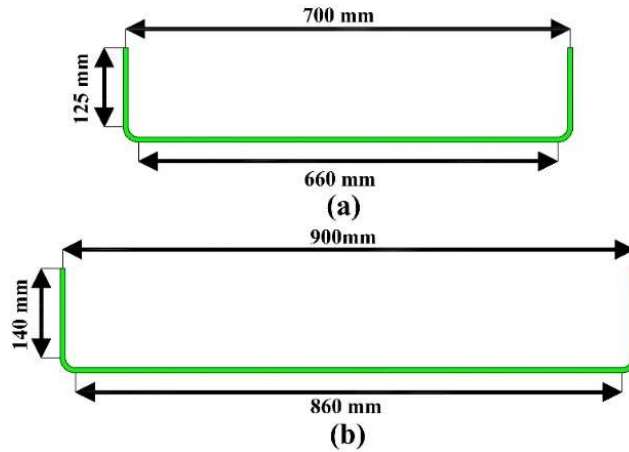
### ۲-۲- نحوه ی ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

پس از بررسی و تحقیق در رابطه با روش سنتی تهیه خشت و ملات و مشورت با استاد کارهای قدیمی، بلوک‌های خشتی و ملات گل بر اساس روش سنتی، ساخته شده و دیوارچینی توسط معمار باتجربه انجام شد. از خاک رس منطقه ی میبد یزد که درصد رس بالا و چسبندگی مناسبی دارد، جهت ساخت خشت و از ترکیب خاک رس و ماسه بادی به نسبت ۱ به ۱ جهت ساخت ملات گل استفاده شد.

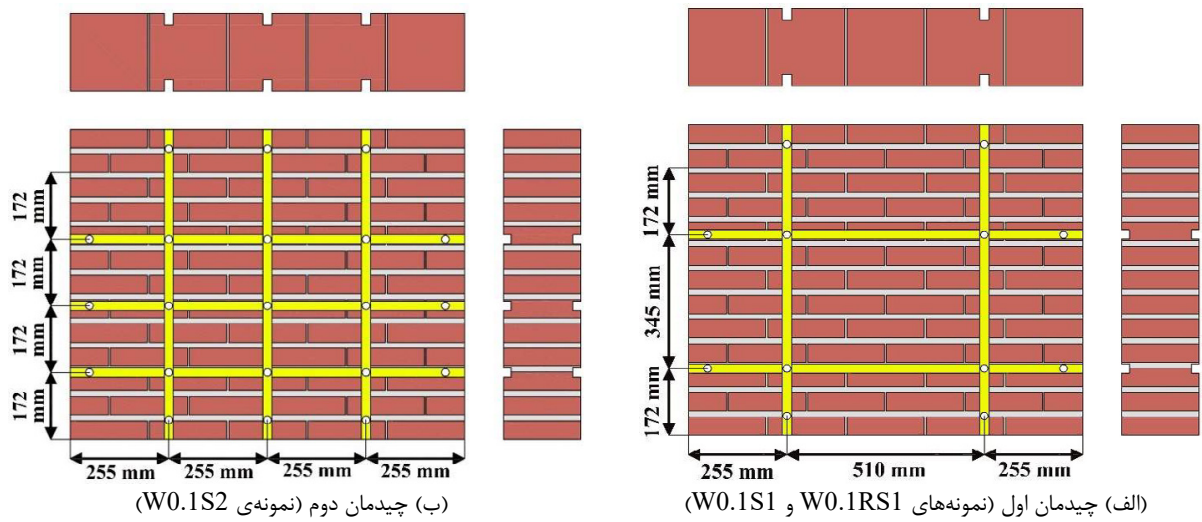
در این تحقیق نمونه دیوارهای بنایی خشتی در آزمایشگاه با استفاده از بلوک‌های خشتی به طول و عرض ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۴۵ میلی‌متر ساخته شد. لازم به ذکر است با توجه به شرایط انجام آزمایش و بستن اکچوئیتور به دو رگ خشت بالای دیوار، ارتفاع مؤثر دیوارها ۷۰۰ میلی‌متر بدست آمد.

### ۲-۳- تقویت نمونه‌ها با استفاده از میلگردهای فولادی به روش کاشت نزدیک سطح

در این تحقیق سه دیوار با استفاده از کاشت نزدیک سطح میلگردهای فولادی مقاوم سازی شدند. در تمامی دیوارها، میلگردهای فولادی به صورت متقارن در دو طرف دیوار قرار گرفتند. روش مقاوم سازی به گونه ای طراحی شده بود تا در برابر ایجاد ترک‌های قطری



شکل ۲. اندازه میلگردهای عمودی (a) و افقی (b) تقویتی  
Fig. 2. Geometry of vertical and horizontal rebars



شکل ۳. مقایسه دو چیدمان قرارگیری میلگردهای تقویت  
Fig. 3. Details of adopted NSM retrofitting technique

در این تحقیق جهت مهار بهتر میلگرد تقویتی و با توجه به نتایج تحقیقات ردا و همکاران [۲۹]، از قلاب ۹۰ درجه در انتهای میلگردهای تقویت استفاده گردید. ابعاد هندسی میلگردهای افقی و قائم استفاده شده در این تحقیق، در شکل ۲ آمده است. با توجه به لزوم مهار قلاب انتهایی میلگردهای تقویتی در ضخامت دیوار خشتی، طول میلگردها از طول دیوار خشتی حدود ۱۰ سانتیمتر کمتر است (۵ سانتیمتر فاصله از لبه های دیوار در هر طرف).

جهت جلوگیری از کمانش میلگردهای قائم و یا به تأخیر انداختن این پدیده، ابتدا میلگردهای قائم درون شیارها قرار گرفته و با ۴ رشته

گرفتند ولی در چیدمان دوم از سه میلگرد عمودی و سه میلگرد افقی جهت مقاوم سازی استفاده شد. قطر میلگردهای استفاده شده جهت مقاوم سازی دیوارها، ۸ میلی متر بود. برای نصب میلگردها، ابتدا خطوط شیارها بر روی دیوارها رسم شد. سپس در محل قرار گیری انتهایی هر میلگرد و محل تقاطع خطوط شیارهای عمودی و افقی سوراخ هایی به قطر ۲۰ میلی متر ایجاد شد تا خطوط شیارهای دو طرف سطح دیوار را به هم متصل کند. بعد از آن در محل خطوط مشخص شده، شیارهای عمودی و افقی بر روی دیوار با استفاده از دستگاه شیار زن ایجاد شد.

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده در تحقیق  
Table 2. Mechanical properties of materials used

مقاومت کششی (MPa)		مقاومت خمشی (MPa)		مقاومت فشاری (MPa)		عنوان
انحراف معیار	میانگی ن	انحراف معیار	میانگی ن	انحراف معیار	میانگی ن	
۰/۱۸	۱/۷۳	۰/۳۴	۷/۱۱	۱/۹۵	۳۵/۵۲	گروت
۰/۳۸	۲/۳۵	۰/۴۶	۵/۷۴	۱/۲۱	۱۶/۶۳	ملات سیمانی
۰/۱۳	۰/۵۲	۰/۲۱	۰/۹۵	۰/۳۵	۳/۳۱	ملات گل
-	-	-	-	۰/۲۹	۴/۴۳	خشت
-	-	-	-	۰/۱۷	۲/۳۴	ستون خشتی

#### ۲-۴- مشخصات مصالح مصرفی

بر اساس آزمایش های انجام شده مقاومت تسلیم، نهایی و مدول الاستیسیته ی میانگین برای میلگردهای فولادی به ترتیب ۴۲۰، ۵۸۰ و ۲۰۳۰۰۰ مگاپاسکال بدست آمد. مشخصات مکانیکی خشت، ملات گل، گروت سیمانی و ملات ماسه سیمان مورد استفاده در ترمیم دیوار آسیب دیده نیز هرکدام با آزمایش روی ۶ نمونه بدست آمدند. نتایج حاصل از این آزمایش ها در جدول ۲ ارائه شده است.

#### ۲-۵- روش انجام آزمایش و پروتکل بارگذاری

چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی جهت آزمایش نمونه های دیوار خشتی در شکل ۴ نشان داده شده است. نمونه های دیوار در پایین به کمک یک لایه گچ به ضخامت حدودا یک سانتی متر در پایه فولادی که بصورت گیردار به کف صلب آزمایشگاه بسته شده بود، مستقر شدند. سربار قائم ثابت معادل با تنش محوری ۰/۱ مگاپاسکال، که برای دیوار خشتی یک سازه یک طبقه مقدار محتملی است، از طریق یک جک دستی به نمونه های دیوار اعمال شد. سربار قائم از طریق یک تیر قوی فولادی که با اتصال غلطکی به بالای دیوار متصل بود بصورت یکنواخت روی دیوار توزیع گردید.

جهت اعمال جابجایی های افقی، دو رگ اول دیوار از دو طرف

سیم مفتول گالونیزه به قطر ۲ میلی متر در از دو طرف دیوار به هم متصل شدند. در نهایت میلگردهای افقی دو سر خم درون شیارهای افقی قرار گرفتند و شیارهای عمودی و افقی و سوراخ ها با استفاده از گروت سیمانی منبسط شونده پر شد. حداقل ابعاد شیارها با توجه به تحقیقات گاربین و همکاران [۳۰] بیست میلی متر در نظر گرفته شد. در دیوارهای مقاوم سازی شده، شیارهای عمودی دارای ۳۰ میلی متر عمق و ۲۴ میلی متر عرض و شیارهای افقی نیز دارای ۲۰ میلی متر عمق و ۲۴ میلی متر عرض بودند. در شکل ۳، به صورت شماتیک محل قرار گیری شیارها و سوراخ ها در دو حالت تقویت نشان داده شده است (دایره های موجود در شکل نشان دهنده ی سوراخ ها جهت عبور سیم مفتول و قلاب انتهایی میلگردها هستند). شیارها بعد از کاشت میلگرد با گروت انبساطی پر شدند. در تحقیقات گذشته بر روی مقاوم سازی دیوارهای بنایی به روش کاشت نزدیک سطح از مقاطع فولادی ضد زنگ و کامپوزیت های FRP استفاده شده است تا علاوه بر تأمین مقاومت کششی لازم دوام آن ها نیز تضمین شود. در این تحقیق نیز چون در دیوارهای خشتی شرایط خوردگی میلگرد وجود دارد و حفاظت قلبیایی مانند بتن تأمین نمی شود، با توجه به تحقیق دانگ و همکاران [۳۱]، از پوشش اپوکسی روی میلگردهای تقویت به منظور حفظ دوام مناسب استفاده گردید.



(ب)



(الف)

شکل ۴. چیدمان آزمایش نمونه‌های دیوار خشتی  
Fig. 4. Schematic Illustration of test setup

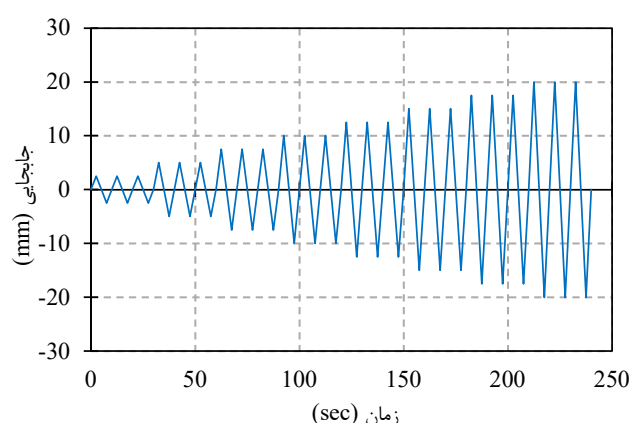
دامنه‌ی جابجایی جانبی از ۲/۵ میلی‌متر آغاز شده و پس از سه سیکل مشابه به میزان ۲/۵ میلی‌متر دیگر افزایش می‌یافت (شکل ۵). تغییر مکان جانبی بر اساس این پروتکل تا شکست نهایی نمونه‌ها ادامه داشت. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای بر اساس تحقیقات قبلی [۳۲، ۱۰] انتخاب گردید. در هنگام آزمایش، منحنی‌های بار-جابجایی، الگوی ترک خوردگی و مد شکست نمونه‌ها با دقت ثبت گردید. در آزمایش علاوه بر جابجایی ثبت شده توسط اکچوئیتور، از چهار جابجایی سنج دیگر جهت کنترل جابجایی اکچوئیتور و اندازه‌گیری مقدار بلند شدگی نمونه‌ها استفاده گردید.

### ۳- ارائه و بررسی نتایج

در این بخش ابتدا نتایج ثبت شده برای هر نمونه دیوار خشتی ارائه شده است و سپس نمونه‌ها از نظر منحنی‌های پوش، ضریب شکل‌پذیری و استهلاک انرژی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

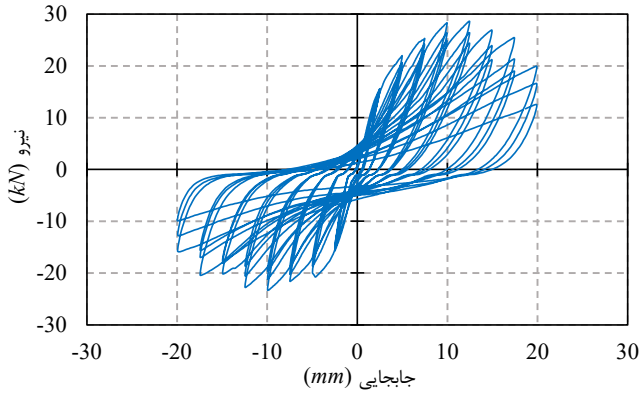
#### ۳-۱- نمونه‌ی W0.1

الگوی ترک خوردگی و شکست این نمونه در شکل ۶ و منحنی

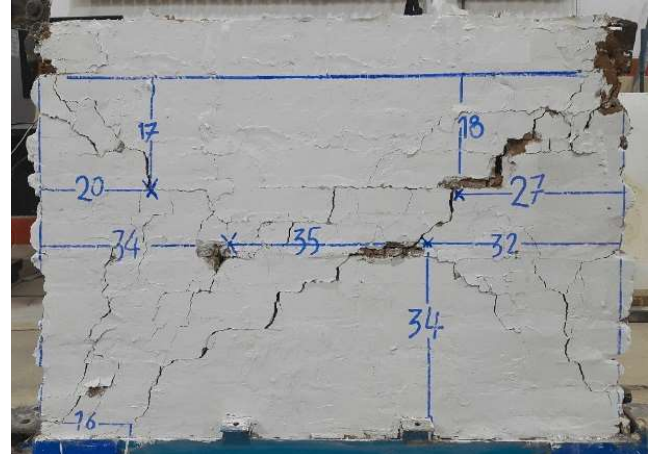


شکل ۵. تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای  
Fig. 5. Cyclic lateral loading regime

بوسیله‌ی مقاطع فولادی با بولت به یکدیگر بسته شده و به اکچوئیتور متصل شد. فضای خالی بین مقاطع فولادی و دو رگ اول نیز با گروت پر شد (شکل ۴). سپس نمونه دیوار توسط اکچوئیتور تحت جابجایی افقی چرخه‌ای افزایش‌دهنده درون صفحه‌ای تا شکست قرار گرفت. بارگذاری چرخه‌ای با اعمال جابجایی رفت و برگشتی با فرکانس ثابت ۰/۱ هرتز و با روند افزایشی به دو رگ بالای دیوار انجام شد.



شکل ۹. منحنی های چرخه‌ای نیرو - جابجایی برای نمونه ی W0.1RS1  
Fig. 9. Hysteretic Load-Displacement response of W0.1RS1



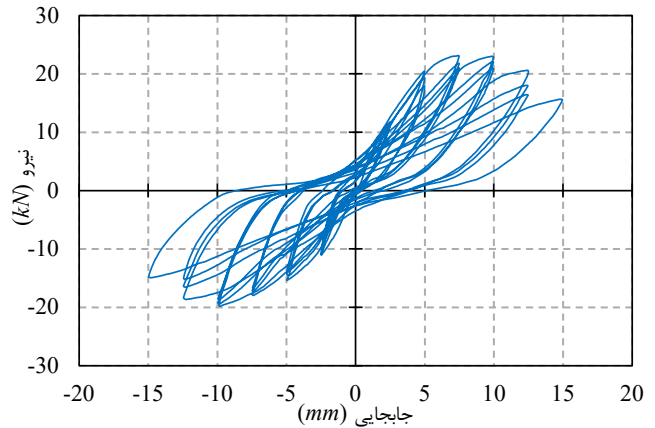
شکل ۶. الگوی ترک خوردگی نمونه W0.1 (فاصله‌ها به سانتی متر هستند)  
Fig. 6. Cracking pattern in W0.1 (Dimensions in CM)

چرخه‌ای بار-جابجایی در شکل ۷ ارائه شده است. مد شکست نمونه ی W0.1 به صورت ایجاد ترک های قطری در بلوک های خشتی و رگه های ملات بود (شکل ۶). در شکل ۶ محل برخورد ترک ها با ضربدر مشخص شده و فاصله ی آن ها از نقاط مختلف دیوار به سانتی متر اندازه گیری شده است. در طول آزمایش هیچگونه لغزشی توسط جابجایی سنج نصب شده در قسمت پایینی دیوار ثبت نشد. ترک های قطری ایجاد شده در این نمونه عمدتاً در طول رگه های ملات گسترش یافت که می‌تواند به دلیل بیشتر بودن مقاومت خشت از مقاومت ملات یا مقاومت پیوستگی بین خشت و ملات باشد. حداکثر نیروی جانبی تحمل شده این نمونه در جهات رفت (Push) و برگشت (Pull) به ترتیب ۲۳/۲ و ۱۹/۸ کیلونیوتن بود. شکست نمونه، که متناظر با افت ۲۰ درصدی مقاومت تعریف گردید، در جهات رفت و برگشت در جابجایی ۱۳/۸ میلی‌متر مشاهده گردید.

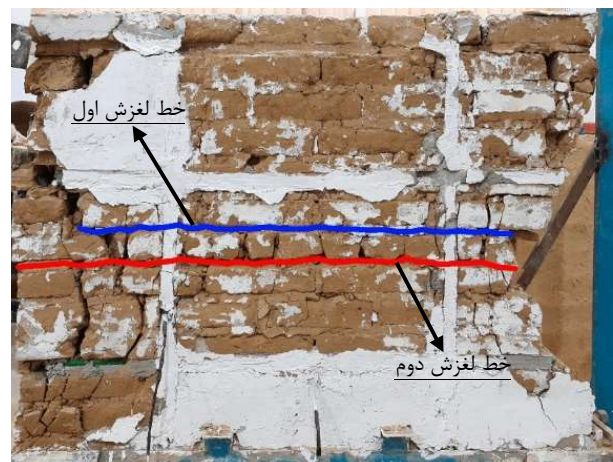
این دیوار پس از آزمایش و رسیدن به مرحله ی شکست، ترمیم و سپس با استفاده از میلگردهای فولادی مقاوم سازی شد و مجدداً مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج حاصل در ادامه آمده است.

### ۳-۲- نمونه ی W0.1RS1

الگوی ترک خوردگی و شکست این نمونه در شکل ۸ و منحنی چرخه‌ای بار-جابجایی در شکل ۹ ارائه شده است. مد شکست دیوار ترمیم و مقاوم سازی شده W0.1RS1 عمدتاً به صورت لغزش در قسمت میانی دیوار و ترک های قطری بود. در این دیوار ترک های ترمیم شده گسترش یافته و بازتر شدند و ترک های جدید نیز بوجود



شکل ۷. منحنی های چرخه‌ای نیرو- جابجایی برای نمونه ی W0.1  
Fig. 7. Hysteretic Load-Displacement response of W0.1



شکل ۸. الگوی ترک خوردگی نمونه ی W0.1RS1  
Fig. 8. Cracking pattern in W0.1RS1





(ب)



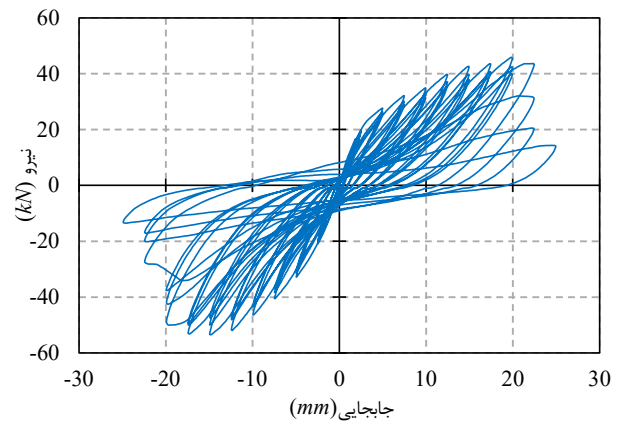
(الف)

شکل ۱۰. (الف) الگوی ترک خوردگی نمونه ی W0.1S1؛ (ب) کمانش میلگرد قائم  
Fig. 10. (A) Cracking pattern in W0.1S1 (B) Buckling of vertical bar

حداکثر جابجایی به  $18/4$  میلی متر افزایش یابد. مد شکست لغزشی و قطری این دیوار در شکل ۸ مشخص شده است. میلگردهای فولادی تقویتی، مکان و الگوی ترک های دیوار را نسبت به نمونه ی تقویت نشده تغییر داده است و باعث تبدیل مد شکست قطری به مد شکست ترکیبی لغزشی و قطری شده است.

### ۳-۳- نمونه ی W0.1S1

الگوی ترک خوردگی و شکست این نمونه در شکل ۱۰ و منحنی چرخه‌ای نیرو - جابجایی در شکل ۱۱ ارائه شده است. از ابتدای آزمایش، بلند شدگی نمونه ی W0.1S1 از روی رگ اول قابل مشاهده بود. در جابجایی جانبی  $7/5$  میلی متر در جهت رفت، اولین ریزترک قطری در قسمت میانی دیوار شکل گرفت. در سیکل های بعدی، عرض این ترک بیشتر شده و از قسمت میانی به طرف گوشه ی سمت راست دیوار گسترش پیدا کرد و ترک قطری دیگری نیز در بارگذاری جهت برگشت شکل گرفت. در جابجایی جانبی  $20$  میلی متر در جهت برگشت، نمونه شروع به لغزش روی رگه ی ششم ملات کرد (شکل ۱۰). در جابجایی جانبی  $22/5$  میلی متر در جهت رفت، یکی از میلگردهای موجود در محل خط لغزش ایجاد شده دچار کمانش فشاری شد و مقاومت جانبی نمونه افت شدیدی پیدا کرد (شکل ۱۰ ب). این افت شدید در مقاومت جانبی دیوار بر روی منحنی های نیرو-جابجایی نیز قابل مشاهده است (شکل ۱۱). البته



شکل ۱۱. منحنی های چرخه‌ای نیرو - جابجایی برای نمونه ی W0.1S1  
Fig. 11. Hysteretic Load-Displacement response of W0.1S1

آمد. در جابجایی جانبی  $5$  میلی متر در جهت رفت، دیوار شروع به لغزش روی هشتمین رگه ی ملات از پایین کرد (خط لغزش اول در شکل ۸). رفتار دیوار تا جابجایی جانبی  $5$  میلی متر مانند نمونه ی شاهد بود تا اینکه در این جابجایی و بار متناظر  $17/3$  کیلونیوتن، در جهت رفت لغزش دیوار روی رگه ی ملات در قسمت میانی شروع شد. با توجه به منحنی های نیرو-جابجایی بدست آمده برای نمونه های W0.1 و W0.1RS1، هر دو نمونه در جابجایی حدود  $10$  میلی متر به حداکثر نیروی جانبی خود رسیدند. ولی در نمونه ی W0.1RS1، میلگردهای کاشته شده قادر بودند در برابر باز شدن بیش از حد ترک ها مقاومت کرده و اجازه دادند تا بار به بیش از  $25$  کیلونیوتن و

چرخه‌های نیرو - جابجایی در شکل ۱۳ ارائه شده است. نمونه ی W0.1S2 نیز مانند نمونه ی W0.1S1 از ابتدای آزمایش شروع به بلند شدن از روی رگ اول کرد. حداکثر بلند شدگی اندازه گیری شده در این نمونه به طور میانگین دو برابر حداکثر بلند شدگی نمونه ی W0.1S1 برآورد شد. در جابجایی افقی ۱۷/۵ میلی متر در جهت رفت، اولین ریزترک قطری در قسمت میانی دیوار ظاهر شد. سیکل های بعدی ریزترک های قطری تا حدودی گسترش یافتند. در جابجایی افقی ۳۰ میلی متر در جهت برگشت، لغزش دیوار از روی رگ اول شروع شد (خط آبی در شکل ۱۲). در جابجایی افقی ۳۲/۵ میلی متر گوشه‌های بالایی دیوار خرد شد و آزمایش متوقف شد. آرماتورهای تقویتی در این نمونه بخوبی توانست یکپارچگی دیوار و مقاومت جانبی را تا تغییر مکان جانبی قابل توجه ۳۰ میلی‌متر (دریافت بالاتر از ۴٪) حفظ نماید (شکل ۱۳). تا این مرحله از تغییر مکان جانبی تنها ریزترک‌های کوچکی در ناحیه تقویت شده دیوار مشاهده گردید. در نهایت نیز مد شکست نمونه ی W0.1S2 به صورت خرد شدگی شدید در گوشه های دیوار اتفاق افتاد (شکل ۱۲).

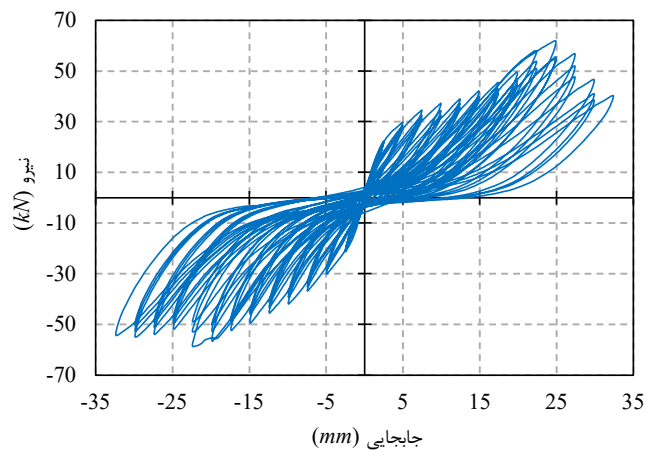
همان طور که از شکل ۱۳ مشخص است، باریک شدگی<sup>۱</sup> قابل توجهی در منحنی نیرو-جابجایی نمونه ی W0.1S2 وجود دارد. این پدیده می تواند به مد شکست این نمونه نسبت داده شود. نسبت بالای تسلیح در این نمونه باعث تغییر مد خرابی از ترک قطری به بلند شدگی و خرد شدن پاشنه شود. بر اساس تحقیقات مگنس و همکاران [۳۳]، در مد شکست بلند شدگی و خرد شدن پاشنه (بدون ترکیب با مدهای دیگر مانند ترک قطری و لغزش)، کمتر بودن عوامل استهلاک انرژی در دیوار می تواند باعث لاغرتر شدن چرخه‌های منحنی نیرو-جابجایی شود.

#### ۳-۵- منحنی‌های پوش

مطابق با استاندارد ASTM E2126 [۳۴]، منحنی پوش با اتصال محل انتهایی حلقه های بار-جابجایی، شامل بارهای حداکثر در سیکل اول هر فاز بارگذاری چرخه ای بدست می آید. این استاندارد، پوش حاصله از تعریف ارائه شده را به دو قسمت مثبت و منفی تقسیم می کند. بدین صورت که جابجایی نمونه در جهت مثبت، پوش مثبت و جابجایی نمونه در جهت منفی، پوش منفی تعریف می شود. جهت



شکل ۱۲. الگوی ترک خوردگی و شکست نمونه ی W0.1S2  
Fig. 12. Cracking pattern and damage status in W0.1S2



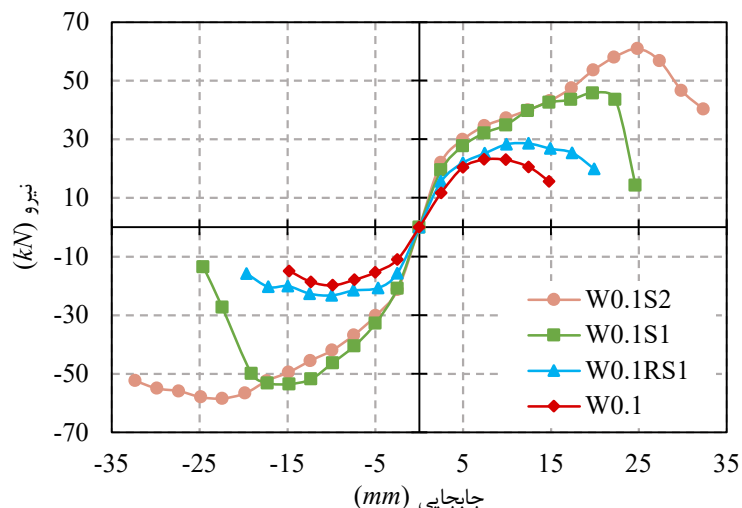
شکل ۱۳. منحنی های نیرو در برابر جابجایی برای نمونه ی W0.1S2  
Fig. 13. Hysteretic Load-Displacement response of W0.1S2

مقاومت جانبی این نمونه دیوار نسبت به نمونه شاهد تا بیش از دو برابر افزایش یافت و این نمونه توانست مقاومت جانبی حداکثر خود را تا تغییر مکان جانبی ۲۰ تا ۲۲ میلی‌متر (دریافت ۳٪) حفظ نماید که نشان دهنده‌ی تاثیر قابل توجه روش مقاوم سازی انجام شده است. نمونه ی دیوار W0.1S1 دارای مد شکست لغزشی، قطری توام با خرد شدگی پاشنه دیوار بود.

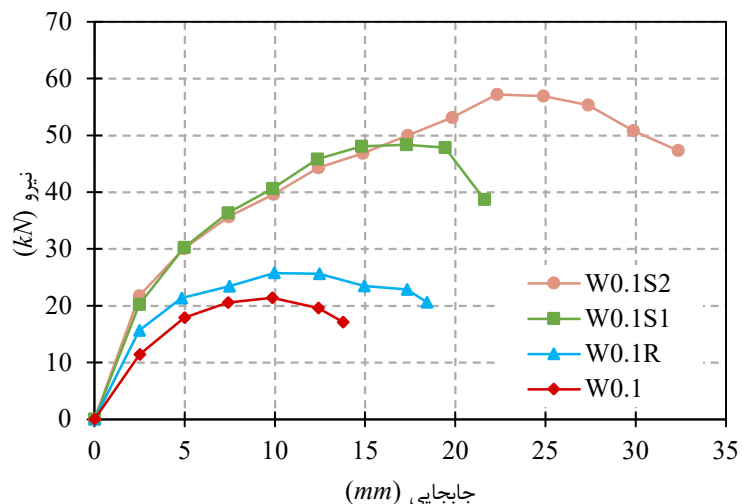
#### ۳-۴- نمونه ی W0.1S2

الگوی ترک خوردگی و شکست این نمونه در شکل ۱۲ و منحنی

1 Pinching



شکل ۱۴. منحنی های پوش نیرو در برابر جابجایی  
Fig. 14. The envelopes of hysteretic curves



شکل ۱۵. منحنی های پوش میانگین نیرو در برابر جابجایی برای نمونه های آزمایش شده  
Fig. 15. The average envelopes of hysteretic curves

توانسته است مقاومت جانبی و جابجایی قابل تحمل نمونه های دیوار خشتی سالم را تا حدود ۳ برابر نمونه شاهد افزایش دهد (شکل ۱۵).

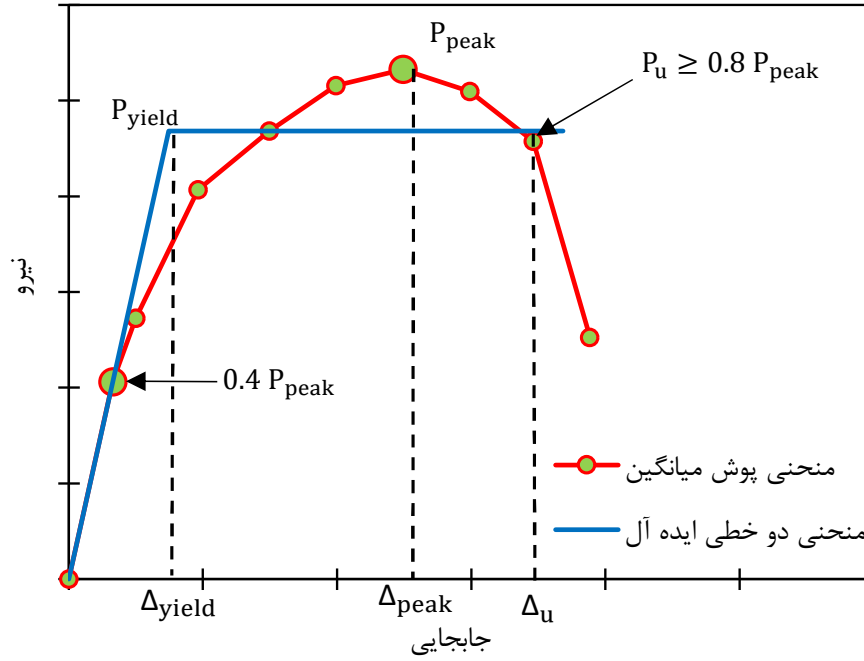
#### ۶-۳- ضریب شکل پذیری<sup>۱</sup>

ضریب شکل پذیری از پارامترهای مهم در ارزیابی رفتار لرزه ای سازه ها محسوب می شود. ضریب شکل پذیری با استفاده از نمودار دو خطی ایده آل حاصل از پوش میانگین نیرو در برابر جابجایی مطابق با استاندارد ASTM E2126 [۳۴] محاسبه شد. این استاندارد

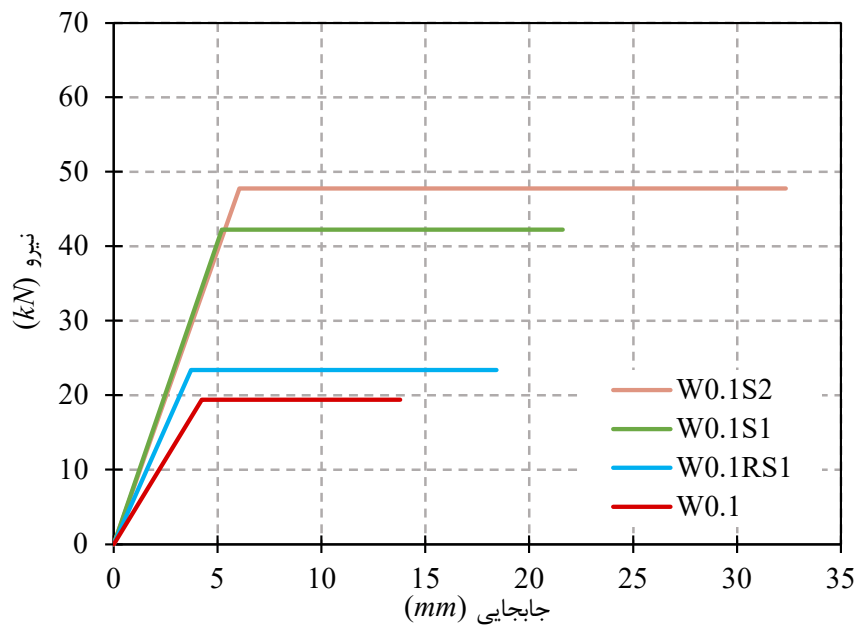
مثبت نیز بر اساس حرکت اکچوایاتور به طرف داخل (Pull) تعریف می شود. منحنی های پوش طبق تعریف استاندارد فوق برای نمونه های دیوار محاسبه و در شکل ۱۴ مورد مقایسه قرار گرفته اند.

استاندارد ASTM E2126 [۳۴] پوش میانگین را نیز تعریف می کند. بر اساس این تعریف منحنی پوش میانگین با استفاده از میانگین قدر مطلق مقادیر بار و جابجایی در پوش های مثبت و منفی بدست می آید. در شکل ۱۵ منحنی های پوش میانگین که بر اساس استاندارد فوق محاسبه شدند مورد مقایسه قرار گرفتند. مقایسه منحنی های پوش نشان می دهد که روش مقاوم سازی پیشنهادی

1 Ductility Factor



شکل ۱۶: رسم نمودار دو خطی ایده آل مطابق با استاندارد ASTM E2126 [۳۱]  
 Fig. 16. Idealized bilinear force-displacement responses according to ASTM E2126



شکل ۱۷: منحنی های دو خطی ایده آل برای نمونه های آزمایش شده  
 Fig. 17. Idealized bilinear curves for tested specimens

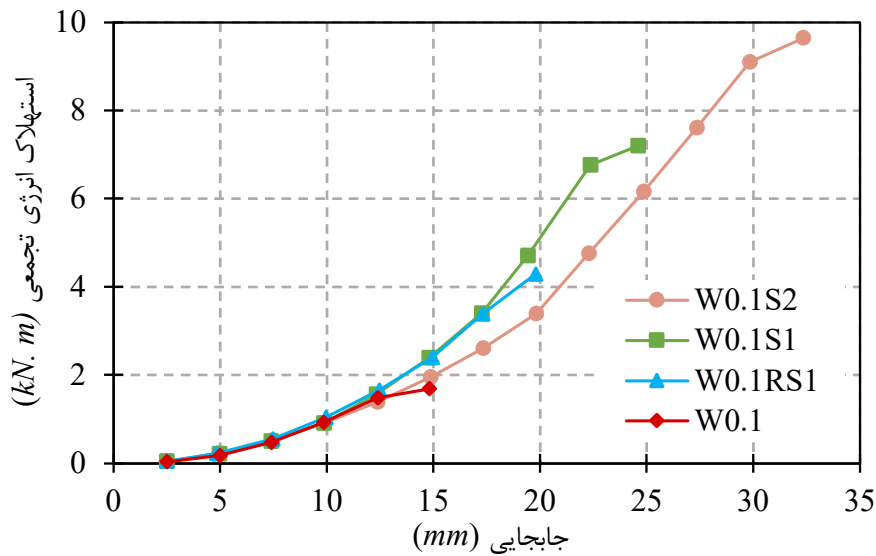
که در آن پارامترهای  $\mu$  ضریب شکل پذیری،  $\Delta_{yield}$  جابجایی تسلیم و  $\Delta_u$  جابجایی نهایی هستند. جابجایی تسلیم و نهایی با استفاده از منحنی دو خطی حاصل از پوش نیرو در برابر جابه جایی و مطابق با شکل ۱۶ محاسبه شد [۳۴]. منحنی دو خطی ایده آل، یک

شکل پذیری را به عنوان توانایی سازه در تحمل تغییر شکل های بزرگ بدون کاهش قابل توجه در مقاومت تعریف می کند و رابطه ی زیر را برای محاسبه ی ضریب شکل پذیری ارائه می دهد:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_{yield} \quad (1)$$

جدول ۳. مقادیر جابجایی تسلیم، حداکثر جابجایی، شکل پذیری دیوارهای خشتی آزمایش شده  
 Table 3. Yield displacement, maximum displacement and ductility factor for tested specimens

نام نمونه	جابجایی تسلیم (mm)	جابجایی نهایی (mm)	ضریب شکل پذیری	افزایش شکل پذیری (%)
W0.1	۴/۲۵	۱۳/۷۷	۳/۲۴	-
W0.1RS1	۳/۷۳	۱۸/۴۲	۴/۹۴	۵۲
W0.1S1	۵/۲۱	۲۱/۶۰	۴/۱۵	۲۸
W0.1S2	۶/۰۵	۳۲/۳۴	۵/۳۵	۶۵



شکل ۱۸. منحنی‌های استهلاک انرژی تجمعی نمونه‌های دیوار خشتی  
 Fig. 18. Cumulative Energy Dissipation curves of adobe wall panels

### ۷-۳- استهلاک انرژی<sup>۱</sup>

اتلاف یا استهلاک انرژی در یک چرخه بارگذاری به صورت سطح محصور توسط چرخه ی نیرو- جابجایی مربوطه، تعریف می شود. اتلاف انرژی تجمعی نیز به صورت جمع مقادیر انرژی تلف شده در چرخه های متوالی بدست می آید. در شکل ۱۸ منحنی‌های اتلاف انرژی تجمعی برای نمونه های دیوار خشتی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مقادیر اتلاف انرژی برای نمونه های مقاوم سازی شده تا ۴۷۲ درصد و برای نمونه ی ترمیم و مقاوم سازی شده ۱۵۴ درصد نسبت به نمونه ی شاهد افزایش داشته است. افزایش قابل توجه ظرفیت استهلاک انرژی دیوارهای مقاوم سازی شده نشان دهنده‌ی تأثیر روش مقاوم سازی اتخاذ شده در بهبود رفتار درون صفحه‌ای

منحنی ایده آل الاستوپلاستیک با سطح زیرین معادل با سطح زیرین منحنی پوش میانگین است که از مبدأ شروع شده و تا جابجایی نهایی ادامه می یابد. جابجایی نهایی بصورت جابجایی متناظر با حداکثر ۲۰ درصد کاهش مقاومت جانبی نسبت به مقاومت جانبی حداکثر در نظر گرفته می‌شود.

منحنی‌های دو خطی ایده آل برای نمونه ها در شکل ۱۷ مورد مقایسه قرار گرفته و ضرایب شکل پذیری نمونه ها در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج، ضریب شکل پذیری نمونه های مقاوم سازی شده تا ۶۵ درصد نسبت به نمونه ی شاهد افزایش داشته است. این افزایش شکل‌پذیری در نمونه ترمیم و تقویت شده هم بسیار قابل توجه و به میزان ۵۲ درصد بوده است.

1 Energy Dissipation

#### ۵- مراجع

دیوارهای خشتی تحت بارهای دینامیکی و لرزه‌ای است.

- [1] H. Houben, H. Guillaud, "Earth construction: a comprehensive guide", Intermediate Technology Publications; 1994.
- [2] D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira, J. Almeida, "Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions", Construction and Building Materials., 2012;28(1):36-44.
- [3] A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipour, "Experimental investigation on mud bricks reinforced with natural additives under compressive and tensile tests", Construction and Building Materials., 2017., 142, 137-147.
- [4] JSCE, "Earthquake Engineering Committee. The January 13, 2001 off the coast of El Salvador earthquake", Investigation of damage to civil engineering structures, buildings and dwellings., Tokyo: Japan Society of Civil Engineers (JSCE); 2001.
- [5] T. Mahdi, "Behaviour of adobe buildings in the 2003 Bam earthquake", SeismoAdobe 2005., 2005.
- [6] M. Blondet, "Behavior of earthen buildings during the Pisco earthquake of August 15, 2007", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA. 2008.
- [7] AS. Elnashai, B. Gencturk, O-S. Kwon, IL. Al-Qadi, Y. Hashash, JR. Roesler, et al., "The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010", Consequence assessment and case studies., 2010.
- [8] D. Gautam, H. Rodrigues, KK. Bhetwal, P. Neupane, Y. Sanada, "Common structural and construction deficiencies of Nepalese buildings", Innovative Infrastructure Solutions., 2016;1(1):1.
- [9] W. Salazar, K. Seo, "Earthquake disasters of 13 January and 13 February 2001, El Salvador", Seismological Research Letters., 2003;74(4):420-39.
- [10] S. Hračov, S. Pospíšil, A. Garofano, S. Urushadze, "In-plane cyclic behaviour of unfired clay and earth brick walls in both unstrengthened and strengthened conditions", Materials and Structures., 2016;49(8):3293-308.
- [11] J. Vargas-Neumann, C. Oliveira, D. Silveira, H. Varum, "Seismic Retrofit of Adobe Constructions", Strengthening

#### ۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این تحقیق مقاوم سازی دیوارهای خشتی در دو حالت سالم و آسیب دیده به روش کاشت نزدیک سطح میلگرد فولادی با قلاب انتهایی مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت. بر اساس آزمایشات انجام شده نتیجه‌گیری‌های زیر بعمل آمد:

۱- مقاوم سازی با میلگرد فولادی به روش کاشت نزدیک به سطح پیشنهادی در نمونه‌های دیوار خشتی سالم توانست ظرفیت باربری جانبی را تا حدود ۳ برابر افزایش دهد. استفاده از این روش در نمونه دیوار آسیب دیده و شدیداً ترک خورده توانست ظرفیت باربری جانبی دیوار را به سطحی بالاتر از دیوار خشتی سالم بازگرداند.

۲- حداکثر جابجایی قابل تحمل دیوار خشتی تقویت نشده ۱۳/۸ میلیمتر و تقریباً معادل دریافت ۲ درصد بود که مقدار قابل قبولی است. جابجایی قابل تحمل در نمونه دیوار ترمیم و تقویت شده در حدود ۳۵ درصد و در نمونه‌های دیوار سالم تقویت شده تا ۲۳۵ درصد افزایش یافت.

۳- روش تقویت پیشنهادی توانست یکپارچگی دیوار خشتی را تا تغییر مکانهای جانبی قابل توجه حفظ و از ایجاد ترکهای باز در دیوار خشتی ممانعت بعمل آورد. با افزایش میزان میلگرد تقویتی مد شکست در دیوار خشتی به خردشدگی موضعی در گوشه‌های دیوار محدود گشت.

۴- در نمونه‌های تقویت شده، علیرغم اختلاف سختی و مقاومت قابل توجه بین میلگرد تقویتی و مصالح خشتی، هیچگونه لغزش مشهود و جداشدگی بین میلگردهای تقویتی و دیوار خشتی مشاهده نگردید. این مسئله نشاندهنده موثر بودن نحوه مهار پیشنهادی میلگردهای تقویتی است. تنها یک مورد کماتش فشاری در میلگردهای قائم تقویتی و آنهم پس از رسیدن نمونه به حداکثر جابجایی مشاهده گردید که این مسئله باید مورد تحقیق بیشتر قرار گیرد.

۵- ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده بین ۳۰ تا ۶۵ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت.

۶- استهلاک انرژی در نمونه‌های تقویت شده تا حدود ۵ برابر افزایش یافت. حداقل میزان استهلاک انرژی نمونه‌های تقویت شده مربوط به نمونه دیوار ترمیم شده و بیش از دو برابر نمونه شاهد بود.

- for Science and Engineering., 2012;37(3):545-59.
- [23] A. Vatani Oskouei, M. Afzali, M. Madadipours, "Effect of mortar reinforcement on adobe walls performance", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 403-415(In Persian).
- [24] K. Konthesingha, M. Masia, R. Petersen, A. Page, "Experimental evaluation of static cyclic in-plane shear behavior of unreinforced masonry walls strengthened with NSM FRP strips", *Journal of Composites for Construction.*, 2014;19(3):04014055.
- [25] K. Konthesingha, M. Masia, R. Petersen, N. Mojsilovic, G. Simundic, A. Page, "Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips—An experimental evaluation", *Engineering Structures.*, 2013;50:126-36.
- [26] N. Ismail, RB. Petersen, MJ. Masia, M. Ingham, "Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallttes strengthened using twisted steel bars", *Construction and Building Materials.*, 2011;25(12):4386-93.
- [27] A. Jafari, A. Vatani Oskouei, M. Bazli, R. Ghahri, "Effect of the FRP sheet's arrays and NSM FRP bars on in-plane behavior of URM walls", *Journal of Building Engineering*, 2018; 20, 679-695.
- [28] MVCS, "Fichas para la reparación de Viviendas de Adobe", Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Sanamiento del Perú (MVCS)", 2014.
- [29] R. Reda, I. Sharaky, M. Ghanem, M. Seleem, H. Sallam, "Flexural behavior of RC beams strengthened by NSM GFRP Bars having different end conditions", *Composite Structures.*, 2016;147:131-42.
- [30] E. Garbin, N. Galati, A. Nanni, C. Modena, MR. Valluzzi, "Provisional design guidelines for the strengthening of masonry structures subject to in-plane loading", *proceedings of tenth North American masonry conference*, June2007. p. 3-5.
- [31] S. Dong, B. Zhao, C. Lin, R. Du, R. Hu, GX. Zhang, "Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete in ocean environment", *Construction and Building Materials.*, 2012;28(1):72-8.
- [32] L. Miccoli, U. Müller, S. Pospíšil, "Rammed earth walls and Retrofitting of Existing Structures: Springer; 2018. p 85-111.
- [12] F. Wu, G. Li, H-N. Li, J-Q. Jia, "Strength and stress-strain characteristics of traditional adobe block and masonry", *Materials and structures.*, 2013;46(9):1449-57.
- [13] Q. Angulo-Ibáñez, Á. Mas-Tomás, V. Galvañ-Llopis, JL. Sántolaria-Montesinos, "Traditional braces of earth constructions", *Construction and Building Materials.*, 2012;30:389-99.
- [14] R. Illampas, I. Ioannou, DC. Charmpis, "Overview of the pathology, repair and strengthening of adobe structures", *International Journal of Architectural Heritage.*, 2013;7(2):165-88.
- [15] M. G, "Building with earth – design and technology of a sustainable architecture", Basel: Birkhäuser; 2006.
- [16] EL. Tolles, "Getty seismic adobe project research and testing program", *Proc, Getty Seismic Adobe Project 2006 Colloquium2009.*, p. 34-41.
- [17] EL. Tolles, EE. Kimbro, FA. Webster, WS. Ginell, "Seismic stabilization of historic adobe structures", *The Final Report of the Getty Seismic Adobe Project*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles. 2000.
- [18] M. Blondet, J. Vargas, N. Tarque, JS. Paz, C. Sosa, J. Sarmiento, "Refuerzo sísmico de mallas de sogas sintéticas para construcciones de adobe", *Tierra, sociedad, comunidad: 15° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra: Universidad de Cuenca*; 2015. p. 67-80.
- [19] A. Figueiredo, H. Varum, A. Costa, D. Silveira, C. Oliveira, "Seismic retrofitting solution of an adobe masonry wall", *Materials and Structures.*, 2013;46(1-2):203-19.
- [20] A. Charleson, M. Blondet, "Seismic reinforcement for adobe houses with straps from used car tires", *Earthquake Spectra.*, 2012;28(2):511-30.
- [21] A. Charleson, "Seismic strengthening of earthen houses using straps cut from used car tires: a construction guide", *Oakland: Earthquake Engineering Research Institute (EERI).*, 2011.
- [22] S. Farooq, M. Ilyas, S. Amir, "Response of masonry walls strengthened with CFRP and steel strips", *Arabian Journal*

- dynamics., 1997;26(11):1091-112.
- [34] ASTM E2126 – 11, “Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings”, 2011.
- strengthened with polyester fabric strips: Experimental analysis under in-plane cyclic loading”, *Construction and Building Materials.*, 2017;149:29-36.
- [33] G. Magenes, GM. Calvi, “In-plane seismic response of brick masonry walls”, *Earthquake engineering & structural*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*H. Mirabi Banadaki, R. Morshedb, A. Eslamic, Experimental investigation on the NSM retrofitted adobe walls under cyclic lateral loading, Amirkabir J. Civil Eng., 52(9) (2020) 2227-2242.*

DOI: [10.22060/ceej.2019.16108.6127](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16108.6127)

