

مطالعه آزمایشگاهی بر روی رفتار درون صفحه دیوارهای آجری بهسازی شده با

استفاده از کابل‌های فولادی با رویکرد مرکزگرا

محمود چاوشان^۱; احمدعلی فلاح^{۲*}; علیرضا میرجلیلی^۳; محمد یکرنگ نیا^۴

چکیده

ایران یکی از کشورهای زلزله‌خیز است که به دفعات متحمل تلفات و خسارات قابل ملاحظه‌ای ناشی از زلزله شده است. یکی از پرتعدادترین سیستم‌های سازه‌ای در کشور، ساختمان‌های مصالح بنایی است که جزو آسیب‌پذیرترین سیستم‌های سازه‌ای در برابر زلزله است. از دلایل این آسیب‌پذیری بناهای با مصالح بنایی، وزن زیاد، مقاومت و شکل‌پذیری ناچیز آنهاست. یکی از راه‌حل‌های کاهش آسیب‌پذیری این ساختمان‌ها، بهسازی لرزه‌ای این ساختمان‌ها است که به نسبت ساخت ساختمان‌های جدید هزینه کمتری را دربرمی‌گیرد. در این مطالعه، رفتار نمونه‌ای از دیوارهای مصالح بنایی با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی رفت و برگشتی در راستای درون صفحه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تعداد ۴ آزمایش بر روی ۴ نمونه انجام شده است. ۲ نمونه شاهد و ۲ نمونه دیگر با استفاده از کابل‌های فولادی و نئوپرن تحت تقویت قرار گرفتند. متغیرهای مورد بررسی شامل وجود یا عدم وجود سربار روی دیوار، و الگوی بهسازی بر اساس مود خسارت دیوارهای متناظر شاهد است. نتایج حاصله گویای این است که اضافه کردن سیستم پیشنهادی بهسازی، می‌تواند در دیوارهای دارای مود خرابی لغزشی-برشی، سبب ایجاد خاصیت مرکزگرایی شده اما تاثیر چندانی در ظرفیت نیرویی دیوار ندارد. در مورد دیوارهای با مود خرابی خمشی (حرکت گهواره‌ای)، اضافه کردن سیستم پیشنهادی مقاومت‌سازی سبب افزایش بسیار قابل توجه در ظرفیت نیرویی و نیز تغییر مود خرابی از خمشی به لغزشی-برشی می‌شود که به این ترتیب منجر به افزایش انرژی مستهلک شده در بارگذاری چرخه‌ای هم گردید.

کلمات کلیدی: بهسازی لرزه‌ای، دیوارهای آجری، سیستم مرکزگرا، کابل‌های فولادی.

Experimental study on the in-plane behavior of retrofitted brick walls using steel cables with self- centering approach

Mahmood Chavoshan; Ahamd Ali Fallah; Alireza Mirjalili; Mohammad Yekrangnia

Abstract

Iran is one of the earthquake-prone countries, which has repeatedly suffered significant losses and damages caused by earthquakes. One of the most numerous structural systems in the country is building materials buildings, which are among the most vulnerable structural systems against earthquakes. One of the reasons for this vulnerability of buildings with building materials is their heavy weight, low resistance and malleability. One of the solutions to reduce the vulnerability of these buildings is the seismic improvement of these buildings, which costs less than the construction of new buildings. In this study, the behavior of a sample of masonry walls is evaluated using reciprocating static tests along the inner plane. 4 tests have been performed on 4 samples. 2 control samples and 2 other samples were reinforced using steel and neoprene cables. The investigated variables include the presence or absence of overhead on the wall, and the improvement pattern based on the damage mode of the corresponding witness walls. The results show that adding the proposed improvement system can create centripetal properties in walls with sliding-shear failure mode, but it does not have much effect on the force

۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران، mahmood.chavoshan@gmail.com

۲ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران، ahmadali.fallah@maybodiau.ac.ir

۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران، mirjalili@iauyazd.ac.ir

۴ دانشیار، دانشکده ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، yekrangnia@sru.ac.ir

capacity of the wall. In the case of walls with bending failure mode (rocking motion), adding the proposed strengthening system causes a significant increase in the force capacity and also changes the failure mode from bending to sliding-shear, which in this way leads to an increase in The consumed energy is also cyclical in loading.

Keywords: Seismic retrofitting, Brick walls, Self- centering system, Steel cables.

۱- مقدمه

وقوع زمین لرزه های متعدد در ایران موید این است که ما در منطقه ای لرزه خیز زندگی می کنیم، از آنجا که تجارب بدست آمده از زلزله های گذشته و نیز مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعدد نشان از آسیب پذیری بالای ساختمان های آجری دارد لذا بهسازی دیوارهای بنایی موجود در این ساختمان ها جهت کاهش آسیب پذیری و بهبود عملکرد لرزه ای آنها توسط یک راهکار مناسب ضرورت می یابد.

یکی از مهم ترین مزیت های ساختمان های آجری، آسان بودن تولید آجر، ارزان بودن ساخت، عدم نیاز به تخصص ویژه در امر ساخت این ساختمان ها می باشد [۱]. هر چند در حال حاضر احداث ساختمان های دارای اسکلت فولادی و بتنی رو به افزایش است اما هنوز هم بسیاری از ساختمان های موجود و ساختمان های کوتاه مرتبه جدیدالاحداث از نوع بنایی بوده و به دلیل عدم رعایت اصول و ضوابط فنی از ایمنی لازم برخوردار نیست و در نتیجه در زمان وقوع زلزله بسیار آسیب پذیر می باشند. از آنجا که در حال حاضر امکان تخریب تمامی این گونه از ساختمان ها و جایگزینی آنها با سازه های مقاوم به دلیل تحمیل هزینه های گزاف مالی و توقف بهره برداری از سازه در یک بازه مشخص زمانی وجود ندارد، راهکار مناسب جهت کاهش خطرات در زمان وقوع زلزله، ارزیابی آسیب پذیری و بهسازی لرزه ای این ساختمان ها می باشد [۲].

کاهش آسیب پذیری لرزه ای دیوارهای آجری موجود، می تواند بر اساس رویکردهای مختلفی انجام شود که از آن جمله می توان به افزایش مقاومت، سختی و جذب انرژی این دیوارها اشاره کرد. یکی از رویکردهای موجود در بهسازی لرزه ای این ساختمان ها، سیستم مرکز گرا می باشد. در حال حاضر تحقیقات زیادی در ساختمان های فولادی و بتن مسلح با بهره گیری از این سیستم در حال انجام است که اغلب از طریق خرابی مصالح نظیر تسلیم فولاد برای استهلاک انرژی استفاده میکنند. این نوع از سیستمها در صورت عملکرد مناسب، قادر هستند که یک پاسخ هیسترتیک چرخه ای کامل ارائه دهند. اما نکته حائز اهمیت این است که این سیستمها بعد از وقوع زلزله دارای تغییر مکان نسبی ماندگار زیادی بوده که هزینه های بازسازی را افزایش داده یا لزوم تخریب سازه را ایجاد میکنند. استفاده از سیستمهای مرکزگرا باعث کاهش قابل ملاحظه یا حذف کامل تغییر شکل ماندگار در سازه پس از زلزله میشود و یک منحنی پرچمی شکل ایجاد کرده که این مورد یکی از مزایای اصلی استفاده از این سیستمها نسبت به سیستمهای متداول می باشد. به طور کلی اغلب سیستمهای مرکزگرا شامل کابل های پیش تنیده با خاصیت مرکزگرا کننده بوده و همچنین از میراگرها که باعث استهلاک انرژی در سیستم می شوند، بهره میبرند. یک دیوار بنایی را میتوان با استفاده از کابل ها یا میلگردهای پس کشیده مرکزگرا نمود. در حالت چسبیده، حفره هایی که میله ها یا کابل های پس کشیده از داخل آن عبور می کنند دوغاب کاری می شوند و در حالت غیر چسبیده، میله ها و کابل های پس کشیده به صورت آزادانه در داخل حفرات ایجاد شده جابه جا می شوند [۳].

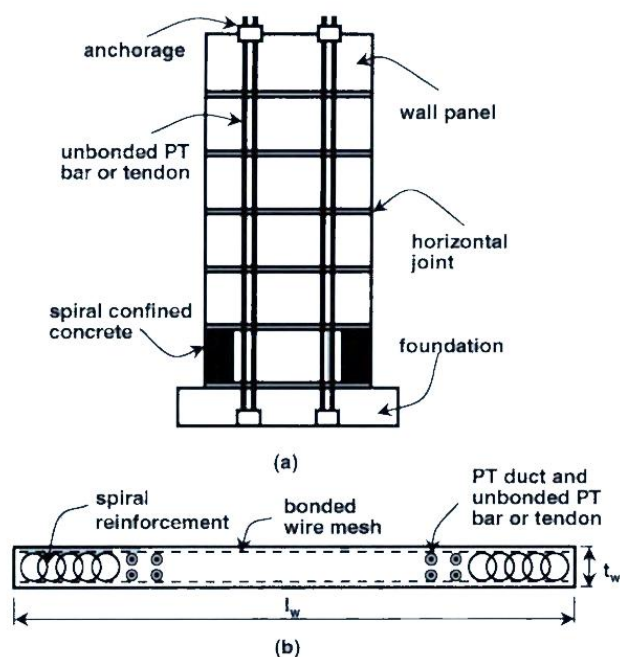
در این مقاله، سعی بر آن است که برای نخستین بار رفتار درون صفحه سیستم مرکزگرا برای نمونه ای از دیوارهای آجری که نماینده تعداد زیادی از دیوارهای موجود در ساختمان های آجری موجود کشور می شود، با استفاده از کابل های فولادی بررسی و به صورت آزمایشگاهی مطالعه گردد.

۲- پیشینه تحقیق

کوراما و همکاران^۵ در سال ۱۹۹۹، سیستم سازه ای دیوارهای برشی پیش تنیده مرکزگرا را مطابق شکل (۱) به عنوان اولین سیستم سازه ای مرکزگرا معرفی نمودند. بین قطعات دیوار برشی، اتصالاتی در تراز طبقات وجود دارد که این اتصالات به دلیل

^۵ Kurama et al.

وجود نیروی پیش تنیدگی در کابل های پس کشیده ای که بین فونداسیون و طبقه آخر دیوار برشی قرار گرفته اند، تحت نیروی پیش تنیدگی هستند. نتایج نشان می دهد، با افزایش طول کابل، ظرفیت اتلاف انرژی سازه کاهش یافته یا به عبارت دیگر سختی سازه، پس از تسلیم فیوز، کاهش می یابد. لیکن تغییر مکان جانبی نسبی میان طبقه با افزایش طول کابل در بیشتر رکوردها، کاهش می یابد [۴].



شکل ۱: اجزا دیوار برشی مرکز گرا در ارتفاع [۴].

رودریگوئز و همکاران^۶ در سال ۱۹۹۴، در مطالعه ای به بررسی رفتار خمشی دیوارهای بنایی پیش تنیده در معرض بار خارج از صفحه پرداخته اند. یک نمونه دیوار تمام مقیاس در آزمایشگاه با بلوک های بتنی سوراخ دار تهیه گردید. در بالا و پایین دیوار از تیر بتنی استفاده گردیده و در میانه ضخامت دیوار از یک آرماتور رزوه شده جهت پیش تنیدگی استفاده گردید که توسط ورق فولادی و بولت به تیرهای بتنی مذکور درگیر شد. نتایج حاصل نشان داد که تکنیک پیش تنیدگی دیوار باعث افزایش بار ترک خوردگی و مقاومت نهایی دیوار بنایی تحت اثر بار خارج از صفحه می گردد و همچنین پیش تنیدگی ایجاد شده در دیوار مذکور سبب افزایش شکل پذیری شد [۵].

تورانزو و همکاران^۷ در سال ۲۰۰۴، به بررسی دیوارهای بنایی کلاف دار گهواره ای با مستهلک کننده انرژی در آزمایشگاه پرداخته اند. سیستم مدنظر تحت اثر ۶۰ آزمایش دینامیکی قرار گرفت. نتایج نشانگر این بود که در تمامی آزمایش ها، اجزای بنایی خسارت ندیدند و سازه مقاومت اولیه، سختی و ظرفیت اتلاف انرژی خود را حفظ نمود [۶].

کالونزیس و شولتزدر^۸ سال ۲۰۱۷، به تخمین بهبود رفتار چرخه ای دیوارهای برشی بنایی تزریق شده با ملات با پس تنیدگی پرداختند. آزمایشات انجام گرفته در این تحقیق نشان داد نیروهای اولیه پس تنیدگی ممکن است به طور قابل توجهی به سبب آسیب واحدهایی بنایی در پایه دیوار کاهش یابد [۷].

^۶ Rodriguez et al.

^۷ TORANZO et al.

^۸ Kalliontzis and Schultz

حسنعلی و همکاران در سال ۲۰۱۷، در تحقیقی به رویکردی ساده جهت پیش‌بینی مقاومت خمشی دیوارهای بنایی مرکز گرا پرداختند. با استفاده از یک مدل تحلیلی و با در نظر گرفتن روابط تنش و کرنش برای دیوار بنایی محصور شده و محصور نشده، منحنی‌های نیرو – جابجایی برای یازده دیوار مورد آزمایش توسعه داده شد. با استفاده از یک روش تحلیلی مشابه، یک مطالعه پارامتری برای بدست آوردن پاسخ نیرو – جابجایی از دیوارها با ویژگی‌های متفاوت و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از جمله نسبت تنش محوری، طول، ارتفاع و ضخامت دیوار در طول منطقه فشاری انجام پذیرفت [۸].

نی و ژانگ^۹ در سال ۲۰۱۷، روشی جهت بهبود رفتار برشی ساختمان‌های مصالح بنایی چند طبقه ارائه دادند. نسبت ابعادی ستونک‌های بنایی مابین فونداسیون و شناژ افزایش داده شده تا رفتار برشی به خمشی تبدیل گردد و مد خرابی گهواره‌ای صورت پذیرد. رفتار گهواره‌ای دیوارهای بنایی تحت اثر نیروی محوری پیش‌بینی شد و یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی دو دیوار بنایی با مقیاس کامل انجام پذیرفت. در ادامه مقایسه‌ای از مد گهواره‌ای در دو دیوار بنایی با بتن خودتراکم و بدون بتن خودتراکم انجام پذیرفت. نتایج حاکی از آن است که تکنیک مورد استفاده در تغییر از مد برشی به خمشی، باعث اتلاف انرژی زیاد شده و سبب مرکزگرایی می‌گردد [۹].

حسنعلی و همکاران در سال ۲۰۱۷، در تحقیقی صحت روش‌های موجود برای پیش‌بینی مقاومت خمشی دیوارهای بنایی مرکز گرا را با استفاده از نتایج ۱۸ آزمایش بارگذاری درون صفحه‌ای و نتایج تحلیل‌های اجزای محدود، مورد بررسی قرار دادند. دیوارهای مورد آزمایش همگی کاملاً بندکشی شده و ارتفاع آن در محدوده ۲۸۰۰ تا ۵۲۵۰ میلی‌متر، طول آن در محدوده ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر و مقاومت فشاری آن در محدوده ۱۳.۳ تا ۲۰.۶ مگاپاسکال و نسبت تنش محوری در محدوده ۰.۴ تا ۰.۲ می‌باشد. در این مطالعه چهار روش مختلف برای پیش‌بینی مقاومت خمشی درون صفحه دیوار بنایی مرکز گرا پیشنهاد شد [۱۰].

کپلی و همکاران^{۱۰} در سال ۲۰۱۸، در تحقیقی رفتار دینامیکی خارج از صفحه یک بلوک صلب را بررسی نموده‌اند. المان سازه‌ای در نظر گرفته شده، یک دیوار بنایی مستحکم است که در پایه مقید شده است. بنابراین حرکت گهواره‌ای روی پایه که توسط همان مصالح بلوک تشکیل شده است، رخ می‌دهد. نتایج نوسانات نشان می‌دهد پاسخ آزاد بدست آمده، دامنه جابجایی اولیه متفاوتی در بالای دیوار ایجاد می‌کند [۱۱].

کالونزیس و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۱۹، در مطالعه‌ای، به تاثیر کاهش انرژی ضربه در پاسخ لرزه‌ای دیوارهای بنایی گهواره‌ای پیش‌تنیده پرداخته‌اند [۱۲]. در این تحقیق، از یک روش تحلیل دینامیکی معتبر استفاده شده است که پاسخ‌های لرزه‌ای و مکانیزم استهلاک انرژی مرتبط در دیوارهای بنایی مرکز گرا را بررسی نماید. جزئیات این روش توسط کالونزیس در سال ۲۰۱۸ ارائه گردید که این رویکرد با داده‌های نمونه آزمایشگاهی بتن پیش‌تنیده و دیوارهای بنایی مرکزگرا تحت اثر تحریکات دینامیکی، مقایسه گردیده است. نتایج این روش تحلیلی نشان داد که استهلاک انرژی ضربه می‌تواند حداکثر پاسخ جابجایی دیوارها را به میزان ۴۸ درصد کاهش دهد [۱۳].

کالونزیس و همکاران در مطالعه‌ای، عملکرد دیوارهای بنایی پیش‌تنیده با استفاده از رابط لاستیکی را مورد بررسی قرار دادند. هدف از سیستم پیشنهادی، بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی و همچنین بهبود ظرفیت مرکزگرایی دیوار بود. در طول آزمایش‌ها، دیوار رفتار پایداری از خود نشان داد که همراه با کاهش ناچیز مقاومت و بدون آسیب جدی دیوار و میزان دریافت جانبی ۴.۷ درصد را شامل شد [۱۴].

در اغلب ساختمان‌های بنایی بهسازی شده کشور از روش‌های مختلف کلاف بندی، شاکریت، FRP، تسلیح مغزه و ... استفاده شده است که تا حدودی مقاومت نهایی و انعطاف پذیری دیوار بهبود یافته اما نقاط ضعفی همچون تحمیل جرم اضافی به پی، طولانی شدن زمان اجرا، مزاحمت برای ساکنین، و از همه مهمتر تاثیر بر زیبایی ساختمان موجود و نیاز به نیروی انسانی و تجهیزات بسیار وجود دارد که منجر به صرف هزینه گزاف می‌گردد. به کاربردن سیستم Self – Centering و پیش‌تنیدگی

^۹ Niu and Zhang

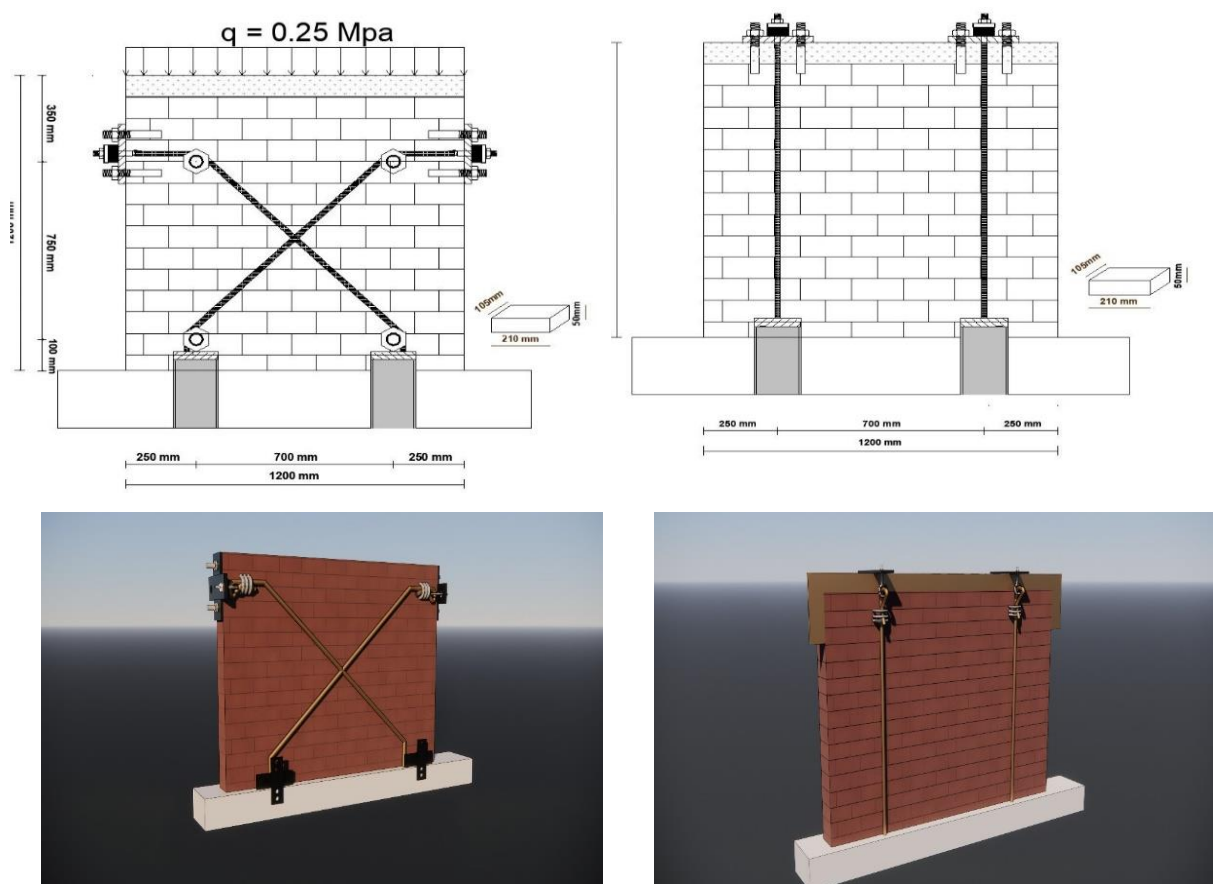
^{۱۰} CAPPELLI et al.

^{۱۱} Kalliontzis et al.

جهت افزایش ظرفیت باربری در زمینه مقاوم سازی ساختمان های بنایی، مورد توجه نبوده و تنها در برخی نشریه ها، صفحاتی اندک به این زمینه اختصاص داده شده و نیز تعداد محدودی مقاله در این زمینه به چاپ رسیده است. استفاده از سیستم راکینگ در دیوارهای آجری به دلیل مشخصه های رضایت بخش همچون برگشت پذیری، شکل پذیری مناسب، حذف تغییر شکل ماندگار و کاهش خسارت سازه ای، جلوگیری از تلفات جانی، سرعت و آسانی اجرا و حفظ نمای نخستین بناهای خاص، جایگاه ویژه ای را به خود اختصاص داده است و دریچه ای تازه به روی محققین باز نموده است.

۳- روش انجام تحقیق

در این مطالعه قصد است تا با استفاده از کابل (سیم بکسل) مطابق شکل (۲) نشان داده شده که رویکرد مرکزگرایی را در دیوار بنایی آجری (آجر گری) پیاده سازی نموده و دو مد خرابی خمشی و برشی مورد بررسی قرار داده شود.



شکل ۲: مشخصات و نمای دیوارهای آجری مورد مطالعه

برای انجام مجموعه آزمایش ها، آزمایشگاه سازه دانشگاه شهید رجائی انتخاب شد. پس از بررسی محدودیت های آزمایشگاه و شرایط اجرایی، ابعاد نمونه مشخص گردید و قطعات مورد نیاز تامین شد.

۳-۱- مشخصات کلی نمونه ها

نمونه های مورد بررسی شامل ۴ دیوار با مقیاس ۱ به ۳ با طول ۱۲۰۰ میلی متر، ارتفاع ۱۲۰۰ میلی متر و ضخامت ۱۰۵ میلی متر هستند. مقدار بار قائم وارده به این نمونه ها در نمونه های اول و دوم برابر ۳۰ کیلونیوتن و در نمونه های سوم و چهارم بدون بار است. به این ترتیب نمونه های اول و دوم با تنش قائم ۰/۲۵ مگاپاسکال، یک دیوار در طبقه اول یک ساختمان مصالح بنایی دو

طبقه را نمایندگی کرده و دیوارهای سوم و چهارم نماینده دیوارهای غیر باربر قائم هستند. نمونه دیوار مصالح بنایی مورد آزمایش در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳: نمونه دیوار مصالح بنایی مورد آزمایش

۲-۳- مشخصات مصالح مصرفی

آجرهای استفاده شده از نوع آجر فشاری (رسی) با ابعاد $۵۰ \times ۱۰۵ \times ۲۱۰$ میلی‌متر، ملات ماسه سیمان با نسبت ۱ (سیمان) به ۴ (ماسه) و اختلاط ملات با استفاده از میکسر و بدون افزودنی انجام گرفت. در دو رج فوقانی به جهت تمرکز تنش های برشی ناشی از اعمال بار، از ملات پر مقاومت تری استفاده گردید. (با نسبت سیمان به ماسه : ۱ به ۳). سایر نمونه‌های آزمایش عبارت اند از:

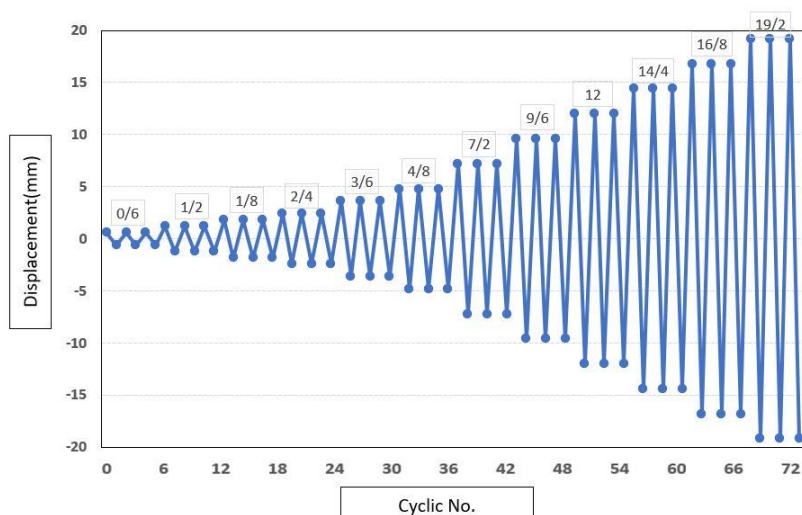
(a) ۳ نمونه مکعبی ملات جهت تست مقاومت فشاری با ابعاد : $۱۰۰ \times ۱۰۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر

(b) ۳ نمونه منشور فشاری مصالح بنایی با ۳ آجر و ۲ لایه ملات

(c) ۳ نمونه منشور مصالح بنایی جهت تست مقاومت برشی ملات

۳-۳- پروتکل بارگذاری جانبی

پروتکل بارگذاری جانبی برای تمامی تست ها در این مطالعه مشابه اغلب مطالعات انجام شده توسط سایر محققین در دیوارهای مصالح بنایی از جمله دیوارهای ترمیم شده و تقویت شده با شاتکریت، پروتکل بارگذاری بر اساس کنترل جابه‌جایی که توسط $ASTM E ۲۱۲۶-۰۵$ پیشنهاد شده است، می باشد که در شکل (۴) نمایش و همچنین در ۰ نیز جزئیات عددی آن شرح داده شده است.



شکل ۴: پروتکل بارگذاری (Displacement Control)

جدول ۱: جزییات پروتکل بارگذاری (ASTM E۲۱۲۶-۰۵)

Disp of top (mm)	Drift Ratio %	Cycle Repeat
۰,۶	۰,۰۵%	۳
۱,۲	۰,۱۰%	
۱,۸	۰,۱۵%	
۲,۴	۰,۲۰%	
۳,۶	۰,۳۰%	
۴,۸	۰,۴۰%	
۷,۲	۰,۶۰%	
۹,۶	۰,۸۰%	
۱۲	۱,۰۰%	
۱۴,۴	۱,۲۰%	
۱۶,۸	۱,۴۰%	
۱۹,۲	۱,۶۰%	

۳-۴- آزمایش ها

۳-۴-۱- آزمایش نمونه ۱: دیوار مصالح بنایی (URM) شاهد

۳-۴-۱-۱- ساخت نمونه و سرهم بندی آزمایش

این نمونه در محل آزمایشگاه سازه دانشگاه شهید رجایی ساخته شد. نمونه دیوار با ابعاد تعریف شده، در محل انجام آزمایش توسط بنای ماهر بر روی شالوده بتن مسلح ساخته شد. مطابق شکل (۵)، دیوار مصالح بنایی به وسیله ملات ماسه سیمان به شالوده (از جنس بتن مسلح) متصل گردیده است.



شکل ۵: ساخت نمونه ۱

مطابق شکل (۶) جهت اعمال بار ثقلی و جانبی، قطعه ای فولادی صلب بر روی دیوار نصب شد. اعمال بار جانبی در این آزمایش به وسیله دو جک هیدرولیکی در دو سمت دیوار انجام گرفت و برای اندازه گیری و ثبت داده‌ها از دو عدد بارسنج (هرکدام در یک سمت دیوار) استفاده گردید. جک‌ها و بار سنج‌ها دارای ظرفیت ۴۰۰ کیلو نیوتن بوده است و در سایر تست‌ها نیز از همین تجهیزات جهت بارگذاری جانبی استفاده شد.



شکل ۶: پیاده سازی آزمایش

جهت ثبت تغییر شکل های دیوار از ۴ عدد تغییر مکان سنج طولی استفاده شد که ترتیب قرارگیری و قرائت آن‌ها به شرح می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات ابزار ثبت داده ستاپ

Data logger channel	Name	Size / Capacity
۱	LVDT-main (top)	۱۰۰ mm
۲	LVDT -bottom	۱۰۰ mm
۳	LVDT -Out of plane	۵۰ mm
۴	LVDT -Vertical	۵۰ mm

بارگذاری ثقیلی به وسیله جک هیدرولیکی بالای تیر فوقانی انجام شد. اندازه بار ثقیلی برابر با ۳ تن در نظر گرفته شد. آزمایش مطابق پروتکل بارگذاری ارائه شده آغاز شد. برای سهولت ارزیابی آسیب ها، آسیب های وارده از دو جهت بارگذاری با دو رنگ متفاوت (قرمز و آبی) علامت گذاری شد.

۴- نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- آزمایش نمونه ۱

مطابق شکل (۷)، تا پایان سیکل های بارگذاری با جابه جایی ۲.۴mm (دریافت نسبی ۰.۲٪) ترک مشهودی در سطح دیوار مشاهده نشد. اولین آسیب در دیوار در جابه جایی ۳.۶mm (دریافت نسبی ۰.۳٪) و به صورت ترک در تراز پایین دیوار نمایان شد.



شکل ۷: ترک های ایجاد شده جابه جایی ۳.۶mm - آبی: سمت راست دیوار / قرمز سمت چپ دیوار

به دلیل محدودیت زمانی کاری آزمایشگاه سازه دانشگاه شهید رجایی، تست در این مرحله متوقف و ادامه آن به روز بعد موکول شد. تصویر نهایی نمونه آزمایش در این مرحله در شکل (۸) قابل مشاهده است.



شکل ۸: وضعیت دیوار پیش از شروع مجدد تست

با از سر گرفتن آزمایش در جابه جایی ۴.۸ mm (دریافت نسبی ۰.۴٪) حرکت گهواره ای نمونه تشدید پیدا کرد و فشار پنجه موجب بروز آسیب در آجر های کناری شد. این اتفاق در شکل های (۹) و (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۹: ترک های پنجه سمت راست دیوار در ۲ رفت و برگشت جابه جایی ۴.۸mm



شکل ۱۰: ترک های سمت راست دیوار در ۲ رفت و برگشت جابه جایی ۴.۸mm

با ادامه یافتن سیکل های بارگذاری و در سیکل های با جابه جایی ۷.۲mm (دریافت نسبی ۰.۶۰٪)، علاوه بر افزایش خرابی در پنجه ها، ترک هایی در میانه ارتفاع دیوار رخ داد و منجر به ورود به حالت خرابی برشی-لغزشی در دیوار شد. آسیب های وارده به نمونه در شکل های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.

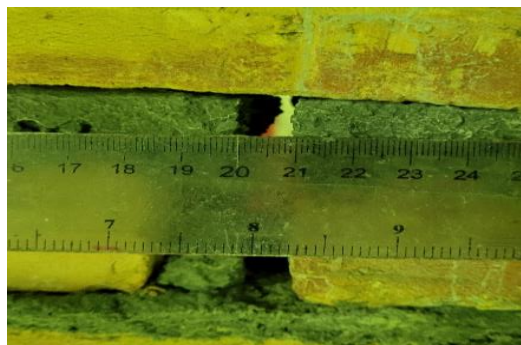


شکل ۱۱: آسیب های دیوار در انتهای جابه جایی ۷.۲mm



شکل ۱۲: آسیب های دیوار در انتهای جابه جایی ۷.۲mm

همچنین عرض ترک طولی مطابق شکل (۱۳)، ۱۰ میلی متر قرائت شد.



شکل ۱۳: عرض ترک در جابه جایی ۷.۲mm

با اعمال جا به جایی ۹.۶mm نمونه، مد خرابی لغزشی حاکم شد و لغزش در دیوار به طور واضح مشاهده می شود. در این مرحله از آزمایش ۲ سیکل رفت و برگشت (از مجموع ۳ سیکل) طی شد و از آنجا که دیوار با افت مقاومت شدید رو به رو شد در نتیجه تست پایان یافت. تصاویر موجود در شکل (۱۴) مربوط به این جابه جایی و وضعیت نهایی دیوار هستند.



شکل ۱۴: وضعیت نهایی نمونه ۱

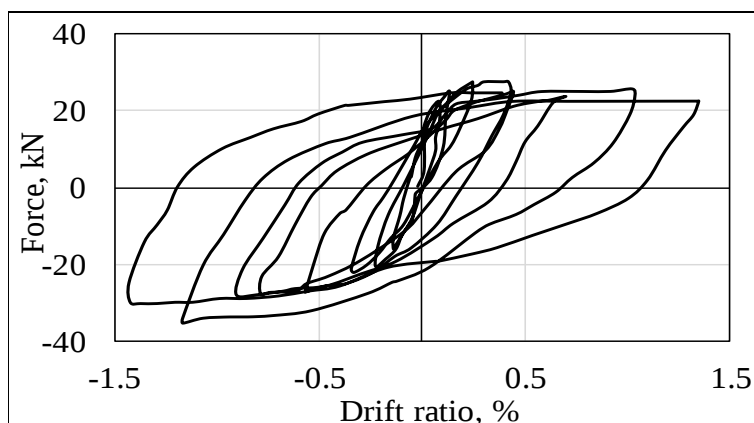
بیشینه عرض ترک اندازه گیری شده در راستای طول حدوداً ۲۵ میلی متر است. نحوه اندازه گیری در شکل (۱۵) نمایش داده شده است.



شکل ۱۵: اندازه گیری عرض ترک نمونه ۱

۴-۱-۱- نتایج رقومی

نمودار نیرو بر اساس نسبت دریافت نمونه اول در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد، نمونه از نقطه نظر شکل پذیری و جذب انرژی بصورت قابل قبولی رفتار کرده است. با این حال به دلیل مود رفتار برشی- لغزشی، دارای جابجایی های پسماند قابل ملاحظه ای می باشد. به این ترتیب، هدف از ساخت و آزمایش بر روی نمونه بعدی، به حداقل رساندن میزان این تغییرشکل های پسماند خواهد بود.

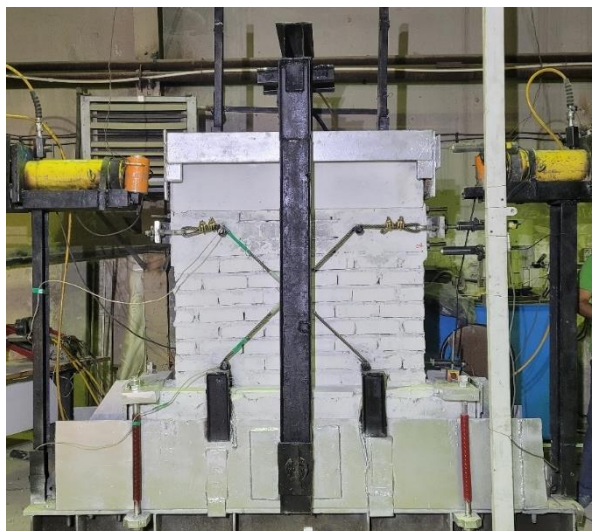


شکل ۱۶: نمودار نیرو بر اساس نسبت دریافت نمونه اول

۴-۲- آزمایش نمونه ۲: دیوار مصالح بنایی بهسازی شده با تاندون های فولادی

۴-۲-۱- ساخت نمونه و سرهم بندی آزمایش

این نمونه به لحاظ ابعاد هندسی مشابه نمونه ۱ است. پروتکل بارگذاری نیز مشابه نمونه اول در نظر گرفته شد. در این نمونه دیوار مصالح بنایی با استفاده از تاندون های فولادی تقویت و مرکزگرا شد. این تاندون ها به صورت ضربدری و در ۲ طرف دیوار اجرا شدند و تصویر نحوه قرارگیری آنها در شکل (۱۷) قابل مشاهده است. قطر این تاندون ها ۱۴ میلی متر و جنس مغزی آن فولادی است.



شکل ۱۷: نمونه ۲، نحوه قرارگیری و نصب تاندون های فولادی

برای نصب و اتصال تاندون ها به دیوار، از قطعه واسطی استفاده گردید که متشکل از یک قطعه نئوپرن که دو ورق فولادی به شکل صلیبی در دو طرف آن قرار گرفته اند است. یکی از این ورق های فولادی بر روی دیوار قرار گرفته و ورق دیگر محل اتصال بست تاندون ها است. قطعه نئوپرن جهت کمک به مرکز گرایی و برگشت دیوار به حالت اول کمک می نماید. قطعه نئوپرن خود از دو ورق فولادی و یک پد الاستومری به ابعاد $14 \times 100 \times 100$ میلی متر تشکیل شده است. ورق های فولادی قلاويز شده تا بتوان آن را به ورق های اتصال به دیوار و تاندون متصل نمود. جزئیات این قطع در شکل (۱۸) قابل مشاهده است. جهت نصب این قطعه به مقطع کناری دیوار، میلگرد فولادی رزوه شده با قطر ۲۰ میلی متر و با طول کاشت ۱۵۰ میلی متر درون دیوار کاشته شد. شکل (۱۹) نمای سوارخکاری و محل نصب قطعه را نشان می دهد.



شکل ۱۸: قطعه واسط متشکل از ورق فولادی و نئوپرن



شکل ۱۹: سوراخکاری مقطع کناری دیوار جهت کاشت میلگرد

همچنین جهت تغییر مسیر تاندون ها در راستای مد نظر از میلگردهای فولادی بدون آج با قطر ۲۰ میلی متر استفاده شد. جهت قرار دادن این میلگردها داخل دیوار مصالح بنایی بخشی از دیوار با استفاده از دریل و قلم فولادی تخریب و خارج شد و میلگردها با استفاده از ملات پر مقاومت درون دیوار کاشته شد. شکل (۲۰) جزئیات اجرایی این بخش را نشان می دهد.



شکل ۲۰: ساخت و نصب میلگردهای محل تغییر زاویه تاندون ها

تاندون های فولادی در پایین دیوار، در قطعه صلب متصل به شالوده مهار شد. جزئیات آن در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۱: محل مهار تاندون ها به شالوده

علاوه بر این در این نمونه به دلیل کنترل و انتقال صحیح برش وارده از سمت جک‌های بارگذاری به محدوده تقویت شده دیوار با تاندون‌ها، از تقویت موضعی رج‌های فوقانی دیوار با استفاده از بتن الیافی که تحت پوشش تیر بارگذاری هستند استفاده شد. در شکل (۲۲) محدوده تقویت خارجی با بتن الیافی قابل مشاهده است.



شکل ۲۲: تقویت رج‌های فوقانی دیوار با بتن الیافی

در نهایت نمونه دیوار مورد آزمایش به وسیله رنگ پلاستیک سفید، نقاشی شد تا تشخیص و نمایش ترک‌ها ساده‌تر شود. در این نمونه از ۸ کانال و سنسور برای ثبت داده‌های آزمایش استفاده شد که به شرح جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳: مشخصات ابزار سنجش و ثبت داده‌ها

Data logger channel	Name	Size / Capacity	Height
۱	LVDT-main (top of specimen)	۱۰۰ mm	۱۱۰۰ mm
۲	LVDT - on elastomer level	۱۰۰ mm	۷۴۰ mm
۳	LVDT - bottom of elastomer	۱۰۰ mm	۶۲,۵ mm
۴	LVDT -bottom	۵۰ mm	۱۰۰ mm
۵	Loadcell right	۴۰۰ kN	-----
۶	Loadcell left	۴۰۰ kN	-----
۷	Tendon strain gauge ۱	-----	-----
۸	Tendon strain gauge ۲	-----	-----

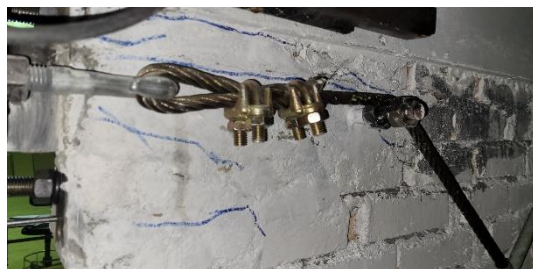
۴-۲-۲- نتایج آزمایش نمونه ۲

چرخه‌های آغازین با جابجایی ۰.۶mm (دریافت نسبی ۰.۰۵٪) و در ادامه تا جابجایی ۱.۸mm (دریافت نسبی ۰.۱۵٪) در دیوار خرابی به دنبال نداشت. در جابجایی ۲.۴mm (دریافت نسبی ۰.۲٪) ترک‌هایی در حاشیه میلگردهای تغییر زاویه تاندون‌ها مشاهده شد و همچنین با تکرار سیکل‌ها ترک‌هایی در بخش تقویت شده با بتن نیز مشاهده شد (۰).



شکل ۲۳: ترک‌های ایجاد شده دریافت نسبی ۰.۲٪

با ادامه آزمایش و ورود به جابجایی 3.6mm (دریافت نسبی 0.3%) طول ترک‌های پیش‌تر ایجاد شده، گسترش یافته و همچنین ترک‌هایی در ناحیه مرزی تقویت بتنی و دیوار مصالح بنایی دیده شد. شکل (۲۴) نمایش دهنده وضعیت نمونه در پایان این مرحله هستند.



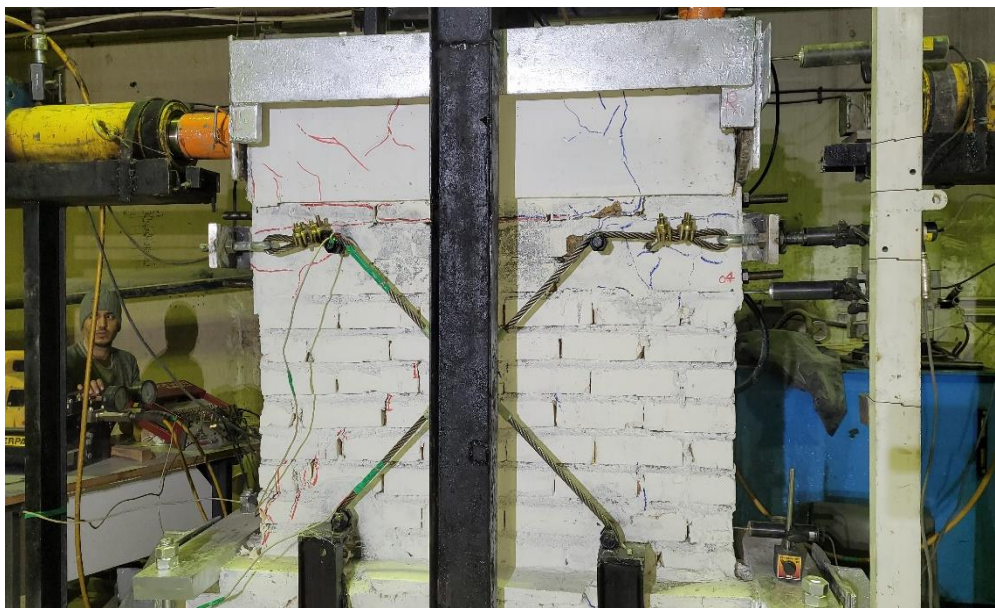
شکل ۲۴: ترک‌های ایجاد شده دریافت نسبی 0.3%

جابجایی‌های بعدی در مراحل پروتکل بارگذاری، معادل 4.8mm (دریافت نسبی 0.40%) و 7.2mm (دریافت نسبی 0.6%) است. در این مرحله ترک‌هایی در محل اتصال میلگرد‌های تغییر زاویه تاندون رویت شد. همچنین باز شدگی درز قائم بین آجرها در برخی نقاط میانی دیوار قابل مشاهده بود. علاوه بر این، ترک‌های پیش‌تر ایجاد شده نیز گسترش یافتند. مرحله بعدی بارگذاری جابجایی 9.6mm (دریافت نسبی 0.8%) است. در روند بارگذاری چرخه‌ای با این جابجایی، لغزش از محل ترک ردیف‌های فوقانی دیوار مشاهده شده و همچنین ترک‌هایی در پنجه دیوار (به خصوص سمت چپ) ملاحظه شد (Error!).

Reference source not found.



شکل ۲۵: ترک‌های ایجاد شده دریافت نسبی 0.8%



شکل ۲۶: وضعیت نهایی دیوار در دررفت نسبی ۰.۸٪

در جابجایی ۱۲mm (دررفت نسبی ۱٪) خرد شدگی شدید در پنجه چپ دیوار رخ داد و افت مقاومت در دستگاه ثبات داده‌ها مشاهده شد. (شکل ۲۷) وضعیت نهایی دیوار پس از این مرحله را نشان می‌دهد.

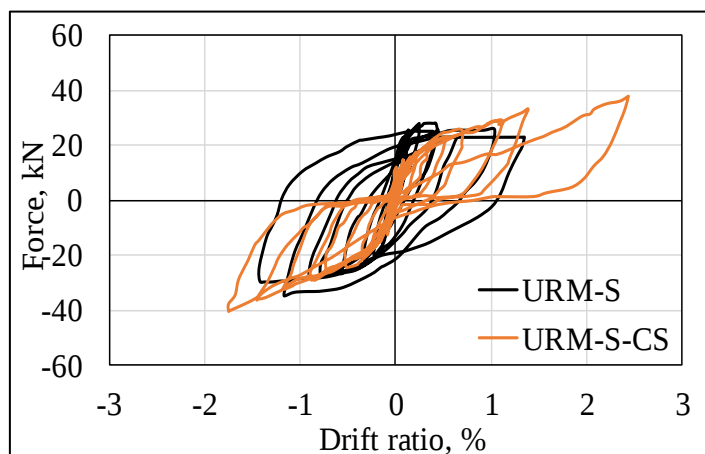


شکل ۲۷: وضعیت نهایی دیوار در دررفت نسبی ۱٪

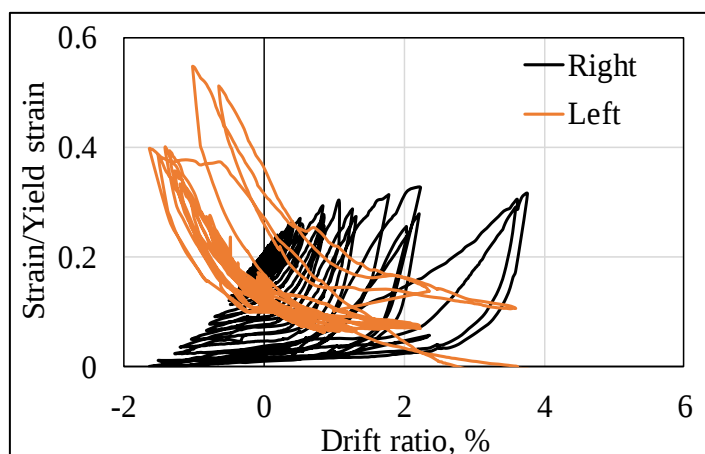
با توجه به وضعیت نمونه، خرابی‌ها و افت مقاومت، جابجایی ۱۴.۴mm (دررفت نسبی ۱.۲٪) آخرین مرحله بارگذاری بوده است. در این مرحله علاوه بر لغزش مشهود ردیف فوقانی دیوار، خرد شدگی آجرها در ردیف‌های فوقانی و پنجه دیوار مشاهده شد.

۳-۲-۴- نتایج رقومی

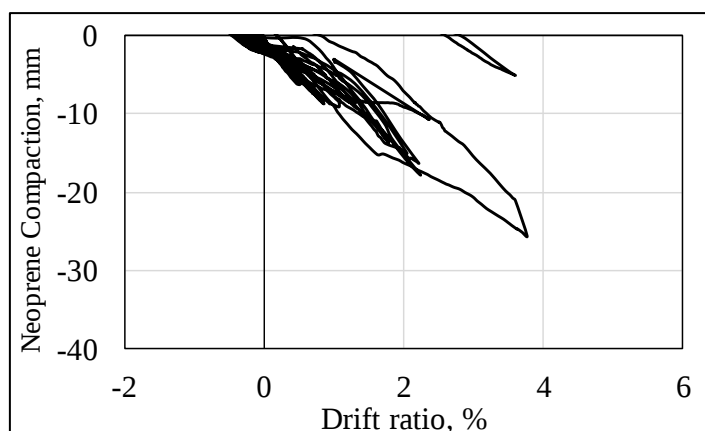
نتایج نمونه دوم در قالب نمودارهای هیسترسیس، تغییرات کرنش در کابل در مقایسه با کرنش تسلیم کابل، و مقدار فشردگی نئوپرن در شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، عملکرد نیرو - جابجایی نمونه دوم در مقایسه با نمونه اول بهبود قابل ملاحظه‌ای از منظر Self-centering و نیز زوال در مقاومت داشته است.



شکل ۲۸: نمودار نیرو بر اساس نسبت دریفت نمونه اول و دوم



شکل ۲۹: نمودار کرنش کابل ها بر اساس نسبت دریفت نمونه دوم



شکل ۳۰: نمودار فشردگی یکی از نئوپرن ها بر اساس نسبت دریفت نمونه دوم

۳-۴- آزمایش نمونه ۳: دیوار مصالح بنایی بدون سربار

۱-۳-۴- ساخت نمونه و سرهم بندی آزمایش

این نمونه به لحاظ ابعاد هندسی مشابه نمونه ۱ است. پروتکل بارگذاری نیز مشابه نمونه اول در نظر گرفته شد. تنها تفاوت این نمونه با نمونه ۱ دیوار مصالح بنایی، عدم وجود سربار در این دیوار بود. تصویر نمونه ۳، پیش از شروع آزمایش در شکل (۳۱) قابل مشاهده است.



شکل ۳۱: نمونه ۳، پیش از شروع آزمایش

در نهایت نمونه دیوار مورد آزمایش به وسیله رنگ پلاستیک سفید، نقاشی شد تا تشخیص و نمایش ترک‌ها ساده‌تر شود. در این نمونه از ۶ کانال و سنسور برای ثبت داده‌های آزمایش استفاده شد که به شرح جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۴: مشخصات ابزار سنجش و ثبت داده‌ها در نمونه ۳

Data logger channel	Name	Size / Capacity	Height
۱	LVDT-main (top of specimen)	۱۰۰ mm	۱۱۰۰ mm
۲	LVDT -bottom	۵۰ mm	۱۰۰ mm
۳	Ver- LVDT- top of wall – right side	۱۰۰ mm	۸۷۰ mm (۳۳۰ from right)
۴	Ver- LVDT- top of wall – left side	۱۰۰ mm	۲۵۰ mm
۵	Loadcell right	۴۰۰ kN	-----
۶	Loadcell left	۴۰۰ kN	-----

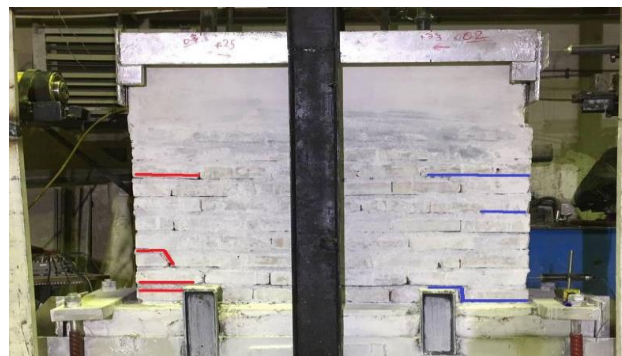
۲-۳-۴- نتایج شهودی

با شروع بارگذاری جانبی مطابق پروتکل بارگذاری، در دریافت نسبی ۰.۰۵٪ و ۰.۱۰٪ ترک و آسبگی در سطح نمونه مشاهده نشد. در دریافت نسبی ۰.۱۵٪ ابتدا ترک طولی در میانه‌های ارتفاع دیوار مشاهده شد و سپس بلندشدگی پاشنه سمت راست دیوار مشاهده شد (۰).



شکل ۲۶: وضعیت گسترش ترک‌ها در دررفت نسبی ۰.۱۵٪

با افزایش نیرو و در مرحله جابجایی ۲.۴mm بالای دیوار (دررفت نسبی ۰.۲٪)، ترک‌های طولی در بخش میانی و پای دیوار نمایان شدند که تصویر آن در شکل (۲۷) قابل مشاهده است.



شکل ۲۷: گسترش ترک‌ها در دررفت نسبی ۰.۲٪

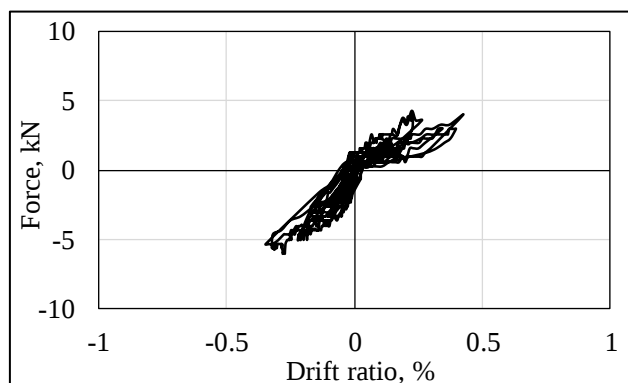
در نهایت با افزایش دررفت نسبی نمونه تا ۰.۳٪ و گسترش ترک‌های طولی در تراز ارتفاعی ۱۰۰ میلی متری دیوار این مرحله از تست به پایان رسید. تصویر نهایی مرحله اول تست در شکل (۲۸) قابل مشاهده است.



شکل ۲۹: آسیب‌های دیوار در پایان مرحله اول آزمایش

۴-۳-۳- نتایج رقومی

نتایج نمونه سوم در قالب نمودارهای هیسترسیس، در شکل (۳۰) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می شود، عملکرد نیرو-جابجایی نمونه دوم در مقایسه با نمونه اول سطح نیروی به مراتب کمتری را نشان می دهد که با انتظارات از این دیوار با توجه به فقدان بار قائم در تناسب است.



شکل ۳۰: نمودار نیرو بر اساس نسبت دریافت نمونه سوم

۴-۴- آزمایش نمونه ۴: دیوار مصالح بنایی بدون سربار بهسازی شده با تاندون های فولادی

۴-۴-۱- ساخت نمونه و سرهم بندی آزمایش

نمونه ۴ که از هر نظر مشابه نمونه ۳ بود که با استفاده از تاندون های فولادی که در راستای قائم دیوار قرار گرفتند تقویت شد. برای تقویت دیوار دو تاندون به صورت عمودی در هر وجه دیوار (جمعاً ۴ تاندون) در نظر گرفته شد که قطر این تاندون ها ۱۴ میلی متر و جنس مغزی آن فولادی است. جهت مهار تاندون به شالوده از یک قطعه فولادی و بست های مناسب استفاده شد و در بالای دیوار به ورق فولادی متصل گردید. ورق فولادی به طور غیر مستقیم و از طریق یک ضربه گیر (نئوپرن) به تیر فوقانی متصل شد. تصویر نمونه در شکل (۳۱) قابل مشاهده است. کشیدگی اولیه تاندون ها ۴۰۰ micro strain بوده است.



شکل ۳۱: نمونه تقویت شده بدون سربار با تاندون های فولادی (تصویر دو وجه مختلف دیوار)

در این نمونه از ۷ کانال و سنسور برای ثبت داده های آزمایش استفاده شد که به شرح جدول ۵ می باشد.

جدول ۵: مشخصات ابزار سنجش و ثبت داده ها در نمونه ۴

Data logger channel	Name	Size / Capacity	Height
۱	Horizontal LVDT-main (top of specimen)	۱۰۰ mm	۱۱۰۰ mm
۲	Horizontal LVDT – (bottom of specimen)	۵۰ mm	۱۰۰ mm

۳	Vertical LVDT - top of wall – right side	۱۰۰ mm	۱۰۵۰ mm (۱۵۰ from right)
۴	Vertical LVDT - top of wall – left side	۵۰ mm	۱۵۰ mm
۵	Vertical LVDT - top of wall – left side- neoprene	۱۰۰ mm	۲۳۵
۶	Loadcell Right	۴۰۰ kN	-----
۷	Loadcell Left	۴۰۰ kN	-----

۴-۲-۴ نتایج شهودی

آزمایش مطابق روند بارگذاری سایر آزمایش‌های پیشین انجام گرفت. در سیکل‌های ابتدایی (دریفت نسبی 0.05%) با توجه به آسیب قبلی دیوار لق‌شدگی بعضی آجرهای کناری مشاهده شد. در دریفت نسبی 0.30% بلندشدگی پاشنه دیوار به طور محسوس تری قابل مشاهده بوده است (0.32) و پیرو این رفتار گهواره‌ای در دریفت نسبی 0.40% آسیب در پنجه‌های دیوار مشاهده شد که در شکل (۳۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳۲: بلند شدگی پاشنه دیوار در دریفت نسبی 0.30%



شکل ۳۳: ترک‌های ناشی از فشار ایجاد شده در پنجه دیوار در دریفت نسبی 0.40%

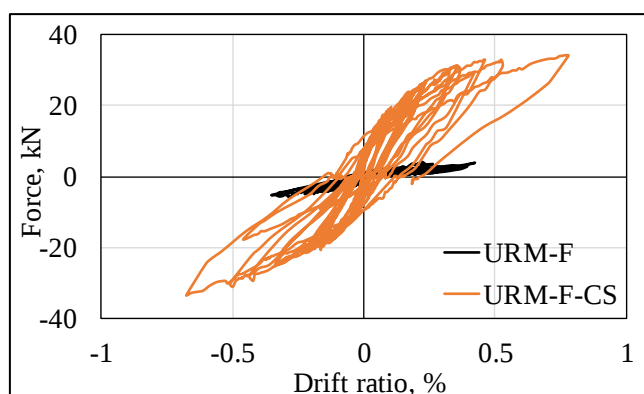
با ادامه یافتن روند بارگذاری جانبی تغییراتی در رفتار کلی دیوار حاصل نشد تا در نهایت در سیکل‌های مربوط به دریفت نسبی 0.60% ترک‌های لغزشی- قطری در نمونه دیوار پدید آمد و با افزایش لغزش و ضخامت ترک‌ها آزمایش متوقف گردید. شکل (۳۴) نشان دهنده ترک‌های لغزش قطری ایجاد شده در آخرین مرحله از این آزمایش است. بیشینه بازشدگی طولی دیوار در این سیکل‌ها در هر دو سمت 16 mm اندازه گیری شد.



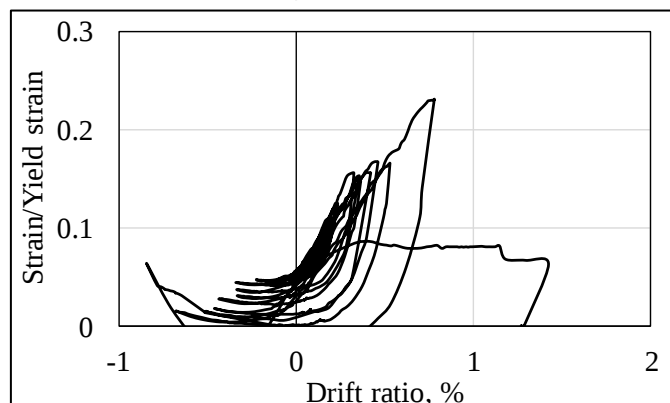
شکل ۳۴: ترک های لغزشی - قطری در دریفت نسبی ۰.۶٪

۴-۴-۳- نتایج رقومی

نتایج نمونه چهارم در قالب نمودارهای هیسترسیس و کرنش تاندون‌ها، به ترتیب در شکل‌های (۳۵) و (۳۶) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، عملکرد نیرو-جابجایی نمونه دوم (تاندون فولادی قطری) در مقایسه با نمونه دوم (تاندون فولادی قائم) دارای مقاومت نهایی نزدیک بوده اما نمونه ۴ فاقد خاصیت مرکزگرایی می‌باشد. دلیل آن الگوی قرارگیری کابل‌ها روی دیوار بوده که ظرفیت قابل ملاحظه‌ای را در ارتباط با مد خرابی حرکت گهواره ای ایجاد می‌کند. با اینکه این کابل‌ها مقاومت مد خرابی لغزش درز ملات را نیز به دلیل ایجاد نیروی محوری فشاری قابل ملاحظه ناشی از فعال شدن کابل‌ها برای دیوار فراهم می‌کند، نقش کابل‌ها علاوه بر تامین مقاومت برای مد حرکت گهواره ای، ممانعت از وقوع آن با تغییر شرایط مرزی دیوار نیز هست. در واقع تغییر مد خرابی دیوار از حرکت گهواره ای در نمونه ۳ به لغزش درز ملات در نمونه ۴ گویای این واقعیت است.



شکل ۳۵: نمودار نیرو بر اساس نسبت دریفت نمونه چهارم



شکل ۳۶: نمودار کرنش کابل ها بر اساس نسبت دریافت نمونه چهارم

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، رفتار درون صفحه استاتیکی رفت و برگشتی یک نمونه دیوار مصالح آجری غیرمسلح مورد ارزیابی قرار گرفت. این دیوار در دو حالت با و بدون سربار به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. عملکرد این دیوار توسط اضافه نمودن سیستم کابل و الاستومر در نقش فنر بهبود داده شد. مجموعه سری کابل ها و فنرها، یک نیروی بازگرداننده را ایجاد کرده و سبب افزایش قابل توجه در ظرفیت باربری دیوارهای مورد بررسی شدند. در مورد دیوار با سربار، اضافه کردن ۴ عدد کابل با الگوی ضربدری، سبب افزایش قابلیت برگشت پذیری دیوار که جزو مشخصات رفتاری مطلوب در بحث تاب آوری و مدیریتی خطرپذیری لرزه ای محسوب می شود شد. این امر با توجه به مود خرابی لغزش درز ملات در هر دو نمونه شاهد و مقام سازی شده، نوآوری این ایده برای سیستم های با ماهیت رفتاری اصطکاکی که تغییر شکل های ماندگار جزء لاینفک خصوصیات رفتاری آنها می باشد را نشان می دهد که برای اولین بار در دنیا به کار گرفته شده است. با این حال، افزایش قابل ملاحظه ای در مقاومت نمونه مقاوم سازی شده در مقایسه با نمونه متناظر فاقد مقاوم سازی مشاهده نشد. اما این امر در مورد دیوار فاقد سربار برعکس بود. اضافه کردن سیستم کابل در قالب ۴ کابل با راستای قائم علاوه بر افزایش بسیار قابل توجه در ظرفیت نیرویی دیوار مقاوم سازی شده، سبب تغییر در مود خرابی دیوار از حرکت گهواره ای به لغزش درز ملات شد که این امر همراه با افزایش قابلیت جذب انرژی چرخه ای نیز بود. به این ترتیب، استفاده از کابل، به عنوان سیستمی ارزان و و از نظر اجرایی ساده و سریع، می تواند گزینه مناسبی برای بهسازی لرزه ای دیوارهای مصالح بنایی موجود و نیز برای طراحی لرزه ای مناسب دیوارهای مصالح بنایی جدید الحداث باشد و نظر به اینکه زمینه استفاده از این سیستم در مقاوم سازی دیوارهای مصالح بنایی در کشور ما رواج پیدا کند لازم است تا تحقیقات گسترده تری نظیر بررسی رفتار دیوارهای آجری با تغییر در ضخامت دیوار، ایجاد بازشو و کلاف بتنی در اطراف دیوارها و تاثیر آن در عملکرد لرزه ای دیوار، مدلسازی دیوارهای بهسازی شده با کابل به روش میکرو و ماکرو و در نهایت مقایسه این روش با دیگر روش های بهسازی از قبیل شاکریت، FRP و ... انجام گیرد.

منابع

۱. بخشی، علی و قناد، محمد علی و مسائلی، حمید و یکرنگ نیا، محمد "ارزیابی رفتار لرزه ای ساختمان های خشتی با سقف گنبدی در حالات موجود و تقویت شده" انتشارات بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، ۱۳۹۰ (۳۰۲ صفحه)
۲. Yekrangnia, M, "Advanced Design Examples of Seismic Retrofit of Structures" Elsevier Publication, (ISBN: ۹۷۸۰۰۸۱۰۲۵۳۴۵, ۵۱۱ Pages), (۲۰۱۸)
۳. Dolatshahi K.M., Yekrangnia M., "Out-Of-Plane Strength Reduction of Unreinforced Masonry Walls Because of In-Plane Damages", John Wiley and Sons J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, DOI: ۱۰.۱۰۰۲/eqe.۲۵۷۴,(۲۰۱۵)
۴. Yahya Kurama, Stephen Pessiki, Richard Sause, Le-Wu Lu, "Seismic Behavior and Design of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Walls" Article in Pci Journal, DOI:۱۰.۱۵۵۵۴/pcij.۰۵۰۱۱۹۹۹,۷۲,۸۹ (۱۹۹۹)
۵. Robeno Rodriguez, Ahmad A. Hamid, Jesus Larralde, "Flexural behavior of post-tensioned masonry walls subjected to out-of plane loads: preliminary results" ۱۰th IB^۲ Mac, Engineering Structures, (۱۹۹۴)
۶. Luis A. TORANZO-DIANDERAS, José I. RESTREPO, Athol J. CARR, John B. MANDER, "Rocking confined masonry walls with hysteretic energy dissipators and shake-table validation" ۱۳th World Conference on Earthquake Engineering, Canada, (۲۰۰۴)
۷. D. Kalliontzis, A.E. Schultz, "Improved estimation of the reverse-cyclic behavior of fully-grouted masonry shear walls with unbounded post-tensioning", Elsevier Publication, Engineering Structures, ۱۴۵:۸۳-۹۶, (۲۰۱۷)
۸. Reza Hassanli a, Mohamed A. ElGawady b, Julie E. Mills, "Simplified approach to predict the flexural strength of self-centering masonry walls" Publication, Engineering Structures, (۲۰۱۷)
۹. LijunNiu, WenfangZhang, "Experimental Study on a Self-Centering Earthquake-Resistant Masonry Pier with a Structural Concrete Column" Hindawi, Materials Science and Engineering, (۲۰۱۷)

۱۰. Reza Hassanli, Mohamed ElGawady, Julie E. Mills, "Comparison of available expressions in predicting the Flexural Strength of Self centering Masonry Walls" ۱۳th canadian masonry symposium, Engineering Structures, (۲۰۱۷)
۱۱. Enrico CAPPELLI, Angelo DI EGIDIO, Fabrizio VESTRONI, "rocking of a masonry wall : analysis and experiments" ۱۶th European Conference, Earthquake Engineering,(۲۰۱۸)
۱۲. Dimitrios Kalliontzis, Arturo E. Schultz, Sri Sritharan, "The Effect of Impact Energy Loss in Seismic Response of Unbonded Post-Tensioned Rocking Masonry Walls" ۱۳Th Nourth American Masonry Conference, Masonry Conference, (۲۰۱۸)
۱۳. Claudia Casapullaa, Linda Giresini, Luca Umberto Argiento, Alessandra Maione, "non-linear static and dynamic analysis of rocking masonry corners using rigid macro-block modeling" International Journal of Structural Stability and Dynamics,(۲۰۱۹)
۱۴. Dimitrios Kalliontzi, Sri Sritharan, and Arturo E. Schultz, "Improving Performance of Unbonded Post-Tensioned Masonry Walls with the Use of Rubber Interface" ۱۳Th North American Masonry Conference,(۲۰۱۹)
۱۵. Reza Hassanli, "Behavior of Unbounded Post-tensioned Masonry Walls" Recognizing Outstanding Ph.D. Research, Springer Theses,(۲۰۱۹)
۱۶. Grigorian, C. E. and M. Grigorian, "Performance control and efficient design of rocking-wall moment frames." Journal of Structural Engineering ۱۴۲(۲): ۰۴۰۱۵۱۳۹, (۲۰۱۵)
۱۷. Kalliontzis, D., "Behavior of Precast Concrete and Masonry Wall Systems with Jointed Connections Subjected to Lateral Loads" University of Minnesota, (۲۰۱۸)
۱۸. Marreiros, R., et al, "Development of steel angles as energy dissipation devices for rocking connections." Structural Concrete ۱۹(۶): ۱۶۵۷-۱۶۷۱., (۲۰۱۸)
۱۹. Mottier, P., "Réhabilitation sismique de bâtiments de faible hauteur au Canada au moyen de contreventements berçants gravitaires en acier", École Polytechnique de Montréal, (۲۰۱۷)
۲۰. Mottier, P., et al. , "Seismic retrofit of low-rise steel buildings in Canada using rocking steel braced frames." Earthquake Engineering & Structural Dynamics ۴۷(۲): ۳۳۳-۳۵۵. (۲۰۱۸)
۲۱. Chavoshan, M., et al. , "Calibration of a FE model of masonry wall retrofit by CFRP" , International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, Volume ۱۱, Issue ۲ (May, ۲۰۱۲)