

۱- مقدمه

به صورت گسترده‌ای در سراسر دنیا حتی در نقاطی که در معرض خطر زیاد زلزله قرار دارند، از ساختمان‌های با دیوارهای غیرمسلح مصالح بنایی استفاده شده است [۱-۲]. آن‌ها عمدتاً برای تحمل بارهای ثقلی طراحی شده‌اند، بنابراین تعداد زیادی از آن‌ها در مقابل زلزله آسیب‌پذیر هستند [۲-۳]. با توجه به آمار بالای ساختمان‌های موجود که در مناطق زلزله‌خیز با مصالح بنایی ساخته شده‌اند خصوصاً در شرایط بحرانی پس از زلزله، تخریب و دوباره ساختن آن‌ها راه‌حل اقتصادی نیست [۴]. یکی از چالش‌های اساسی پس از زلزله ترمیم سازه آسیب‌دیده و استفاده مجدد و سریع از بنا می‌باشد. از اینجا اهمیت ترمیمی که نه تنها به لحاظ اقتصادی به صرفه باشد بلکه در شرایط بحرانی پس از زلزله رضایت بهره‌برداران در حین بهره‌برداری را جلب کند، مشخص می‌شود. راه‌حل‌های آیین‌نامه‌ای زیادی برای مقاوم‌سازی و ترمیم ساختمان‌های مصالح بنایی وجود دارند این روش‌ها شامل روش‌هایی مانند روش‌های

بررسی رفتار چرخه‌ای درون صفحه دیوار آجری غیرمسلح آسیب‌دیده ترمیم شده با کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی با و بدون بتن پاششی^۱ با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی

بتول ریسمانیان یزدی^۱، محمدرضا جواهری تفتی^{۱*}، علیرضا میرجلیلی^۲

۱- دانشکده مهندسی، واحد تفت، دانشگاه آزاد اسلامی، تفت، ایران

۲- دانشکده مهندسی، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

چکیده

در مقاله حاضر اثر روش‌های ترمیم دیوار مصالح بنایی غیرمسلح آسیب‌دیده تحت اثر بارگذاری ثقلی همراه با بارگذاری چرخه‌ای داخل صفحه با کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها و ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها و بتن پاششی در آزمایشگاه مطالعه شده است. به این منظور سه بار دیوار باربر مصالح بنایی با مقیاس واقعی تحت اثر بار قائم همراه با بار جانبی مطابق الگوی بارگذاری^۲ آزمایش شد، دیوار مشابه با دیوارهای سیستم مصالح بنایی رایج در ایران ساخته شد. نمونه دیوار غیرمسلح مصالح بنایی به عنوان نمونه شاهد تحت اثر بار قائم ثقلی و بارگذاری جانبی چرخه‌ای^۳ درون صفحه آزمایش شد و سپس نمونه آسیب‌دیده به کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها در یک وجه ترمیم گردید و دوباره تحت اثر بار قائم و بار جانبی چرخه‌ای درون صفحه آزمایش شده است. سپس نمونه آسیب‌دیده با کمک بتن پاششی بر روی دو وجه آن ترمیم و آزمایش شده است. ترمیم دیوار غیرمسلح مصالح بنایی آسیب‌دیده به کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها نه تنها اکثر ویژگی‌های لرزه‌ای اولیه دیوار سالم را در نمونه ایجاد کرد بلکه رفتار دیوارها را تا حد زیادی بهبود بخشید و در دیوار آسیب‌دیده ترمیم شده با ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها و بتن پاششی در دو وجه دیوار علاوه بر ایجاد ویژگی‌های لرزه‌ای اولیه دیوار سالم و بهبود آن‌ها، جذب انرژی در دیوار نیز افزایش داده شده است. ترمیم دیوار مصالح بنایی آسیب‌دیده با کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها مد گسیختگی در محل ستونک‌های قائم بتنی را به برشی لغزشی در محل اتصال آن‌ها به بستر تغییر دادند. پاشیدن بتن بر روی نمونه آسیب‌دیده یک پانل کاملاً سخت را به وجود آورد که از شکل‌گیری ترک‌ها جلوگیری نمود و مد شکست نمونه را به برشی لغزشی بستر اتصال تغییر داد. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند با ترمیم دیوار آسیب‌دیده به کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی ۲۱۹ درصد مقاومت جانبی و با ترمیم دیوار آسیب‌دیده به کمک ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی بر روی یک وجه و پاشیدن بتن بر روی دو وجه دیوار ۴۶۴ درصد مقاومت جانبی افزایش داده شده است.

کلمات کلیدی: دیوار مصالح بنایی غیرمسلح آسیب‌دیده، ترمیم، ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی، بتن پاششی،

بارگذاری جانبی چرخه‌ای

*نویسنده مسئول: محمدرضا جواهری تفتی

پست الکترونیکی: javaheri@taftiau.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

سطحی از جمله استفاده از بتن پاششی، پلیمر تقویت شده با الیاف^۴، تزریق گروت و اپوکسی^۵، نصب نزدیک سطح^۶، ایجاد محصوریت^۷ و پیش‌تنیده کردن^۸ می‌باشد [۳-۱].

در این تحقیق روش‌های مختلف ترمیم دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح، استفاده از ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها همراه با و بدون بتن پاششی بر روی دیوار آسیب‌دیده بررسی شده است. این روش مزایایی چون سادگی و سرعت بالای اجرا، مصالح مصرفی ارزان و آسیب کم به ساختمان موجود در حین تعمیر را دارد. ساختمان‌های دیوار باربر در مقابل بارهای جانبی شامل بار باد و زلزله هم زمان با وارد شدن نیروهای ثقلی مقاوم هستند، همچنین بررسی رفتار کلی این ساختمان‌های مصالح بنایی به طور قابل ملاحظه‌ای تحت اثر رفتار این دیوارهای باربر به عنوان اعضای اصلی ساختمان هستند. یکی از راه‌های بسیار مهم برای بررسی رفتار کلی این ساختمان‌ها، مطالعه آزمایشگاهی آن‌ها است [۵-۶]. تسو [7]، کاظمی و حسین‌زاده اصل [۸] آزمایشات محصور کردن دیوار مصالح بنایی با قاب‌های فولادی را انجام دادند [۷-۸]. در همان زمان بیشتر مطالعات بر روی دیوار مصالح بنایی محصور شده شامل به کار بردن المان‌های مقاوم‌سازی بتنی بودند. گویا و لورنکو [۹] شانزده آزمایش چرخه‌ای استاتیکی بر روی دیوار مصالح بنایی به منظور محاسبه آثار پرکننده اتصال بالا سری، المان‌های مصالح بنایی محصورکننده و مقاوم‌سازی محل اتصال انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت شکل‌پذیری و اتلاف انرژی نمونه‌های آزمایشگاهی با اضافه کردن المان‌های محصورکننده به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. صرافی و عشقی [۱۰] آزمایش‌های چرخه‌ای استاتیکی بر روی هفت نمونه با مقیاس یک دوم از دیوار مصالح بنایی با در نظر گرفتن اثر پر کردن درزهای قائم آن‌ها با ملات، اثر بازشوی مرکزی و بارهای عمودی را انجام دادند. جدا از آثار بارهای قائم آن‌ها به این نتیجه رسیدند که حذف ملات درزهای قائم به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت جانبی تغییر شکل و ظرفیت اتلاف انرژی را کاهش می‌دهد.

هری [۱۱] اثر بارهای قائم و ارتفاع موثر دیوار و اثر گشتاور روی دیوار محصور شده را بررسی کرد. مکانیسم شکست نمونه‌های آزمایش شده، لغزش برشی ملات درزها بود. شکست برشی مهار گوشه فشاری و جاری شدن کششی میلگردها در مهار گوشه کششی در میلگردها رخ داد، که از ضعف ملات در مقابل بلوک‌های قوی به وجود می‌آید و رفتار پایدار حتی در جابجایی‌های جانبی بزرگ را به وجود می‌آورند. یکرنگ‌نیا و بخشی [۱۲] رفتار دیوارهای محصور شده را بررسی و مدهای گسیختگی و روابط تحلیلی مربوط به آن‌ها را ارائه کردند. نتایج آزمایشگاهی را با آیین‌نامه‌های مختلف مقایسه نمودند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که طبق روابط پیشنهادی آن‌ها رفتار دیوارهای مصالح بنایی محصور شده دارای مد شکست برشی می‌باشند و نکات تکمیلی برای آیین‌نامه‌های موجود ارائه شد. زو و همکاران [۱۳] در مورد ترمیم دیوار مصالح بنایی آسیب‌دیده با الیاف پلیمری بازالت^۹ و سانتا ماریا و آلسینو [۱۴] در مورد ترمیم دیوار مصالح بنایی آسیب‌دیده با الیاف پلیمری کربنی^{۱۰} مطالعه نمودند. در هر دو مورد ثابت شد که استفاده از روشهای ترمیمی موثر هستند. مستفرج و یاردیم [۱۵] از پوشش فروسمنت و گچ تقویت شده با پلی‌پروپیلین و پلیمرهای

1 Shotcrete

2 Protocol

3 Cyclic lateral loading

4 Fiber Reinforced Polymer

5 Injecting grout or epoxy

6 Near Surface Mounted

7 confinement

8 Pre-stressing

9 Basalt Fiber Reinforced Polymer

10 Carbon Fiber Reinforced Polymer

تقویت شده با الیاف کربن همراه با دو نوع ملات استفاده کردند. که این روشها در ترمیم دیوار موثر بودند. قزلباش، احتشامی، مردانی، یکرنگ‌نیا و همکاران [۱۶-۱۸] جهت ترمیم دیوار آسیب‌دیده مصالح بنایی از شبکه فلزی همراه با بتن پاششی استفاده کردند که دیوارهای ترمیم شده عملکرد بهتری را نشان دادند.

کاربرد و ارزیابی عملکرد ستونک‌های قائم بتنی و بتن پاششی برای ترمیم دیوار آسیب‌دیده مصالح بنایی موضوع این تحقیق می‌باشد. مطالعه این سیستم ترمیمی برای اولین بار پیشنهاد گردیده است. مصالح مورد نیاز ارزان با دسترسی آسان در بیشتر مناطق، راحتی و سادگی اجرا در زمان کوتاه در مقایسه با سایر روشهای ترمیمی از مزایای این سیستم می‌باشند. هدف اصلی این مطالعه ثابت کردن موارد زیر می‌باشد: ۱- گرچه این روش مقرون‌به‌صرفه با اجرای آسان می‌باشد ولی نه تنها عملکرد دیوار را بهبود می‌بخشد، بلکه ظرفیت لرزه‌ای را تا حد قابل توجهی زیاد می‌کند. ۲- مقاومت نهایی دیوار ترمیم‌شده بزرگتر از دیوار غیرمسلح مصالح بنایی سالم می‌باشد. با توجه به موارد فوق، سیستم مورد مطالعه در این تحقیق بهبود قابل توجهی در عملکرد لرزه‌ای دیوارهای مصالح بنایی ساخته شده دارد که می‌تواند در مناطق گسترده‌ای به ویژه در کشورهای در حال توسعه مانند ایران استفاده شود. این مقاله یک مطالعه بر روی رفتار جانبی دیوار آسیب‌دیده مصالح بنایی غیرمسلح ترمیم شده به وسیله آزمایش دیوار مقیاس واقعی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی و بار ثقلی ثابت بود، دیوار قبل از ترمیم تا مقاومت نهایی بارگذاری شد. سپس دیوار آسیب‌دیده به وسیله ستونک‌های قائم بتنی همراه با میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها ترمیم و آزمایش تکرار گردید. دوباره دیوار آسیب‌دیده به وسیله ستونک‌های قائم بتنی همراه با میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها و بتن پاششی بر روی آن ترمیم شد و مطالعه مقایسه‌ای رفتار جانبی دیوار قبل و بعد از ترمیم ارائه شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

نمونه با مقیاس واقعی و با ویژگی‌های مطابق با دیوارهای مورد استفاده در ایران به منظور تحقیق آزمایشگاهی در آزمایشگاه مرکز تحقیقات سازه و زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت برای بررسی اثر ترمیم دیوار آسیب‌دیده ساخته شد. دیوار با مصالح بنایی غیرمسلح، ملات ماسه سیمان و آجر ساخته شد و قبل از ترمیم تحت اثر بار چرخه‌ای تا مقاومت نهایی بارگذاری گردید، سپس دیوار آسیب‌دیده ترمیم شد. ابتدا دیوار با میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها و ستونک‌های قائم بتنی در یک طرف و دوباره دیوار با میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها و ستونک‌های قائم بتنی در یک طرف و بتن پاششی در دو طرف آن ترمیم شد و تحت اثر بارگذاری و شرایط مرزی یکسان آزمایش شد.

۲-۱- نمونه‌های آزمایشگاهی

ابتدا یک نمونه دیوار مصالح بنایی آجری با مقیاس واقعی (۳۵۰×۱۵۰×۲۶۳۰) میلی‌متر (ضخامت×طول×ارتفاع) به عنوان نمونه شاهد از آجر با ابعاد (۱۰۰×۲۲۰×۵۰) میلی‌متر (ضخامت×طول×ارتفاع) و ملات ماسه سیمان به وسیله بنای محلی با روشی مشابه واقعیت، بر اساس ویژگی‌هایی مشابه با دیوارهای مصالح بنایی ایران، در آزمایشگاه ساخته شد. ویژگی‌های دیوار در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است. دیوار بر روی پی مسلح بتنی با ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر و پهنای ۵۱۰ میلی‌متر ساخته شد. تیر بتنی

مسلح با ارتفاع ۲۹۰ میلی‌متر و ضخامت ۳۵۰ میلی‌متر از بتن مسلح بر روی هر دیوار به منظور پخش یکنواخت بار قائم از طریق اتصال جک بارگذاری افقی بر روی دیوار در نظر گرفته شده است.

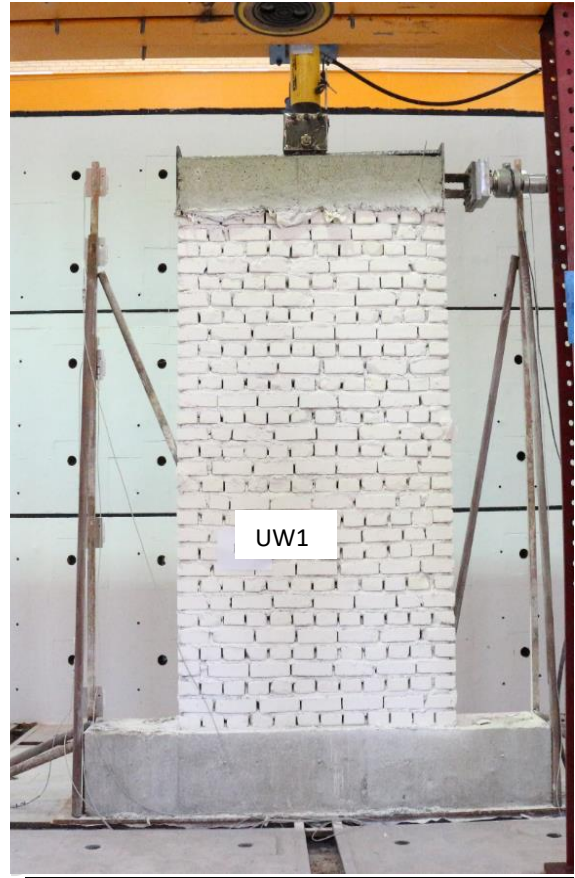
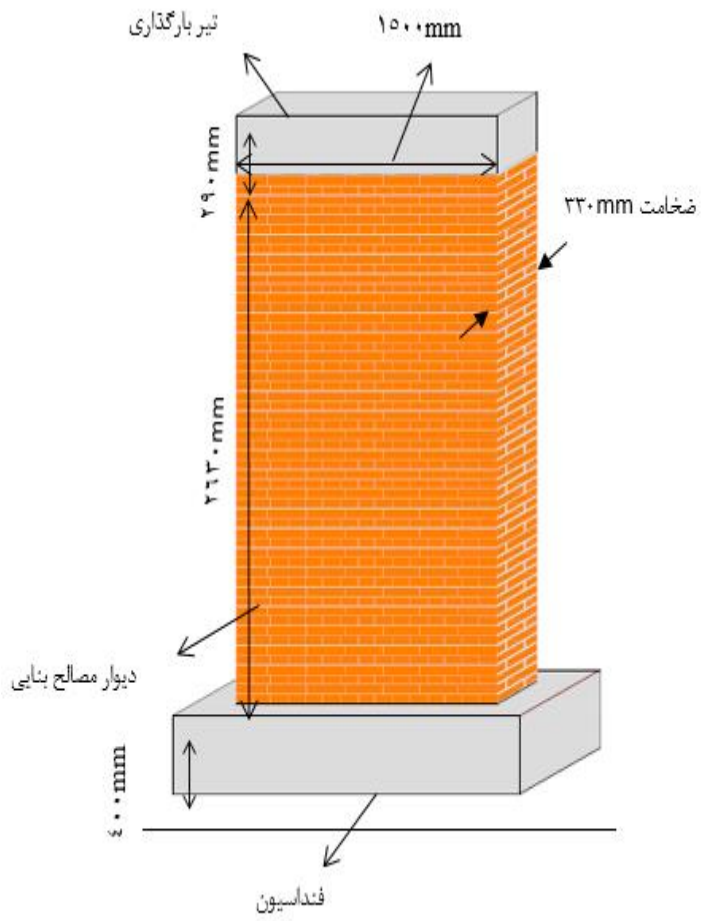
جدول ۱: ویژگی‌های دیوار

نام نمونه	طول (mm)	عرض (mm)	ارتفاع (mm)	نسبت ارتفاع به طول	مقاومت فشاری واحد مصالح بنایی (MPa)	مقاومت برشی محل اتصال (MPa)
UWI	۱۵۰۰	۳۵۰	۲۶۳۰	۱/۷۵	۴/۷۶	۰/۲۲

به منظور ترمیم دیوار آسیب‌دیده ابتدا در یک وجه دیوار شیارهایی با ابعاد (۱۰۰×۱۰۰×۲۶۳۰) (ارتفاع×طول×ضخامت) میلی‌متر ایجاد شد. در وسط شیار میلگردی سراسری به عمق ۱۵۰ میلی‌متر در پی و ۱۰۰ میلی‌متر در تیر بارگذاری مطابق شکل ۲ کاشته شد. قطر شیار جهت کاشت میلگرد ۲۰ میلی‌متر بزرگتر از قطر میلگرد کاشت در نظر گرفته شد. قبل از کاشت میلگرد با دمیدن هوا توسط شلنگ باد شیار تمیز شد، سپس فضای خالی بین میلگرد کاشته‌شده و تیر بارگذاری و پی با چسب اپوکسی پر شد. چسب اپوکسی مصرفی بر اساس استاندارد [۱۹] EN ISO 60 مقاومت فشاری 45 N/mm^2 و چگالی 1.56 Kg/m^3 داشت. میلگردهای افقی با قطر ۸ میلی‌متر، طول ۱۵۰۰ میلی‌متر و به فاصله ۶۰۰ میلی‌متر به صورت افقی در دیوار مطابق شکل ۳ کاشته شد. به منظور ترمیم دیوار در مرحله دوم در یک وجه دو شیار با ابعاد (۱۰۰×۱۰۰×۲۶۳۰) (ارتفاع×طول×ضخامت) میلی‌متر و میلگردهای افقی با قطر ۸ میلی‌متر، طول ۱۵۰۰ میلی‌متر و به فاصله ۶۰۰ میلی‌متر به صورت افقی در درزهای بین آجرهای دیوار قرار گرفت و در مرحله بعد توسط کارگر محلی تمام سطح دیوار تمیز شد و سپس بتن به ضخامت ۵۰ میلی‌متر روی دو وجه آن مطابق شکل ۴ پاشیده شد. ویژگی‌های نمونه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های نمونه‌ها

نام نمونه	ترمیم شده	طول (mm)	ارتفاع (mm)	ضخامت (mm)	توضیحات
UWI	-	۱۵۰۰	۲۶۳۰	۳۳۰	دیوار غیرمسلح (نمونه شاهد)
RWI	بله	۱۵۰۰	۲۶۳۰	۳۳۰	دیوار آسیب‌دیده ترمیم شده با ستونک‌های قائم بتنی در یک وجه دیوار
SRWI	بله	۱۵۰۰	۲۶۳۰	۳۳۰	دیوار آسیب‌دیده ترمیم شده با ستونک‌های قائم بتنی در یک وجه و بتن پاششی بر روی دو وجه دیوار



شکل ۱: ویژگی‌های دیوار نمونه UW1.



شکل ۲: نحوه کاشت میلگرد در نمونه RUW1.

۱-۲-۲- آجر و ملات و واحد مصالح بنایی

ابعاد آجرها (۱۰۰×۲۲۰×۵۰) میلی‌متر (ضخامت×طول×ارتفاع) بودند و مقاومت فشاری آجر فشاری ۱۵,۰۰ مگا پاسکال با انجام آزمایش بر روی شش نمونه مطابق استاندارد [۲۰] ASTM C-67-00-2002 به‌دست آمده است. ملات سیمان برای دیوار مصالح بنایی از ترکیب نسبت ۱:۵ (ماسه : سیمان، با حجم) و ضخامت تقریبی ۱/۵ سانتی‌متر و مقاومت فشاری ملات ۱۶/۷۰ مگاپاسکال بر اساس استاندارد [۲۱] ASTM C109/C109M-16a-2016 به‌دست آمده است. از آزمایش پنج نمونه سه‌تایی اصلاح‌شده مصالح بنایی مقاومت برشی ملات ۰/۱۸ مگاپاسکال مطابق [۲۲] Harris and Sabnis, 1999 همان‌طورکه در شکل ۵ نشان داده شده، به‌دست آمده است. مطابق استاندارد [۲۳] ASTM C-1314-02a-2002 از آزمایش بر روی شش نمونه مقاومت فشاری واحد مصالح بنایی ۴/۷۶ مگاپاسکال همان‌طورکه در شکل ۶ نشان داده شده، به‌دست آمده است. ویژگی‌های مصالح و شرح آزمایش‌های انجام شده روی آن‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: ویژگی‌های مصالح

مراجع	شرح آزمایش	مقاومت فشاری (MPa)	تعداد نمونه‌ها	نوع نمونه
ASTM C-67-00 (2002)	مقاومت فشاری	۱۵,۰	۶	آجر
ASTM C39/C39M-99 (2000)	مقاومت فشاری بتن	۱۸,۷	۶	تیر بارگذاری و پی
INSO 3132 (2013)	مقاومت کششی جاری شدن میلگرد ۱۰	۵۶۰	۳	
INSO 3132 (2013)	مقاومت کششی جاری شدن میلگرد ۱۴	۵۲۰	۳	
ASTM C109/C109M-16a (2016)	مقاومت فشاری	۱۶,۷	۶	ملات دیوار
BS (Testing concrete Part 116 2003)	مقاومت فشاری	۱۶,۲	۳	ملات بتن پاششی
ASTM C-1314-02a (2002)	مقاومت فشاری واحد مصالح بنایی	۴,۷۶	۵	واحد مصالح بنایی
INSO 3132 (2013)	مقاومت کششی جاری شدن میلگرد ۱۰	۵۶۰	۳	ستونک‌های قائم بتنی
ASTM C39/C39M-99 (2000)	مقاومت فشاری بتن	۱۴,۸۵	۶	



شکل ۶: آزمایش مقاومت فشاری واحد مصالح بنایی.



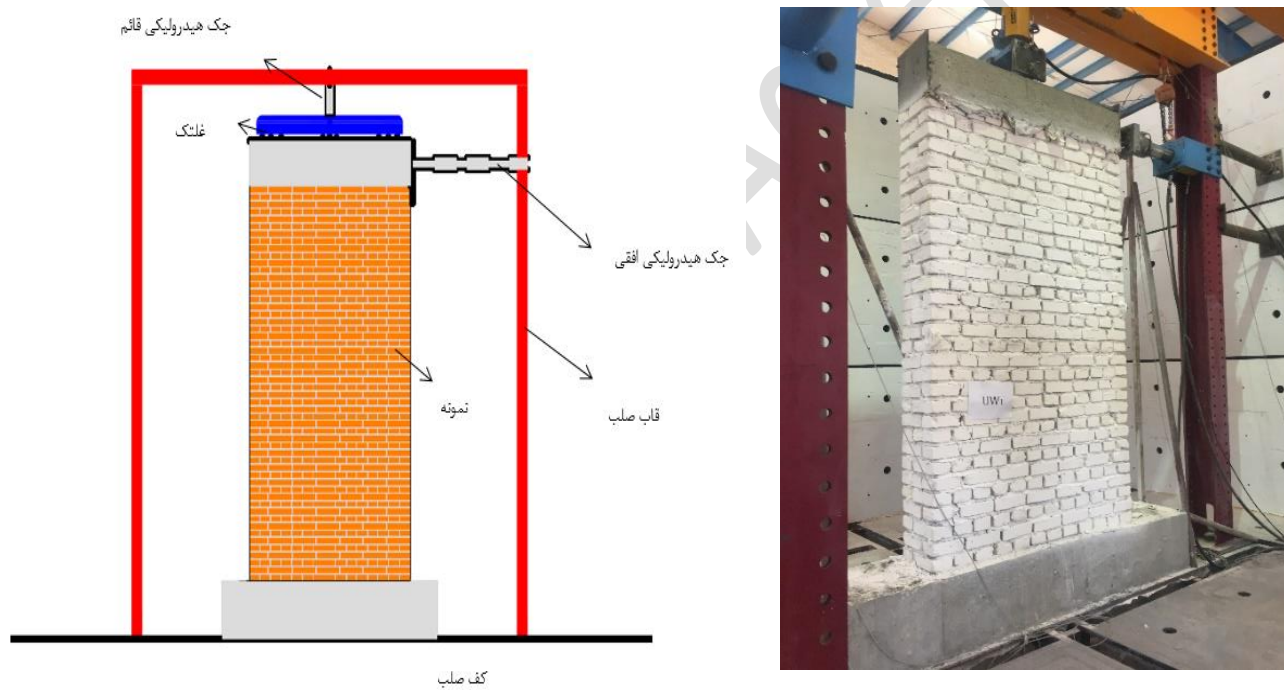
شکل ۵: آزمایش مقاومت برشی محل اتصال.

۲-۲-۲ ستونک‌های قائم بتنی

ستونک‌های قائم بتنی به عنوان مهار عمودی بر روی یک وجه از دیوار اضافه شدند، مقاومت فشاری بتن ستونک‌های بتنی بر طبق استاندارد [۲۴] ASTM C39/C39M-99 [2000] بر روی سه نمونه ۱۴/۸۵ مگاپاسکال به دست آمده است. ابعاد ستونک‌های قائم بتنی (۱۰۰×۱۰۰×۲۶۳۰) (ارتفاع×طول×ضخامت) میلی‌متر هستند و یک عدد میلگرد با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۲۶۵۵ در وسط آن قرار گرفته است، که ۱۵۰ میلی‌متر آن در تیر بارگذاری فوقانی مطابق شکل ۳ قرار گرفت و فضای بین میلگرد و بتن تیر بالایی و پایینی با ملات سیمان و چسب اپوکسی پر شده است.

۲-۳ روش انجام آزمایش

نمونه‌ها همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده، آزمایش شده‌اند. بارهای قائم محوری ثابت به صورت استاتیکی و پیوسته به وسیله عملگر ۱۱ هزار کیلو نیوتنی و بارهای افقی به وسیله یک عملگر هیدرولیکی هزار کیلو نیوتنی وارد شدند، بار قائم به وسیله صفحه صلب فلزی به صورت یکنواخت بر روی نمونه وارد شده است.

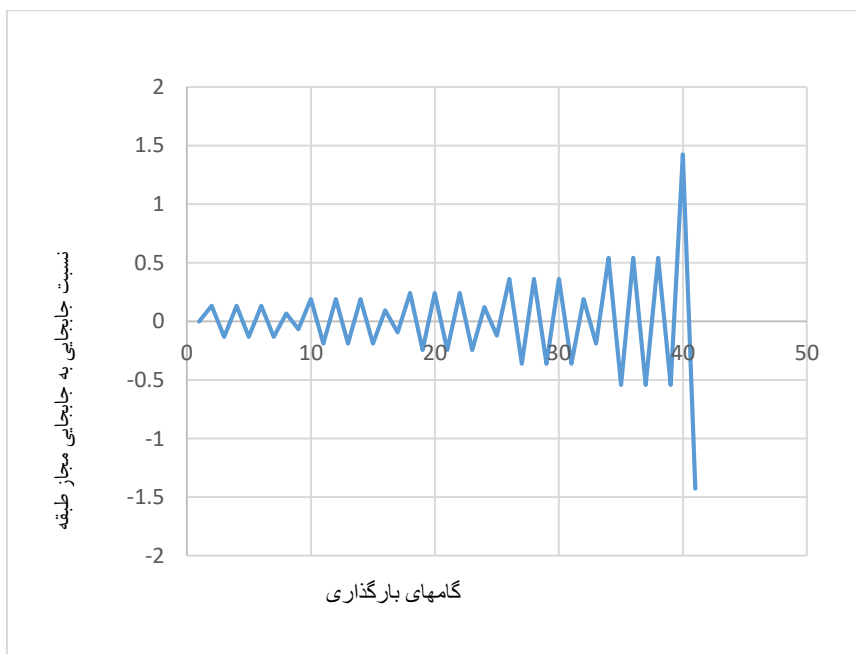


شکل ۷: روش انجام آزمایش.

۲-۴ روش بارگذاری

برای مطالعه رفتار چرخه‌ای داخل صفحه دیوار مصالح بنایی، یک دیوار داخلی بدون بازشو بین طبقه همکف و اول در یک ساختمان مصالح بنایی با سقف طاق ضربی یک‌طرفه به عنوان انتخابی مناسب از نمونه ساختمان‌های مصالح بنایی موجود مسکونی، اداری و مدارس در ایران در نظر گرفته شد. بر اساس جهت سقف طاق ضربی و ابعاد اتاق که ۵ در ۵ متر فرض شده است، بار ثقلی با فرض بار ثقلی ۷ کیلو نیوتن بر متر مربع به صورت بار قائم محوری ثابت ۱۰۵ کیلو نیوتن بر روی نمونه‌ها محاسبه گردید و بار قائم محوری ثابت ۱۰۵ کیلو نیوتن بر روی

نمونه‌ها وارد شد. بارگذاری چرخه‌ای جانبی داخل صفحه با کنترل جابجایی و افزایش تدریجی آن بر اساس [۲۵] ACI 374.1-05، مطابق نمودار ۱ انجام شد. الگوی بارگذاری بارگذاری بر اساس نسبت جابجایی جانبی، Δ ، به نسبت جابجایی مجاز طبقه، Δ_c و مراحل بارگذاری است. نسبت جابجایی مجاز برای قابهای کمتر از چهار طبقه ۰٫۰۲ است. که نسبت جابجایی، نسبت تغییرمکان جانبی دیوار به ارتفاع آن می‌باشد. بارهای جانبی به بالای نمونه‌ها اعمال می‌شود تا زلزله‌هایی با بارگذاری الگوی کم سرعت شبیه سازی شود. جزئیات جک‌های افقی و قائم در شکل ۸ نشان داده شده است. بارگذاری با سرعت ثابت ۲ میلی‌متر در دقیقه انجام شد.



نمودار ۱: الگوی بارگذاری.

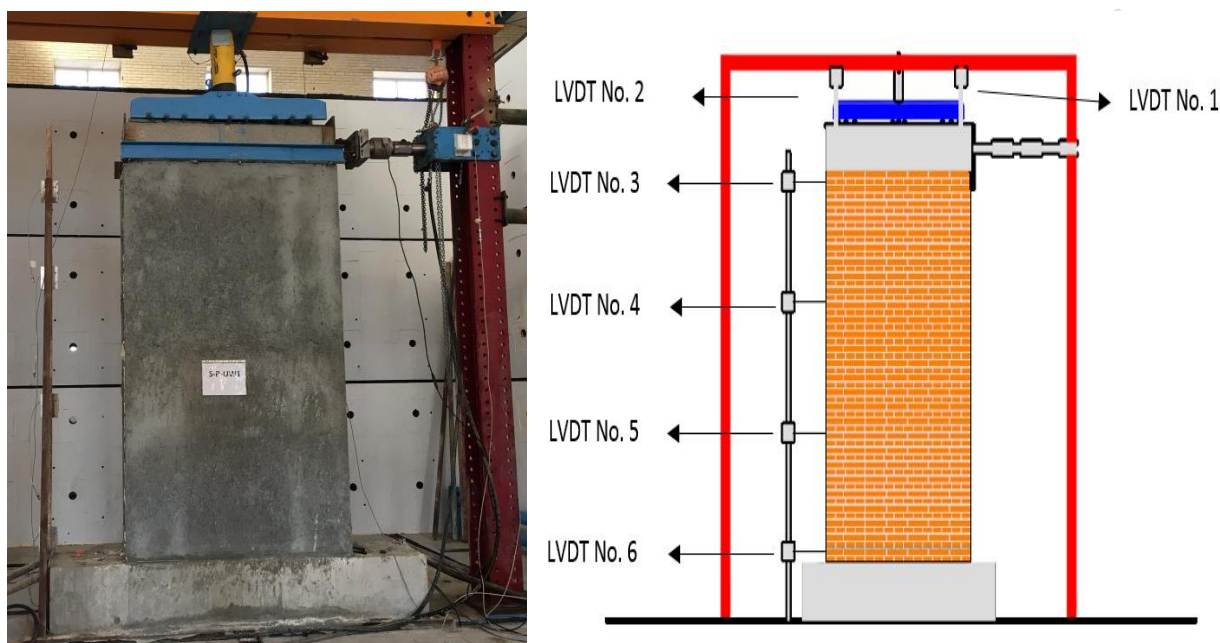
بار محوری فشاری ۱۰۵ kN بر روی قاب وارد شد.



شکل ۸: جزئیات جک‌های افقی و قائم.

۵-۲- تجهیزات

برای هر نمونه شش عدد ال‌وی‌دی تی^{۱۲} به منظور نمایش دادن جابجایی‌های افقی و قائم نصب شده است، که چهار عدد آن‌ها در امتداد ارتفاع نمونه برای ثبت جابجایی‌های داخل صفحه در کدهای ارتفاعی مختلف و دو عدد برای اندازه‌گیری مقدار بلندشدگی دیوار مصالح بنایی روی آن قرار داده شده است. در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی شامل جک‌های قائم و افقی و ال‌وی‌دی‌تی‌ها نشان داده شده است.



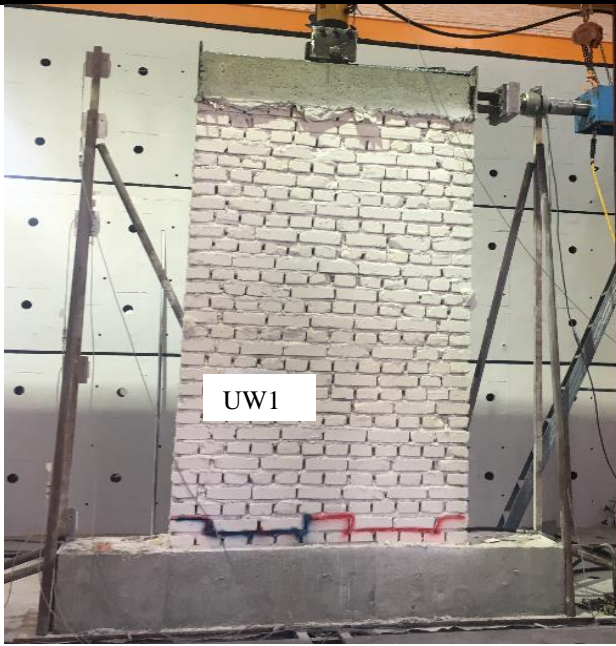
شکل ۹: تجهیزات.

۳- نتایج آزمایشگاهی مشاهده شده

در این قسمت مدل ترک خوردگی و مدهای شکست نمونه‌ها تحت اثر ترکیب بار ثقلی و افقی شرح داده می‌شود.

۳-۱- نمونه UW1

این نمونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، نسبت طول به ارتفاع پنجاه و هفت صدم را دارد. اولین ترک افقی قابل مشاهده در نسبت جابجایی ۰/۱۰۷٪ پایین دیوار در حدود ۲۰۰ میلی‌متری بالای پی، جلو نمونه در سمت راست آن تشکیل شده است. با ادامه بارگذاری در نسبت جابجایی ۰/۱۷۶٪ ترک‌های سمت چپ دیوار به وجود آمدند. در نسبت جابجایی ۰/۶۴۴٪ آجر پاشنه دیوار خرد شد و در نسبت جابجایی ۰/۹۶٪ آزمایش خاتمه یافت. مد شکست برشی لغزشی مشاهده شده است. روند شکل‌گیری ترک‌ها و خرابی‌ها در اشکال ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: در نسبت جابجایی $0/176\%$ ترک‌های ایجاد شده.



شکل ۱۰: در نسبت جابجایی $0/107\%$ وقوع ترک‌های اولیه.



شکل ۱۲: در نسبت جابجایی $0/96\%$ پایان آزمایش.

۳-۲- نمونه RUW1

این نمونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده، نسبت ارتفاع به طول پنجاه و هفت صدم را دارد. ترک خوردن نمونه در 200 میلی متری بالای فنداسیون سمت چپ در جلو نمونه شروع شد. در دریفت $0/917\%$ اولین ترک‌های قابل دیدن به وجود آمدند. ترک بعدی با ادامه دادن بارگذاری در سمت چپ نمونه به وجود آمد. پس از آن ستونک‌های قائم بتنی سمت چپ در محل اتصال ستونک به فنداسیون در دریفت $0/251\%$ ترک خورد و ترک از محل این ترک به سمت وسط دیوار گسترش پیدا کرد. در دریفت $0/461\%$ آجر پاشنه سمت راست دیوار خرد

شد و آزمایش در نسبت جابجایی $0/84\%$ پایان یافت. روند شکل گیری ترک‌ها و خرابی‌ها در اشکال ۱۴، ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است. ترمیم دیوار مصالح بنایی آسیب دیده با کمک ستونک‌های قائم بتنی و میگردهای افقی کاشته شده مد گسیختگی در محل ستونک‌های قائم بتنی را به برشی لغزشی در محل اتصال به فنداسیون تغییر دادند.



شکل ۱۴: در نسبت جابجایی $0/251\%$ ترک خوردن ستونک‌های قائم بتنی.



شکل ۱۳: در نسبت جابجایی $0/917\%$ اولین ترک‌های قابل دیدن.



شکل ۱۶: در نسبت جابجایی $0/84\%$ پایان یافتن آزمایش.



شکل ۱۵: در نسبت جابجایی $0/461\%$ خرد شدن آجر پاشنه.

۳-۳- نمونه SRW1

این نمونه که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، نسبت ارتفاع به طول پنجاه و هفت صدم را دارد. در دریافت $0/25\%$ اولین ترک‌های قابل دیدن در محل اتصال نمونه به فنداسیون به صورت برشی و افقی در جلو و عقب در سمت چپ به صورت همزمان رخ دادند. ترک بعدی با

ادامه دادن بارگذاری در سمت راست نمونه به وجود آمد. آجر پاشنه در وسط دیوار در دریافت $0/312\%$ آجر پاشنه خرد شد و در ادامه آزمایش در سیکل بعدی آجر پاشنه سمت راست نیز خرد شد و آزمایش در نسبت جابجایی $1/132\%$ به اتمام رسید. روند شکل گیری ترک‌ها و خرابی‌ها در اشکال ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده است. استفاده از بتن پاششی بر روی نمونه آسیب دیده یک پانل کاملاً سخت را به وجود آورد که از شکل گیری ترک‌ها جلوگیری نمود و مد شکست به برشی لغزشی در محل اتصال دیوار به فنداسیون تغییر کرد.



شکل ۱۸: ترک بعدی با ادامه دادن بارگذاری در سمت راست نمونه.



شکل ۱۷: در نسبت جابجایی $0/25\%$ اولین ترک‌های قابل دیدن.



شکل ۲۰: در نسبت جابجایی $1/132\%$ به اتمام رسیدن آزمایش.



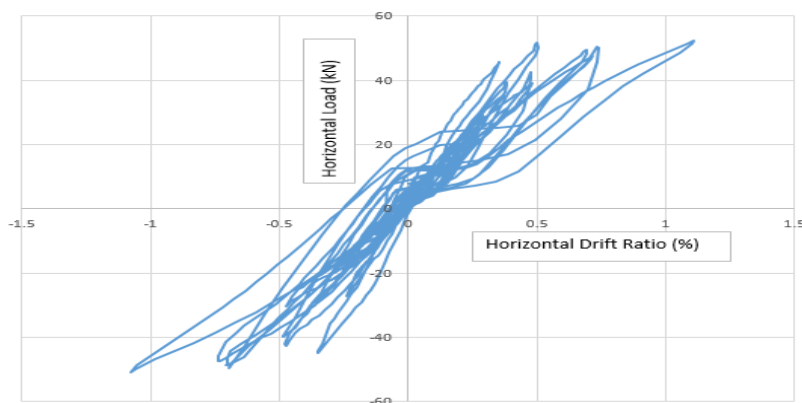
شکل ۱۹: در نسبت جابجایی $0/312\%$ خرد شدن آجر پاشنه.

۴- رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها

در این قسمت از نمودار چرخه‌های دیوار غیرمسلح مصالح بنایی شاهد و نمونه‌های ترمیم شده بررسی شده است.

۴-۱- نمونه UW1

شکل ۲۱ رفتار چرخه‌ای نمونه UW1 را تحت اثر بار جانبی نشان می‌دهد. حداکثر مقاومت جانبی در ۵۲/۱۵۳ کیلونیوتن کشش و ۴۸/۷۳ کیلونیوتن فشار به ترتیب در تغییرمکان نسبی ۲/۴۲ و ۲/۳۹ درصد ثبت شده است. در نمودار چرخه‌ای نمونه UW1 پدیده باریک‌شدگی^{۱۳} Pinching phenomena که بیان‌کننده اتلاف انرژی هست، را نشان می‌دهد. باز و بسته شدن ترک‌ها و شکست آجر پاشنه دیوار می‌توانند، این پدیده را توجیه کنند.

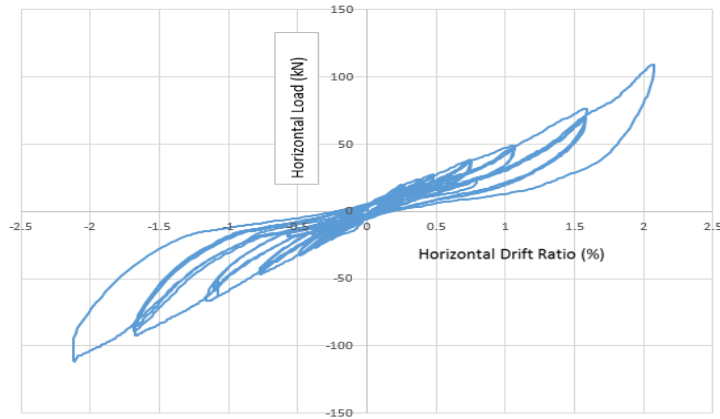


شکل ۲۱: نمودار چرخه‌ای نمونه UW1.

۴-۲- نمونه RUW1

شکل ۲۲ رفتار چرخه‌ای نمونه RUW1 را تحت اثر بار جانبی نشان می‌دهد. حداکثر مقاومت جانبی در ۱۰۹/۰۳۳ کیلونیوتن کشش و ۱۱۲/۱۳۲ کیلونیوتن فشار به ترتیب در تغییرمکان نسبی ۲/۰۶ و ۲/۱۱ درصد ثبت شده است. نمودار چرخه‌ای نمونه RUW1 شکل یکسانی در جهت کششی و فشاری دارد و نمونه آزمایش شده جذب انرژی بالایی را نشان داده شده است. نمودار پدیده باریک‌شدگی که بیان‌کننده اتلاف انرژی هست، را نشان می‌دهد. باز و بسته شدن ترک‌ها، بیرون کشیده شدن و باریک‌شدگی میلگرد داخل ستونک قائم بتنی، شکست آجر پاشنه دیوار می‌توانند، این پدیده را توجیه کنند.

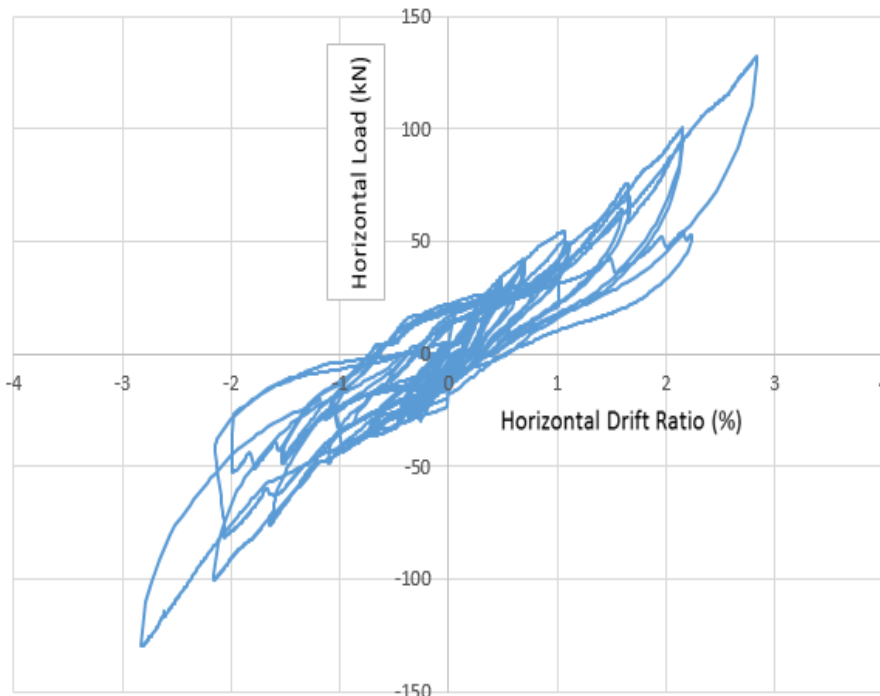
¹³ Pinching phenomena



شکل ۲۲: نمودار چرخه‌ای نمونه RUW1.

۳-۴- نمونه SRUW1

شکل ۲۳ رفتار چرخه‌ای نمونه SRUW1 را تحت اثر بار جانبی نشان می‌دهد. حداکثر مقاومت جانبی در ۱۳۲/۲۹۸ کیلونیوتن کشش و ۱۲۹/۷۳ کیلونیوتن فشار به ترتیب در تغییر مکان نسبی ۲/۸۳ و ۲/۸۱ درصد ثبت شده است. نمودار چرخه‌ای نمونه SRUW1 شکل تقریباً یکسانی در جهت کششی و فشاری دارد و نمونه آزمایش شده جذب انرژی بالایی را نشان داد. نمودار پدیده باریک‌شدگی که بیان‌کننده اتلاف انرژی هست، را نشان می‌دهد. باز و بسته شدن ترک‌ها، بیرون کشیده‌شدن و باریک‌شدگی میلگرد داخل ستونک قائم بتنی، شکست آجر پاشنه دیوار می‌توانند این پدیده را توجیه کنند.



شکل ۲۳: نمودار چرخه‌ای نمونه SRUW1.

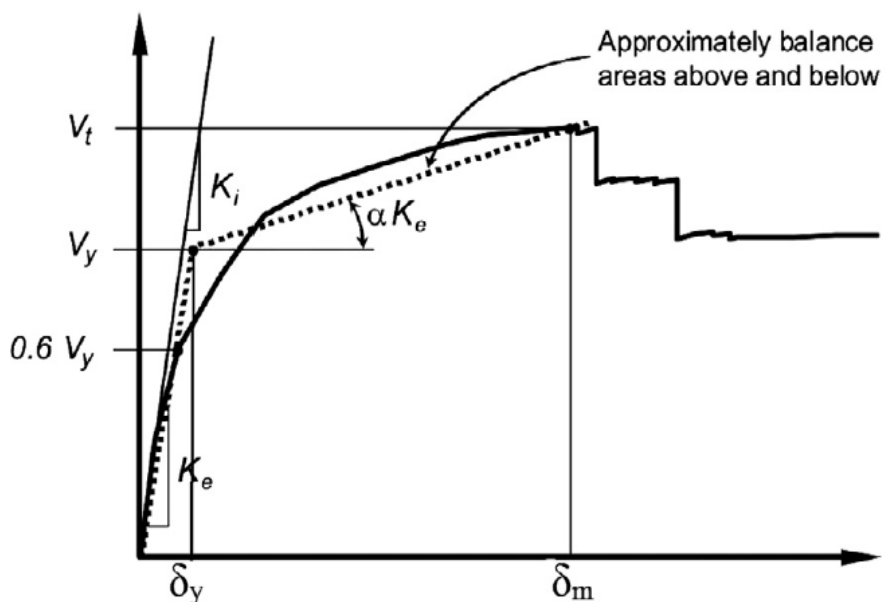
۵- مقایسه نمونه‌های ترمیم شده با نمونه شاهد

همانگونه که اشاره شد، نمونه شاهد فاقد هرگونه ترمیم می‌باشد و پس از انجام آزمایش، نمونه شاهد یک‌بار با ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها در یک طرف ترمیم شد. در این قسمت نمونه‌های ترمیم شده با نمونه شاهد مقایسه می‌شوند. منحنی‌های پوش چرخه‌ای مطابق [۲۶] FEMA356 و [۲۷] ASCE41 ایده‌آل‌سازی شده‌اند.

در منحنی‌های پوش با ترسیم دو خط مستقیم و معادل سازی سطوح بالایی و پایینی مطابق شکل ۲۴، ویژگی‌های مختلف چرخه‌ای مانند جابجایی نسبی و بار در مقاومت جاری شدن و حداکثر، جابجایی شکل‌پذیر، سختی شکل‌پذیر و اولیه نمونه‌ها محاسبه شده‌اند. سختی اولیه $[K_i]$ شیب منحنی پوش آزمایشگاهی در مبدا است. سختی موثر $[K_e]$ و جابجایی شکل‌پذیر μ به صورت زیر تعریف شده است. که V_y ، δ_m و δ_y به ترتیب مقاومت جاری شدن، جابجایی جاری شدن و جابجایی حداکثر هستند. که V_y ، δ_m و δ_y به ترتیب مقاومت جاری شدن، جابجایی جاری شدن و جابجایی حداکثر هستند.

$$K_e = \frac{V_y}{\delta_y} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad (2)$$



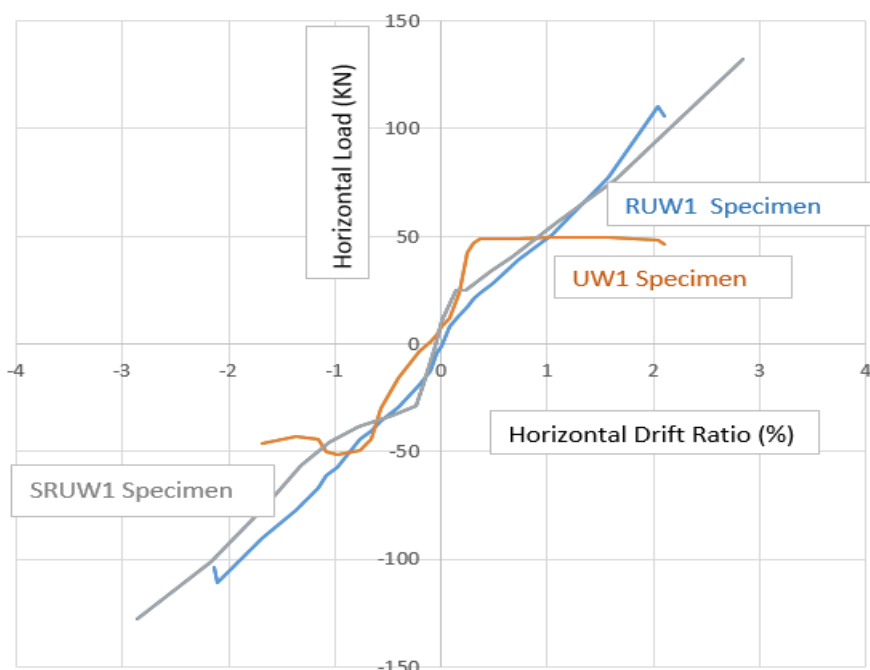
شکل ۲۴: منحنی دو خطی نیرو-جابجایی ایده‌آل شده.

۵-۱- مقایسه دیوارهای RUW1، UW1 و SRUW1

این نمونه‌ها با مقیاس واقعی و ابعاد (۳۵۰×۱۵۰×۲۶۳) میلی‌متر (ضخامت×طول×ارتفاع) بودند. منحنی پوش بار جانبی-تغییر مکان جانبی در شکل ۲۵ رسم شده است و همچنین ویژگی‌های چرخه‌ای آن‌ها در جدول ۴ داده شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد ترمیم دیوار آسیب‌دیده با ستونک‌های قائم موجب افزایش سختی جانبی اولیه ۲۴۳ درصد، سختی موثر ۳۵۶ درصد، بار مقاومت جاری شدن ۲۱۵ درصد، جابجایی نسبی جاری شدن ۱۹۰ درصد، بار در مقاومت حداکثر ۲۱۹/۲۳ درصد و جابجایی ۳۸۶ درصد شده است. در ضمن افزایش جابجایی شکل‌پذیر (نسبت جابجایی در تغییر مکان حداکثر به تغییر مکان جاری شدن) ۲۲۶/۴ درصد، بیشتر از دو برابر رخ داده است

و کاهش اتلاف انرژی ۹۵/۷۲ درصد مشاهده شده است. افزودن ستونک‌های قائم بتنی در نمونه آسیب‌دیده نه تنها اکثر ویژگی‌های جانبی دیوار اولیه را در نمونه ایجاد کرده است، بلکه تعداد زیادی از آن‌ها را در حد زیادی بهبود بخشیده است.

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد ترمیم دیوار آسیب‌دیده با پاشیدن بتن علاوه بر اضافه کردن ستونک‌های قائم بتنی و کاشتن میلگردهای افقی بر روی نمونه آسیب‌دیده باعث موجب افزایش سختی جانبی اولیه ۱۷۳ درصد، سختی جانبی مؤثر ۲۹۷/۳۷ درصد، بار در نقطه جاری شدن ۲۱۹ درصد، جابجایی نسبی ۲۰۵ درصد، بار در نقطه مقاومت حداکثر ۴۶۴ درصد و جابجایی نسبی ۱۱۷/۳ درصد، میزان اتلاف انرژی ۲۳۳/۸ درصد، بیشتر از دو برابر شده است و جابجایی شکل‌پذیر (نسبت جابجایی در تغییر مکان حداکثر به تغییر مکان جاری‌شدن) ۳۷۳ درصد زیاد شده است.



شکل ۲۵: منحنی پوش بار جانبی - تغییر مکان جانبی.

جدول ۴: ویژگی‌های لرزه‌ای نمونه‌ها

نام نمونه	نسبت طول اعضا	پوش	سختی جانبی		مقاومت جاری شدن		مقاومت حداکثر		اتلاف انرژی (kN mm)	جابجایی شکل‌پذیر
			اولیه (kN/mm)	مؤثر (kN/mm)	بار (kN)	جابجایی نسبی %	بار (kN)	جابجایی نسبی %		
UW1	۰/۵۷	مثبت	۲۴/۵۷	۱۶/۰۳	۱۱/۹۴	۰/۱۰۷	۵۲/۱۵۳	۲/۴۲	۹۰۴/۱۸	۸/۷۵
		منفی	۱۸/۸۳	۱۱/۴۳	۱۲/۶۳	۰/۱۷۱	۴۸/۷۳	۲/۳۹	۶۴۸/۸۴	۸/۲۲
		میانگین	۲۱/۷۰	۱۳/۷۳	۱۲/۲۸۵	۰/۱۳۹	۵۰/۴۴	۲/۴۰	۷۷۶/۵۱	۸/۴۹
RUW1	۰/۵۷	مثبت	۵۲/۶۹	۴۸/۸۳	۲۳/۶۷	۰/۱۲	۱۰۹/۰۳۳	۲/۰۶	۹۲۳/۶۲	۱۸/۵۵
		منفی	۵۲/۹۶	۴۸/۴۱	۲۹/۱۸	۰/۴۱	۱۱۲/۱۳۲	۲/۱۱	۵۶۳/۰۷	۱۹/۸۸
		میانگین	۵۲/۸۳	۴۸/۸۲	۲۶/۴۳	۰/۲۶۵	۱۱۰/۵۸	۲/۰۸۵	۷۴۳/۳۴۵	۱۹/۲۲
(Retrofitted/Unretrofitted) %			۲۴۳	۳۵۶	۲۱۵	۱۹۰/۶	۲۱۹/۲۳	۸۶/۸۷	۹۵/۷۲	۲۲۶/۴
SRUW1	۰/۵۷	مثبت	۴۰/۰۱	۴۰/۴۸	۲۴/۹۰	۰/۳۱	۱۳۲/۲۹	۲/۸۳	۱۳۲۶/۹۸	۲۸/۳۵
		منفی	۳۵/۳۰	۴۱/۱۸	۲۹/۰۵۱	۰/۲۶۱	۱۲۹/۷۳	۲/۸۰	۲۳۰۴/۷۰	۳۴/۹۸

میانگین	۳۷/۶۶	۴۰/۸۳	۲۶/۹۷	۰/۳۸۵	۱۳۱/۰۱	۲/۸۱۵	۱۸۱۵/۸۴	۳۱/۶۷
(Retrofitted/Unretrofitted)%	۱۷۳	۲۹۷/۳۷	۲۱۹/۵	۲۰۵	۴۶۴	۱۱۷/۳	۲۳۳/۸	۳۷۳

اگر نمونه ترمیم شده با بتن پاششی، ستونک‌های قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده را با نمونه ترمیم شده با ستونک‌های قائم بتنی مقایسه کنیم درمی‌یابیم که سختی جانبی جاری شدن موثر و اولیه با افزودن ستونک‌های قائم بتنی به طور قابل ملاحظه‌ای ۲ تا ۳/۵ برابر افزایش می‌یابد و با انجام بتن پاششی روی نمونه ترک‌خورده به میزان قابل توجهی بیشتر از ۲ برابر و میزان جابه‌جایی شکل‌پذیر بیشتر از ۳ برابر شده است. این روش‌های ترمیم تقریباً بیشتر ویژگی‌های چرخه‌ای را به صورت قابل توجهی بهبود داده است. ستونک‌های قائم بتنی و بتن پاششی نقش مهمی در بهبود رفتار جانبی نمونه ترک‌خورده داشته است.

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

این مقاله روش‌های ترمیم دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح در مقابل زلزله را مطالعه می‌کند. روش‌ها شامل کاشتن میلگردهای افقی و دو ستونک قائم بتنی در یک وجه دیوار و پاشیدن بتن بر روی دو وجه آن می‌باشند. در مجموع سه آزمایش انجام شده است. یک بار نمونه بدون ترمیم به عنوان نمونه شاهد آزمایش شده است و سپس دیوار آسیب‌دیده بر روی یک وجه خود با دو ستونک قائم بتنی و میلگردهای افقی کاشته شده در درزهای بین آجرها ترمیم شده است. در آزمایش بعدی پاشیدن بتن روی دو وجه دیوار آسیب‌دیده انجام شده است. نمونه تحت اثر بار قائم ثابت و بارگذاری چرخه‌ای جانبی بود. نتایج زیر برای نمونه‌های آزمایش شده مشاهده شده است.

۱- نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که نمونه دیوار شاهد مقدار قابل توجهی از مقاومتش را پس از ترک خوردن نگه داشت و سطح بالای شکل‌پذیری و جذب انرژی قابل پیش‌بینی را داشت. با توجه به اینکه، حین زلزله بارها از جهات مختلف وارد می‌شوند، گسیختگی خارج از صفحه برای دیوارهای مصالح بنایی موضوع مهمی می‌باشد. بنابراین گرچه دیوارهای مصالح بنایی با مصالح متوسطی ساخته شده اند ولی می‌تواند رفتار داخل صفحه مناسبی را پس از شکل‌گیری ترک‌ها نشان دهند. سطح کارایی خارج از صفحه آن‌ها بر اثر ترک‌های داخل صفحه که به عدم یکپارچگی ختم می‌شود، می‌باشد. به هر حال اگر ساختمان یکپارچگی کافی در اتصالات دیوار به دیافراگم سقف و اتصالات را داشته باشد، نیروهای داخلی می‌تواند به صورت مناسبی به دیوارهای عمودی مقاوم در برابر نیروهای جانبی منتقل شود و دیوار مصالح بنایی می‌تواند به سطح کارایی مناسب برای کل ساختمان کمک کند.

۲- با اضافه کردن ستونک‌های قائم بتنی و کاشتن میلگردهای افقی مقاومت جاری شدن ۲۱۵ درصد و مقاومت حداکثر ۲۱۹ درصد افزایش می‌یابند و با اضافه کردن ستونک‌های قائم بتنی، کاشتن میلگردهای افقی و با پاشیدن بتن روی دو وجه دیوار مقاومت جاری شدن ۲۱۹ درصد و مقاومت حداکثر ۴۶۴ درصد افزایش داشتند.

۳- اضافه کردن ستونک‌های قائم بتنی جابجایی نسبی در نقطه جاری شدن ۱۹۰ درصد و با پاشیدن بتن روی دو وجه ۲۰۵ درصد زیاد شده است و اضافه کردن ستونک‌های قائم بتنی، سختی اولیه و موثر را به ترتیب تا ۲۴۳ و ۳۵۶ درصد و با پاشیدن بتن تا ۱۷۳ و ۲۹۷ درصد افزایش داده است.

۴- شکل‌پذیری یا نسبت جابجایی در تغییرمکان حداکثر به تغییرمکان جاری شدن، در نمونه ترمیم‌شده با ستونک‌های قائم بتنی ۲۲۶ درصد و در نمونه ترمیم‌شده با ستونک‌های قائم بتنی و بتن پاششی ۳۷۳ درصد زیاد شده است.

۵- مد گسیختگی در نمونه آسیب دیده ترمیم شده با میلگردهای افقی کاشته شده در درز بین آجرها و ستونک‌های قائم بتنی ترکیب لغزشی برشی پای بستر اتصال و گهواره‌ای بود و شکست آجر پاشنه رخ داد. به عبارت دیگر ترمیم دیوار با ستونک‌های قائم بتنی میلگرد بستر به عنوان یک همبند مد گسیختگی در محل ستونک‌های قائم بتنی را به لغزشی برشی پای بستر تغییر داد. استفاده از بتن پاششی بر روی نمونه آسیب دیده یک پانل کاملاً سخت را به وجود آورد که از شکل گیری ترکها جلوگیری نمود و مد شکست به برشی لغزشی در محل اتصال دیوار به پی تغییر کرد و شکست نمونه در محل اتصال نمونه به پی رخ داد، خرد شدن آجر پاشنه در وسط عرض دیوار مشاهده شد.

۶- در نمونه ترمیم شده با ستونک‌های قائم ترک‌ها نسبت به نمونه شاهد با پراکندگی کمتر و نازکتر بودند و در نمونه ترمیم شده با بتن پاششی فقط در محل اتصال دیوار به پی به صورت نازک و در عرض دیوار به صورت خرد شدن آجر پاشنه وجود داشتند.

به عنوان نتیجه گیری کلی، مطالعه نشان می‌دهد که افزودن ستونک‌های قائم بتنی و کاشتن میلگردهای افقی در درز بین آجرها بر روی یک وجه و پاشیدن بتن بر روی دو وجه دیوار آسیب دیده نه تنها ویژگی‌های لرزه‌ای اولیه دیوار سالم را در نمونه ایجاد کرد، بلکه به میزان قابل توجهی اکثر آن‌ها را بهبود بخشیده است. این روش‌ها مزایایی چون راحتی و قیمت نسبتاً کم در اجرا را دارند. باید به این نکته توجه شود که به خاطر اینکه آزمایش روی تعداد محدودی نمونه انجام شده و گزارشات محدودی در این مورد وجود دارند، آزمایشات بیشتری برای عمومیت بخشیدن به نتایج فوق لازم است.

سپاسگزاری

نویسندگان از کلیه پرسنل آزمایشگاه مرکز تحقیقات زلزله و سازه دانشگاه آزاد اسلامی واحد تفت به خاطر فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی تقدیر و تشکر می‌نمایند.

منابع

- [1] Elgawady M, Letuzzi P, Badoux M (2004) A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM. In: 13th international brick and block masonry conference, Amsterdam.
- [2] Wilding BV, Beyer K (2016) Force-displacement response of in-plane loaded unreinforced brick masonry walls: the critical diagonal crack model. *Bull Earthq Eng* 15:2201-2244.
- [3] Shabdin, M., Zargar, M. and Attari, N. K. A. [2018c] "Experimental diagonal tension (shear) test of Unreinforced Masonry (URM) walls strengthened with textile reinforced mortar (TRM)," doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234.
- [4] Toranzo, L. A., Restrepo, J. I., Mander, J. B. and Carr, A. J. [2009] "Shake-table tests of confined-masonry rocking walls with supplementary hysteretic damping," *Journal of Earthquake Engineering* 13(6), 882-898. doi:10.1080/13632460802715040.
- [5] M.T. Shedid, W.W. El-Dakhkhni, R.G. Drysdale, Alternative strategies to enhance the seismic performance of reinforced concrete-block shear wall systems, *J. Struct. Eng.* 136 (6) (2009 Nov 21) 676-689.
- [6] T. Kasparik, M.J. Tait, W.W. El-Dakhkhni, Seismic performance assessment of partially grouted, nominally reinforced concrete masonry structural walls using shake table testing, *J. Perform. Constr. Facil.* 28 (2) (2012 Nov 3) 216-227.
- [7] Tso WK, Rutenberg A, Heidebrecht AC. Cyclic loading of externally reinforced masonry walls confined by frames. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1975, 2(4):489-493.
- [8] Kazemi MT, Hoseinzadeh Asl M, Bakhshi A, Rahimzadeh Rofooei F. Shaking table study of a full-scale single storey confined brick masonry building. *Scientia Iranica* 2010, 17(3):184-193.
- [9] Gouveia, J. P., & Lourenço, P. B. (2007). Masonry shear walls subjected to cyclic loading: influence of confinement and horizontal reinforcement. 10th North American masonry conference, St. Louis, Missouri, USA.
- [10] Sarrafi B, Eshghi S. Behavior of clay brick confined masonry walls under cyclic loads. *TMS Journal* 2012; 7-19.

- [11] Hori N, Inoue N, Purushotam D, Nishida T, Kobayashi J. Experimental and analytical studies on earthquake resisting behaviour of confined concrete block masonry structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2006, 35(13):1699–1719.
- [12] Yekrangnia M, Bakhshi A, Ghannad M.A., Force-displacement model for solid confined masonry walls with shear-dominated failure mode.
- [13] D. Zhou, Z. Lei, J. Wang, In-plane behavior of seismically damaged masonry walls repaired with external BFRP, *Compos. Struct.* 102 (2013) 9-19.
- [14] H. Santa-Maria, P. Alcaino, Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP, *Constr. Build. Mater.* 25 (3) (2011) 1172-1180.
- [15] H. Santa-Maria, E. Mustafaraja, Y. Yardimb, Retrofitting damaged unreinforced masonry using external shear strengthening techniques, <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100913>.
- [16] Ehteshami Moeini, M., Razavi, S. A., Yekrangnia, M., Poursagari, P., & Abbasian, N. (2022). Cyclic performance assessment of damaged unreinforced masonry walls repaired with steel mesh reinforced shotcrete. *Engineering Structures*, 253, 113747. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113747>.
- [17] Ghezelbash, A., Beyer, K., Dolatshahi, K. M., & Yekrangnia, M. (2020). Shake table test of a masonry building retrofitted with shotcrete. *Engineering Structures*, 219, 110912. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110912>.
- [18] Mardani, A., Dehkordi, M.R., Moghadam, A.S., & Yekrangnia, M. (2019). Example of a Two-Story Unreinforced Masonry Building Retrofitted by Shotcrete. *Advanced Design Examples of Seismic Retrofit of Structures*.
- [19] BS EN ISO 60 (2000) Plastics-Determination of apparent density of material that can be poured from a specified funnel, British Standard. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d32e9ed0-5009-45f0-83b7-8290915c8383/sist-iso-601996>.
- [20] ASTM C-67-00 (2002) Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. ASTM International, West Conshohocken. www.astm.org.
- [21] ASTM C109/C109M-16a (2016) Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). ASTM International, West Conshohocken. www.astm.org.
- [22] Harris, H. G. and Sabnis, G. [1999] *Structural Modeling and Experimental Techniques*, second Edition, CRC Press, Boca Raton, FL.
- [23] ASTM C1314-02A. Standard test method for compressive strength of masonry prisms. American Society for Testing and Materials; 2002.
- [24] ASTM C39/C39M-99 (2000) Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken. www.astm.org.
- [25] ACI 374.1-05 (2019) *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary: an ACI standard: an ACI report*. A. C. I. Committee 374, American Concrete Institute.
- [26] FEMA-356. *Pre standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2000.
- [27] ASCE. *Seismic rehabilitation of existing buildings – SEI/ASCE 41-06*. Reston. Va.: American Society of Civil Engineers; 2007.