

مطالعه آزمایشگاهی رفتار چرخه‌ای دیوارهای بنایی غیر باربر تقویت شده با استفاده از میلگرد بستر و مش الیاف

وحید رازقی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

مژده زرگران* (دانشیار)

بخش مهندسی سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

علی نیکخو (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

نادر خواجه احمد عطاری (استاد)

نرگس آزادوار (دکتری)

بخش مهندسی سازه، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مهندسی عمران تشریف: زمستان ۱۴۰۲
دوری ۳۹، شماره ۴، صص. ۸۹-۹۹، (پژوهشی)

عامل اصلی آسیب و خرابی دیوارها در هنگام زلزله، ناپایداری و فروریزش آن تحت اثر توام جابه‌جایی درون صفحه دیوار تحت اثر جابه‌جایی نسبی طبقات و نیروی لرزه‌ای خارج از صفحه وارده به دیوار می‌باشد. در اغلب تحقیقات صورت گرفته، هر یک از بارگذاری درون صفحه‌ای و خارج از صفحه به صورت جداگانه بررسی شده‌اند یا اثر اندرکنش بین این بارها به صورت غیر مستقیم مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق، رفتار دیوار غیر سازه‌ای تحت اثر توام جابه‌جایی درون صفحه‌ای و بار برون صفحه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است و تأثیر مسلح‌سازی دیوارهای غیر سازه‌ای جداسازی شده از قاب سازه‌ای با استفاده از ملات مسلح شده به شبکه الیاف و میلگرد بستر بررسی شده است. به این منظور، سه نمونه دیوار جداسازی شده از بلوک لیکا ساخته شد. نمونه‌های مسلح شده با دو روش استفاده از میلگرد بستر و استفاده از مش الیافی با مقیاس ۱ به ۱ تحت بار توامان چرخه‌ای درون صفحه‌ای و بار ثابت برون صفحه‌ای ارزیابی شده و با دیوار شاهد غیر مسلح مقایسه شد. نتایج حاصل از این آزمایشات نشان داد که نمونه دیوار غیر سازه‌ای غیر مسلح تحت بار خارج از صفحه زلزله در تغییر مکان نسبی کم داخل صفحه دچار خرابی و ریزش شد. از طرفی، دیوار غیر سازه‌ای مسلح شده با استفاده از ملات مسلح شده به شبکه الیاف افزایش ۱۵ و ۵۴ درصدی در تغییر مکان نسبی مربوط به کاهش مقاومت دیوار و حداکثر نیروی داخل صفحه نسبت به دیوار غیر سازه‌ای مسلح شده با میلگرد بستر نشان داد.

واژگان کلیدی: دیوار بنایی، رفتار لرزه‌ای، ملات مسلح شده به شبکه الیاف،

میلگرد بستر، TRC.

v.razeghi@stu.usc.ac.ir
m.zargaran@bhrc.ac.ir
nikkhoo@usc.ac.ir
n.attari@bhrc.ac.ir
narges.azadvar@yahoo.com

۱. مقدمه

دیوار داخلی، جان‌پناه، راه پله، سقف کاذب و نما اشاره کرد. در این میان، بیشترین آسیب وارده در زلزله‌های اخیر ناشی از آسیب وارده به دیوارهای خارجی و داخلی بلوکی بوده است.

مصالح بنایی در بسیاری از کشورها، از جمله ایران، کاربرد فراوانی در ساخت و ساز داشته و به‌طور گسترده در المان‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای مورد استفاده قرار

اعضای غیرسازه‌ای معماری، از جمله دیوارهای داخلی و خارجی ساختمان‌ها، در زلزله آسیب‌پذیر بوده و تاکنون موجب خسارت‌های جانی و مالی فراوانی در سطح جهانی و به ویژه در ایران شده است. از جمله این اجزا می‌توان به دیوار خارجی، تیغه،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۲۶، اصلاحیه ۱۴۰۲/۱/۲۳، پذیرش ۱۴۰۲/۱/۲۸.

استاد به این مقاله:

رازقی، وحید، زرگران، مژده، نیکخو، علی، خواجه احمد عطاری نادر، و آزادوار، نرگس، ۱۴۰۲. مطالعه آزمایشگاهی رفتار چرخه‌ای دیوارهای بنایی غیر باربر تقویت شده با استفاده از

میلگرد بستر و مش الیاف. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۸۹-۹۹. DOI:10.24200/J30.2023.61543.3185

می‌گیرند. این مصالح از منظر لرزه‌ای ضعیف بوده و وزن بالا و شکل‌پذیری پایین دارند. عامل موثر دیگر در رفتار لرزه‌ای نامناسب دیوارهای بتنی، اتصال نامناسب آن‌ها به سازه باربر جانبی اصلی می‌باشد. روش‌های اجرایی فعلی به نحوی هستند که در حین زلزله، تغییر مکان‌های جانبی سیستم باربر جانبی به دیوارهای غیر سازه‌ای منتقل شده و با توجه به ظرفیت تغییر شکل اندک، دیوار دچار آسیب شدید داخل صفحه شده و این آسیب، دیوار را مستعد فروریزش خارج از صفحه خواهد نمود. نمونه‌های بسیاری از چنین تخریب‌هایی در زلزله‌های گذشته مشاهده شده است. به منظور جلوگیری از آسیب‌های ناشی از تخریب این المان‌ها، روش‌های مختلفی ارائه و مورد آزمایش قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از شاکریت^[۱]، بست‌های متصل کننده دیوار به ستون^[۲،۳]، میلگرد بستر^[۴]، پلیمر مسلح شده به الیاف (FRP)^۱ و ملات مسلح شده به شبکه الیاف (TRC)^۲ اشاره کرد. بر اساس پیوست ششم استاندارد ۲۸۰۰^[۵] و تجدید نظر اول نشریه ۷۱۴ سازمان برنامه و بودجه^[۶]، مسلح کردن دیوار به دو روش استفاده از میلگرد بستر و استفاده از مش الیاف (TRC) مجاز می‌باشد. روش استفاده از میلگرد بستر یکی از روش‌های قدیمی مسلح کردن دیوارهای مصالح بتنی است که روش طراحی آن در ۵۳۰-۱۱ ACI و Eurocode ۶ آمده است.^[۷،۸] همچنین، روش مسلح کردن دیوارهای مصالح بتنی با مش الیاف TRC روش جدیدی است که تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر بر روی آن انجام شده است. در ادامه، به منظور شناخت ویژگی‌های روش تقویت دیوارهای بتنی با استفاده از TRM^۳ به معرفی روش TRC پرداخته شده است.

به دلیل مشکلات موجود در استفاده از روش پلیمر مسلح به الیاف، تلاش‌های فراوانی برای یافتن جایگزین آن انجام شده است. از میان روش‌های مختلف، استفاده از ملات مسلح شده به شبکه الیاف با توجه به سازگاری مناسب‌تر مکانیکی و شیمیایی با زیرسازه، از برتری قابل توجهی برخوردار است. یکی از برترین مزیت‌های این روش، غلبه بر ضعف چسبندگی و مسائل مرتبط با رطوبت می‌باشد. این روش در نوشتارهای مختلف با نام‌های مختلفی از جمله TRM، TRC، FRCM^۴ یا IMG^۵ شناخته می‌شود. در این روش، شبکه الیاف تقویت‌کننده از رشته‌های بافته شده حداقل در دو جهت عمود برهم ساخته شده‌اند. تراکم شبکه الیاف (مقدار و فاصله چشمه‌ها) که به عنوان مشخصه مکانیکی آن شناخته می‌شود، قابل کنترل است. این موضوع بر سطح نفوذ ملات به داخل چشمه‌ها نیز موثر است. امروزه دانش در زمینه TRM به مراتب کمتر از FRP می‌باشد و تحقیقات بر روی این روش همچنان ادامه دارد.

روش TRM موجب بهبود مقاومت داخل و خارج از صفحه دیوار بتنی (بسته به تعداد لایه‌های الیاف و همچنین نوع ملات)، ظرفیت شکل‌پذیری (بسته به نوع و هندسه نمونه)، خرابی الیاف وابسته و یا لغزش شبکه الیاف در ملات می‌شود. این روش در ابتدا به منظور تقویت سازه‌های بتنی مسلح توسعه یافت^[۹،۱۰]، اما خیلی زود توانست با فائق آمدن بر مسائل مرتبط با استفاده از FRP، در سازه‌های بتنی نیز جایگزین شود.

به منظور شناخت روش تقویت دیوارهای بتنی با استفاده از TRM، مطالعات آزمایشگاهی مختلفی توسط محققین مختلف صورت گرفته است. به طور کلی، مشخصه‌هایی همچون تعداد لایه، انواع مختلف تسلیح، نوع ملات و مهار لایه تقویت به زیرسازه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است، روش اعمال ملات به دو صورت معروف به ملات دستی^۶ یا پاششی^۷ صورت می‌گیرد. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیق انجام شده توسط مارتینز و همکاران اشاره کرد. آن‌ها به منظور تقویت سازه‌های بتنی در جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای،

جلوگیری از شکست ترد، کاهش خرابی مصالح و تلفات جانی، از روش TRM استفاده کرده‌اند. در این تحقیق، ساختار شبکه الیاف تقویت‌کننده به گونه‌ای تعیین شد که چسبندگی آن به ملات بهینه شود. بر اساس نتایج به دست آمده، مش‌های پیشنهادی در جلوگیری از خرابی ترد و جدایش زودرس مصالح بتنی آجری در هنگام زلزله موثر بودند. همچنین، ملات با مقاومت بیشتر موجب مقاومت اتصال بیشتر شده و ملات با مقاومت کمتر، رفتار شکل‌پذیرتری را پس از پیک مقاومت نشان داده است.^[۱۱]

همچنین، برنات و همکاران در دو مطالعه مجزا به بررسی عملکرد روش TRM در تقویت دیوارهای بتنی پرداختند. در یک مطالعه آزمایشگاهی، آن‌ها تعدادی دیوار بتنی با ابعاد واقعی تقویت شده به روش TRM را تحت بارگذاری فشاری خارج از مرکز قرار دادند. مشخصه‌های مورد بررسی در این پژوهش عبارتند از: نوع شبکه الیاف، تعداد لایه مورد استفاده، نوع ملات و همچنین استفاده از اتصال دهنده‌های لایه تقویت به دیوار بتنی به منظور افزایش چسبندگی. بر اساس نتایج این تحقیق، تمامی ملات‌ها از مقاومت اتصال لازم که چسبندگی TRM به دیوار بتنی را تضمین نماید، برخوردار بودند. بنابراین، هیچ‌گونه اتصال دهنده‌ای برای دیوارهای تقویت شده تحت بارهای فشاری خارج از صفحه نیاز نبود. علاوه بر این، استفاده از TRM، افزایش ۱۰۰ درصدی مقاومت را به همراه داشت و موجب رفتار سخت‌تر دیوار به صورت درون صفحه و برون صفحه شد که سختی درون صفحه دیوار، بسته به نوع ملات و سختی برون صفحه وابستگی بیشتری به نوع و مقدار الیاف داشت. استفاده از TRM، دیوار را یکپارچه کرده و از پراکندگی در حین خرابی جلوگیری کرد. این موضوع می‌تواند موجب تکیه بیشتر بر روی این روش به عنوان روشی برای مقاوم سازی، تقویت و یا حتی ساخت ساختمان جدید باشد.^[۱۲]

در مطالعه‌ای دیگر، برنات و همکاران نحوه اعمال روش TRM در سازه‌های بتنی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، استفاده از روش پاششی در مقایسه با روش دستی موجب افزایش قابل توجه در بهره‌وری و شکل‌پذیری شد. اگرچه باید ذکر کرد که افزایش مقاومت، قابل توجه نبوده است.^[۱۳] دارآباد و همکاران، با انجام آزمایش کشش قطری بر روی ۴ دیوار بتنی، رفتار درون صفحه دیوارهای بتنی بتنی غیرمسلح تقویت شده از خارج با استفاده از FRCM را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج، با نسبت تقویت برابر، ظرفیت برش FRP و FRCM مشابه می‌باشند. افزایش درصد تسلیح وابسته به مقاومت فشاری واحد بتنی است، چرا که اگر حاکم شود، افزودن درصد تسلیح بی‌فایده خواهد بود.^[۱۴] پاپانیوکولا و همکاران، روش TRM را به عنوان روشی برای افزایش ظرفیت باربری و قابلیت تغییر شکل دیوارهای بتنی غیرمسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای درون صفحه به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. به این منظور، ۲۲ دیوار بتنی با مقیاس متوسط تحت بارهای چرخه‌ای درون صفحه قرار گرفت. مشخصه‌های مورد بررسی در این مجموعه، آزمایش مصالح ملات، تعداد لایه‌های تقویت و میزان تنش فشاری وارد بر نمونه بوده است. بر اساس نتایج، TRM به عنوان راه حل مناسبی برای بهبود رفتار داخل صفحه دیوارهای بتنی معرفی شده است. بر اساس مقاومت، کارایی TRM نسبت به FRP تا اندازه‌ای کمتر بوده است و از لحاظ تغییر شکل (که در طراحی لرزه‌ای بسیار حائز اهمیت است) کارایی TRM از FRP بیشتر می‌باشد.^[۱۵] ترتیتافیلو و همکاران، راجع به استفاده از ژاکت‌های TRM با الیاف کربن به جای ژاکت‌های FRP تحقیق کردند و تأثیر تسلیح بتن با الیاف و رزین اپوکسی را با هم مقایسه کرده و تأثیر تعداد لایه‌های الیاف و مقاومت ملات را بررسی کردند. آزمایش‌ها نشان داد ژاکت‌های TRM موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری شده است. در این تحقیق نشان داده شد که مقاومت ملات و تعداد لایه‌های الیاف هر دو تأثیر زیادی بر

شده توسط آیین نامه اعمال شده است. سپس، در حضور بار خارج از صفحه، یک بار دیگر چرخه جابه‌جایی داخل صفحه اعمال شده است. با استفاده از این روش، با بررسی میزان تغییر مکان‌های خارج از صفحه، دیوار غیر سازه‌ای تحت بار یکسان اما تحت اثر جابه‌جایی‌های داخل صفحه مختلف قاب (دامنه‌های مختلف بارگذاری داخل صفحه) می‌توان تأثیر جابه‌جایی داخل صفحه قاب بر کاهش ظرفیت باربری خارج از صفحه دیوار غیر سازه‌ای را ارزیابی نمود. همچنین، با مقایسه دو چرخه بارگذاری داخل صفحه که یکی با حضور بار خارج از صفحه و دیگری بدون آن است، می‌توان اثر بار خارج از صفحه بر روی رفتار داخل صفحه را بررسی کرد. این امر می‌تواند در تامين پایداری قاب نقش داشته باشد. نمونه‌های دیوار به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر به ابعاد ۳۰۰۰ میلی‌متر در ۳۰۰۰ میلی‌متر در قاب فولادی ساخته شده است. برای ساخت نمونه‌های دیوار جهت انجام این مجموعه آزمون‌ها قاب فولادی به ابعاد ۳۰۰۰ × ۳۰۰۰ میلی‌متر ساخته شد. ستون‌ها و تیر از مقطع IPE۱۸۰ و اتصال تیر به ستون از نوع مفصلی بوده است. با توجه به اینکه جزئیات اتصال دیوار به ستون‌های کناری از نوع اتصال کشویی با استفاده از نبشی گرم نورد انتخاب شده است، لازم بود قبل از اجرای دیوار، نبشی‌ها در محل خود بر روی ستون (۳ نبشی با فواصل یک چهارم ارتفاع ستون) جوش شود. نبشی‌های مورد استفاده از نوع نبشی نمره ۶ به طول ۱۰۰ میلی‌متر بوده است.

۲.۲. مشخصات مصالح

۲.۲.۱. واحدهای بنایی

آزمایش مقاومت فشاری المان بنایی متشکل از بلوک‌های سیمانی سبک‌دانه بر اساس استاندارد ASTM C۱۳۱۴ [۲۱] و مطابق شکل ۱ الف انجام شد. با توجه به استاندارد، حداقل سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. نسبت ارتفاع به عرض نمونه‌ها باید در بازه ۱/۳ الی ۵ باشد. مقاومت فشاری المان بنایی که برای هر سری از نمونه‌های بنایی تعیین می‌شود، باید مساوی یا بیشتر از f'_m باشد. نمونه‌ها ۲۸ روز بعد از ساخت مورد آزمایش قرار گرفتند. به همین منظور، نمونه‌ها در دستگاه قرار گرفتند و در بالا و پایین آن دو صفحه فولادی قرار داده شده و بار محوری و جابه‌جایی محوری المان بنایی در طول آزمایش فشاری ثبت شد. نتایج آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است و مود شکست در نمونه‌ها مخروطی می‌باشد که در شکل ۱ ب نشان داده شده است.

برای آزمایش مقاومت برشی، دیوار به ابعاد ۱۲۰۰ در ۱۲۰۰ میلی‌متر ساخته شده از بلوک لیکا بر اساس استاندارد ASTM E5۱۹/E5۱۹M-۱۰ [۲۲] مطابق شکل ۲ الف انجام شد. نتایج حاکی از آن است که شکست فشاری پنجه در نمونه‌ها اتفاق افتاده است (شکل ۲ ب). مود شکست با فشار پنجه آغاز شده و با خرابی بلوک‌ها و توسعه ترک ادامه یافته است. نتایج آزمون در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. نتایج آزمون مقاومت فشاری.

نمونه	$F(kN)$	$P(MPa)$
۱	۱۳۸/۶۶	۳/۲۱
۲	۱۲۰/۳۵	۲/۷۸
۳	۱۳۵/۴۰	۳/۱۳
میانگین		۳/۰۴

سیستم تسلیح دارند. [۱۶] امپرس دریافت که سختی بتن محصورشده با افزایش تعداد لایه‌های FRCM افزایش می‌یابد. افزایش دما موجب کاهش مقاومت در المان‌های محصور شده می‌شود، در حالی که در کرنش نهایی قابل چشم پوشی است. [۱۷] دکاسو وای باسلو و همکاران گروت‌های مختلف به‌عنوان ماتریس بتنی و الیاف با بافت‌های مختلف (مش‌های یک جهته و دو جهته از الیاف شیشه‌ای با تراکم بالا یا تراکم پایین) را مورد بررسی قرار دادند. [۱۸] کلاسانی و همکاران نشان دادند که المان‌های محصور شده با PBO موجب افزایش چشمگیر مقاومت و شکل‌پذیری می‌شوند. [۱۹]

در تحقیقی دیگر، مقایسه دیوار مصالح بنایی تقویت شده با استفاده از FRP و TRC انجام شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، ظرفیت مقاومت جانبی تقویت‌کننده‌های TRC پایین‌تر از FRP بوده اما ظرفیت انعطاف‌پذیری به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. [۲۰] در بیشتر مطالعات صورت گرفته، رفتار جداگانه درون صفحه یا برون صفحه دیوار مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر مسلح‌سازی دیوارهای جداسازی شده با استفاده از ملات مسلح شده به شبکه الیاف و روش مسلح‌سازی با میلگرد بستر تحت بارگذاری توأمان درون صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای پرداخته شده است. این امر نتایج حاصل از تحقیق را به شرایط واقعی زلزله نزدیک‌تر خواهد کرد.

۲. روش تحقیق

در این تحقیق، سه نمونه آزمایشگاهی در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی مورد آزمایش قرار گرفته است تا تأثیر دو روش مسلح‌سازی بر رفتار لرزه‌ای دیوارهای مصالح بنایی مورد بررسی قرار گیرد. بخش‌های مختلف این آزمایشات در ادامه توضیح داده شده است.

۲.۱. نمونه‌های آزمایشگاهی

در این آزمایشات، سه دیوار مصالح بنایی با مقیاس ۱ به ۱ تحت آزمایش چرخه‌ای قرار گرفتند تا اثر تغییر مکان درون صفحه قاب و دیوار بر روی عملکرد بیرون صفحه دیوار غیر سازه‌ای که با دو روش مختلف مسلح شده‌اند مورد بررسی قرار گیرد. روش‌های تسلیح دیوار برای بارهای خارج از صفحه که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، عبارتند از: تسلیح با استفاده از ملات سیمانی مسلح شده به شبکه الیاف (TRC) و تسلیح با استفاده از میلگرد بستر. تمام نمونه‌های مورد مطالعه دیوار غیر سازه‌ای می‌باشند. بنابراین، بر اساس ضوابط پیوست ششم استاندارد ۲۸۰۰ و ضوابط فصل دوازدهم تجدید نظر اول نشریه ۷۱۴ سازمان برنامه و بودجه کشور، به اندازه حداقل دو مقدار ۳ سانتی‌متر و یک درصد ارتفاع قاب از تیر و ستون جداسازی شده‌اند.

اولین نمونه، دیوار بدون تقویت می‌باشد که به‌عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است. دیوار دوم، دیواری است که با استفاده از تقویت با میلگرد بستر مسلح شده است. در نمونه آخر، دیوار با استفاده از ملات مسلح‌شده به شبکه الیاف بر روی هر دو وجه مسلح شده است. الگوی بارگذاری داخل صفحه نمونه‌ها براساس نشریه FEMA۴۶۱ بوده است. در این الگو، هر دامنه تغییر مکان، دو چرخه تکرار شده است. اصلاح انجام شده جهت اعمال اثر بار خارج از صفحه نیز به گونه‌ای است که در هر دامنه تغییر مکان، چرخه اول بارگذاری بدون بار خارج از صفحه بوده است. پس از آن، نیروی خارج از صفحه به تدریج از صفر تا مقدار تعیین



شکل ۳. الف) مش الیاف شیشه و ب) نمونه آماده شده به منظور انجام آزمایش کشش.

جدول ۳. طرح اختلاط ماتریس سیمانی.

۱۲۱۴ Kg/m^3	ماسه
۷۰۰ Kg/m^3	سیمان
۲۸۰ Kg/m^3	آب
۷٪ وزن سیمان	فوق روان کننده

جدول ۴. مشخصات مکانیکی میلگرد بستر.

۶۰۲/۶۶	متوسط تنش حد جاری شدن (MPa)
۷۲۷/۶۶	متوسط استحکام نهایی (MPa)

میلی‌متر) و آب است (جدول ۳). میانگین مقاومت فشاری مشخصه این ملات براساس $ASTM C 909/C 909M - 20b$ [۲۴] برابر با ۴۰٪ مگاپاسکال بود.

۳.۲.۲. میلگرد بستر

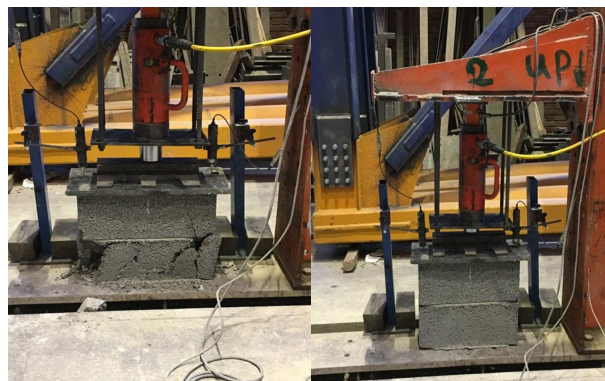
در این بخش، مشخصات مکانیکی میلگرد بستر مورد استفاده در تقویت نمونه براساس استاندارد $ASTM A 951$ [۲۵] در جدول ۴ ارائه شده است.

۳.۲. جزئیات اجرای نمونه‌ها

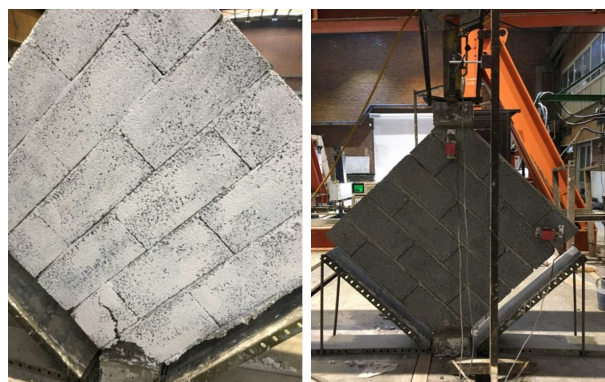
در این آزمایشات، سه دیوار بتنی تحت آزمایش چرخه‌ای قرار گرفتند تا اثر جداسازی دیوار و تقویت آن با استفاده از دو روش مختلف مقاوم‌سازی شامل مقاوم‌سازی با میلگرد بستر و مقاوم‌سازی با ملات مسلح شده به شبکه الیاف بر روی دیوارهای بتنی غیرمسلح مورد بررسی قرار گیرد.

۱.۳.۲. نمونه اول: نمونه جداسازی شده (نمونه شاهد)

این نمونه دیوار به ضخامت ۱۵۰ میلی‌متر به ابعاد ۳۰۰۰ میلی‌متر در ۳۰۰۰ میلی‌متر در قاب فولادی با مشخصات مذکور ساخته شده است. به منظور مهار خارج از صفحه دیوار، به دلیل اینکه جزئیات اتصال دیوار به ستون‌های کناری از نوع اتصال کشویی با استفاده از نبشی گرم نورد می‌باشد، قبل از اجرای دیوار نبشی‌ها (نبشی نمره ۶ به طول ۱۰۰ میلی‌متر) در محل خود بر روی ستون جوش شدند. برای اجرای دیوار، ابتدا یک لایه ملات ماسه سیمان اجرا شده، سپس ردیف اول بلوک‌ها بر روی ملات ماسه سیمان قرار گرفت. به منظور جداسازی دیوار از ستون، بلوک‌ها به شکلی چیده شده است که از طرفین دیوار حدود ۳۰ میلی‌متر فضای خالی بین



شکل ۱. الف) آزمایش‌های بارگذاری؛ ب) مد شکست فشاری.



شکل ۲. الف) تنظیمات آزمون کشش قطری (برش) و ب) مد شکست فشاری پنجه.

جدول ۲. نتایج آزمون مقاومت فشاری.

نمونه	ظرفیت باربری قطری (kN)	مود شکست
۱	۱۰۴/۳۸	پنجه
۲	۹۵/۶۹	پنجه
۳	۱۱۰/۸۹	پنجه

۲.۲.۲. آزمایشات TRC

الیاف: در این بخش، مشخصات مکانیکی چند رشته‌ای‌های^۸ شیشه مورد استفاده در تقویت نمونه براساس استاندارد $ASTM E 2098/E 2098M - 13$ [۲۳] ارائه شده است. وزن متر مربع مش الیاف مورد استفاده برابر با ۱۰۰ بر متر مربع بوده است. این مش الیافی متشکل از چند رشته‌ای‌های شیشه می‌باشد که از مقاومت مکانیکی مناسبی برخوردار بوده و چسبندگی خوبی با ماتریس سیمانی دارد. فاصله چشمه‌ها در جهت تار و پود ۵ میلی‌متر است (شکل ۳). مساحت اسمی چند رشته‌ایهای شیشه مورد استفاده در این تحقیق برابر با ۲۲۲/۰ میلی‌متر مربع می‌باشد. آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌هایی از چند رشته‌ای شیشه‌ای مورد استفاده انجام شد که میانگین مقاومت کششی چند رشته‌ای ۱۰۲۰ مگاپاسکال بوده است.

ماتریس سیمانی: به منظور به دست آوردن مقاومت فشاری ماتریس سیمانی به‌عنوان مصالحی که برای چسباندن مش الیافی به سازه بتنی استفاده می‌شود، شش نمونه مکعبی $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متر مکعب ساخته شد. این ماتریس متشکل از سیمان پرتلند نوع دو به همراه ریزدانه (با اندازه دانه‌هایی کمتر از ۱

۳.۳.۲. نمونه سوم: نمونه جداسازی شده و تقویت شده با مش دوطرفه

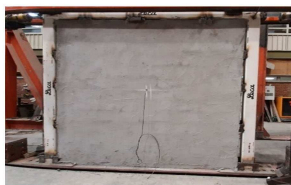
TRC

این نمونه دیوار، همانند نمونه شماره ۱ ساخته شده است. پس از ساخت کامل، به منظور تقویت دیوار در جهت خارج از صفحه، از TRC در دو طرف دیوار استفاده شده است. به همین منظور، الیاف روی کل سطح دیوار قرار گرفت (شکل ۱۶الف) و پس از این مرحله، روی الیاف لایه نهایی ملات اعمال شده است (شکل ۱۶ب).

دوخت TRC به دیوار تنها در صورتی لازم است که چسبندگی مناسبی بین TRC و دیوار وجود نداشته باشد. با توجه به تسلیح دیوار در دو سمت آن و چسبندگی مناسب TRC به مصالح بنایی، نیازی به دوخت TRC به دیوار مصالح بنایی به خصوص در کاربردهای غیر سازه‌ای نمی‌باشد. این مساله در پژوهش [۲۴] به صورت کامل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمای کلی نمونه شماره ۳ در شکل ۱۶ج نشان داده شده است.

۴.۲. ابزاربندی

به منظور انجام آزمون‌های چرخه‌ای، دیوار در قاب فولادی به ابعاد 3000×3000 میلی‌متر مربع ساخته شده است. ستون‌ها و تیر قاب از مقطع IPE۱۸۰ و اتصال تیر به ستون از نوع مفصلی بوده و اتصال قاب به کف صلب آزمایشگاه به صورت گیردار می‌باشد. به منظور اعمال نیروی جانبی از دو جک هیدرولیکی 1500×1500 میلی‌متر مربع استفاده شده است. به منظور اندازه‌گیری نیرو، دو نیروسنج در دو سمت قاب و در پشت جک‌ها تعبیه شد. همچنین، به منظور اندازه‌گیری تغییرمکان نقاط مختلف دیوار از دو تغییرمکان‌سنج در قسمت میانی دیوار و یک تغییرمکان‌سنج در قسمت میانی بالای دیوار استفاده شده است (شکل ۷).



شکل ۶. نمونه شماره ۳ تقویت شده با مش الیافی.

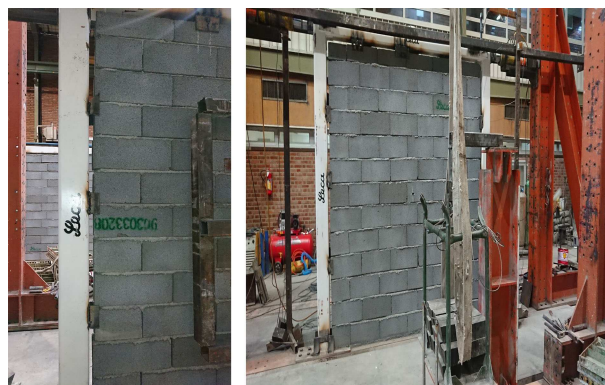


شکل ۷. ابزاربندی نمونه شماره ۳.

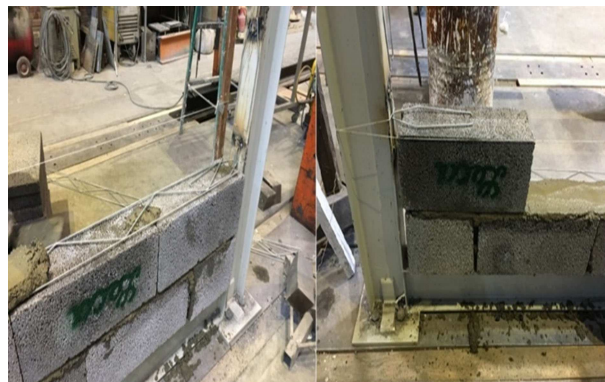
دیوار و ستون وجود داشته باشد. برای این منظور، پلی‌استایرن به ضخامت 30 میلی‌متر در فضای بین ستون و دیوار جایگذاری شد. به همین ترتیب تا انتهای دیوار بلوک چینی انجام و در ردیف آخر بالای دیوار 30 میلی‌متر فضای خالی در نظر گرفته شد و جهت مهار خارج از صفحه دیوار، سه عدد نبشی نمره ۶ به طول 100 میلی‌متر در فواصل مساوی در هر دو طرف و هر دو سمت دیوار تعبیه شده است. نمای کلی نمونه شماره ۱ در شکل ۴ نشان داده شده است.

۲.۳.۲. نمونه دوم: نمونه جداسازی شده و تقویت شده با میلگرد بستر

این نمونه دیوار به ضخامت 150 میلی‌متر به ابعاد 3000×3000 میلی‌متر در قاب فولادی با مشخصات نمونه شاهد ساخته شد. با توجه به اینکه جزئیات اتصال دیوار به ستون‌های کناری از نوع شاخک انتهایی انتخاب شد، قبل از اجرای دیوار، شاخک‌ها در محل خود بر روی ستون (در ارتفاع هر دو رج بلوک چینی) جوش و نصب شدند. برای اجرای دیوار، ابتدا یک لایه ملات ماسه سیمان اجرا شد. سپس، ردیف اول بلوک‌ها بر روی ملات ماسه سیمان قرار گرفتند. بلوک‌ها طوری چیده شدند که از طرفین دیوار حدود 30 میلی‌متر فضای خالی بین دیوار و ستون وجود داشته باشد. پس از اینکه دو ردیف اول بلوک چینی انجام شد، شبکه میلگرد بستر به قطر 4 میلی‌متر تعبیه شد و ملات ماسه سیمان بر روی آن اجرا شد. به همین ترتیب تا انتهای دیوار بلوک چینی انجام و در هر دو ردیف از شبکه میلگرد بستر جهت تسلیح دیوار استفاده شد. در ردیف آخر بالای دیوار 30 میلی‌متر فضای خالی در نظر گرفته شد و جهت مهار خارج از صفحه دیوار، دو عدد نبشی نمره ۶ به طول 100 میلی‌متر در فواصل یک سوم میانی تعبیه شد. نمای کلی نمونه شماره ۲ در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه شماره ۱.



شکل ۵. نمونه شماره ۲ تقویت شده با میلگرد بستر.

۵.۲. پروتکل بارگذاری

بارهای وارده به دیوار شامل بارهای خارج از صفحه و داخل صفحه می‌باشند. بارگذاری داخل صفحه دیوار به صورت چرخه‌ای می‌باشد که هر دامنه آن دو چرخه تکرار شده است. بارگذاری به گونه‌ای انتخاب شد که در چرخه‌های فرد، ابتدا بار خارج از صفحه اعمال شده و پس از آن بار داخل صفحه در حضور بار خارج از صفحه به صورت چرخه رفت و برگشت اعمال شد. در چرخه‌های زوج، تنها بار داخل صفحه به نمونه اعمال شد. در واقع، هر سه حالت اثر زلزله بر روی دیوار که عبارتند از: اثر نیروی زلزله در راستای دیوار به تنهایی، اثر نیروی زلزله در راستای عمود بر دیوار به تنهایی و اثر توامان این دو با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است.

بار خارج از صفحه، بار معادل زلزله وارد بر دیوار می‌باشد که مطابق ضوابط طراحی لرزه‌ای اجزای غیرسازه‌ای ASCE-۲۰۲۲^[۲۷] و با استفاده از روابط زیر محاسبه شده و برابر با ۹ کیلونیوتن در نظر گرفته شده است.

$$F_P = 0.4A(1+S)W_{PIP}\left(\frac{H_f}{R_\mu}\right)\left(\frac{C_{AR}}{R_{po}}\right) \\ = 0.4 \times 0.35 \times (1+2.5) \times 1623 \times 9.81 \times 1 \times \left(\frac{2.25}{1.3}\right) \times \left(\frac{1}{1.5}\right) \\ \cong 9000 N = 9 kN \quad (1)$$

$$F_{Pmin} = 0.3A(1+S)W_{PIP} \\ = 0.4 \times 0.35 \times (1+2.5) \times 1623 \times 9.81 \times 1 \\ \cong 5850 N = 5.85 kN \quad (2)$$

$$F_{Pmax} = 1.6A(1+S)W_{PIP} \\ = 1.6 \times 0.35 \times (1+2.5) \times 1623 \times 9.81 \times 1 \\ \cong 31200 N = 31.2 kN \quad (3)$$

که در روابط بالا:

F_P : نیروی جانبی زلزله؛

F_{Pmin} : حداقل نیروی جانبی زلزله؛

F_{Pmax} : حداکثر نیروی جانبی زلزله؛

A : شتاب پایه؛

S : ضریب شتاب طیفی؛

I_P : ضریب اهمیت جز؛

W_P : وزن جز غیرسازه‌ای همراه با محتویات آن در زمان بهره‌برداری؛

H_f : ضریب بزرگ‌نمایی نیرو که تابعی از ارتفاع مرکز جرم جز از تراز پایه می‌باشد که براساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

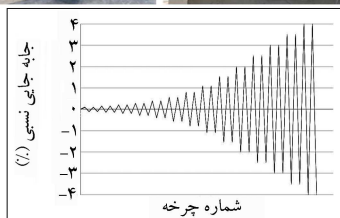
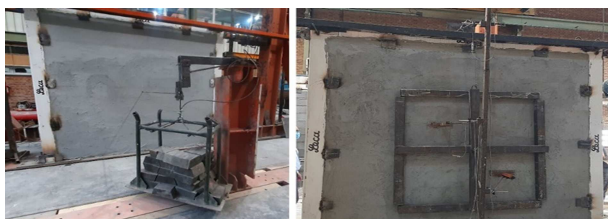
R_μ : ضریب کاهش ناشی از شکل‌پذیری که براساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

C_{AR} : ضریب تشدید برای تبدیل حداکثر شتاب پایه به شتاب حداکثر جز.

$$H_f = 1 + 2.5 \left(\frac{Z}{H}\right) = 1 + 2.5 \left(\frac{1}{2}\right) = 2.25 \quad (4)$$

Z : ارتفاع متوسط بام ساختمان از تراز پایه؛

H : ارتفاع محل اتصال جز غیرسازه‌ای نسب به تراز پایه.



شکل ۸. الف) نحوه اعمال بار خارج از صفحه (ب) چرخه بارگذاری داخل صفحه.

$$R_\mu = \left(\frac{1}{\Omega_s} R\right) \geq 1.3 \rightarrow R_\mu = 1.3 \quad (5)$$

R : ضریب رفتار سازه طبق استاندارد ۲۸۰۰؛

Ω_s : ضریب اضافه مقاومت برای سازه طبق استاندارد ۲۸۰۰.

برای اعمال این بار از قطعات سربی استفاده شد و این نیرو به صورت افقی در محدوده مربع شکل به ابعاد ۱۵۰۰ در ۱۵۰۰ میلی‌متر مربع مطابق جزئیات شکل ۸ الف در وسط دیوار اعمال شد. بارگذاری داخل صفحه مطابق پروتکل بارگذاری شکل ۸ ب اعمال شده که این بارگذاری به صورت کنترل شونده توسط تغییر مکان می‌باشد. در الگوی بارگذاری داخل صفحه، تعداد ۲۳ چرخه بارگذاری جانبی معکوس شونده در نظر گرفته شد و این چرخه‌ها از تغییرمکان نسبی جانبی ۰/۸٪ درصد شروع و تا تغییرمکان نسبی ۴٪ درصد ادامه پیدا کرد. هر چرخه بارگذاری دو بار تکرار شد که در چرخه‌های فرد، بار داخل صفحه به همراه بار خارج از صفحه اعمال شد و در چرخه‌های زوج تنها بار داخل صفحه به نمونه اعمال شد. بارگذاری اعمال شده به نمونه‌ها با سرعت بسیار پایین انجام شد تا اثر افزایش مقاومت مصالح در پاسخ نمونه‌ها نقشی نداشته باشد. این روش آزمایش به نام روش شبه استاتیکی شناخته می‌شود.

۳. نتایج و بحث

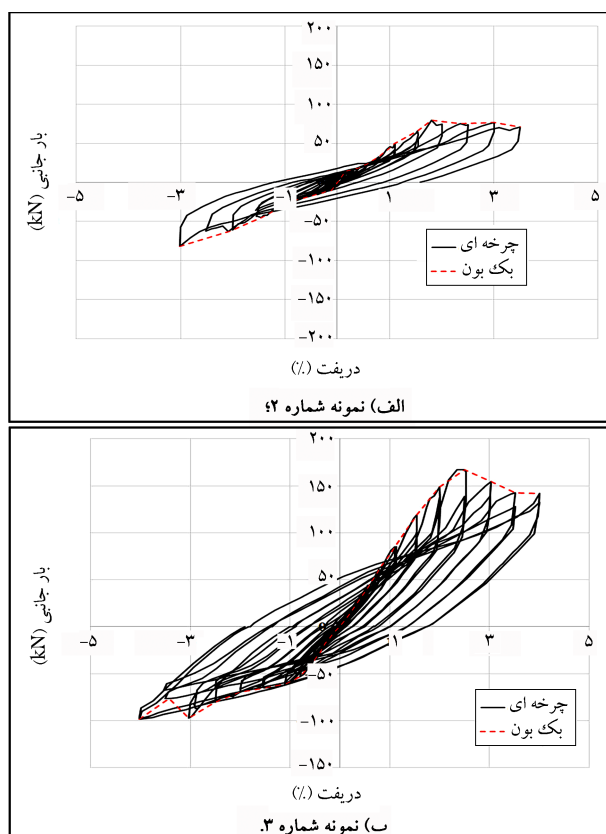
براساس اطلاعات حاصل از آزمایشات انجام شده، نتایج زیر مورد بررسی قرار گرفت.

۱.۳. رفتار چرخه‌ای

نمودار هیستریزس نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

۲.۳. منحنی بک‌بون

منحنی بک‌بون^۹ نمونه‌های شماره ۲ و ۳ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. براساس نتایج، بارگذاری نمونه شاهد (نمونه شماره ۱) تنها تا جابه‌جایی نسبی ۰/۲ درصد ادامه یافت و در این جابه‌جایی نسبی، نمونه دچار خرابی و تغییرمکان زیاد خارج از صفحه شد که به دلیل شدت خرابی امکان ادامه آزمایش پس از این مرحله وجود نداشت. در نمونه شماره ۲ (نمونه تقویت شده با میلگرد بسترا)،



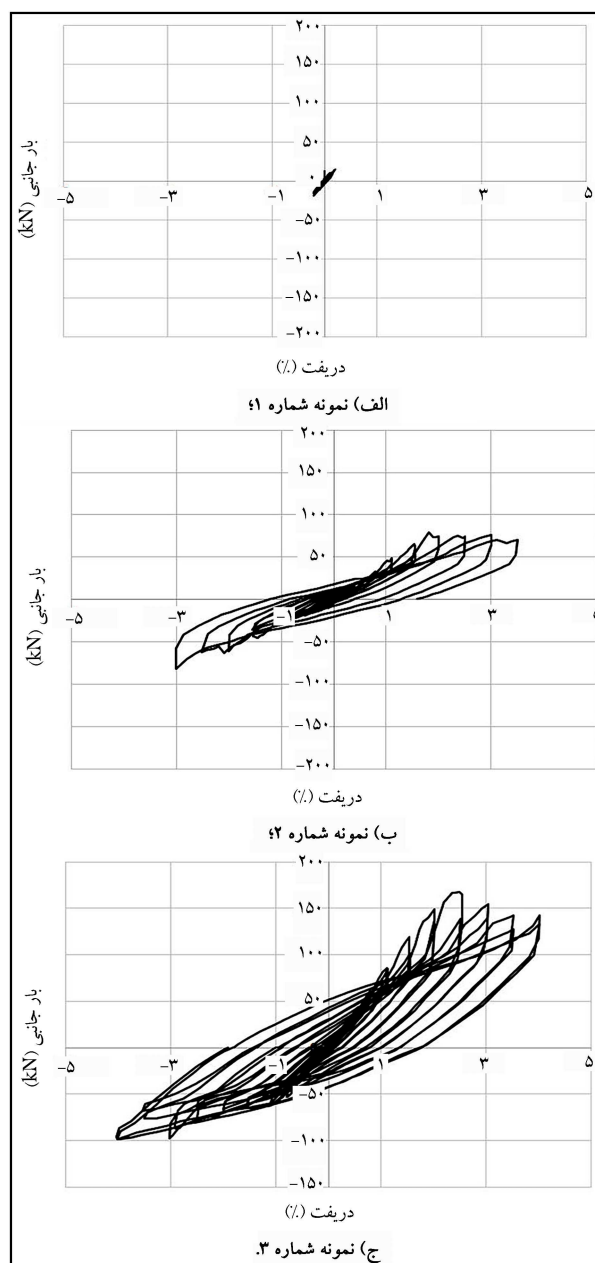
شکل ۱۰. نمودار هیستریزیس.

نسبت به نمونه تقویت شده با میلگرد بستر حدود ۱۵ و ۵۴ درصد افزایش یافته است.

با توجه به نتایج، سختی اولیه نمونه‌ها (قبل از شروع خرابی) بیشتر از سختی سکانتی آن‌ها می‌باشد. همچنین، متوسط سختی اولیه و سختی سکانتی در هنگام کاهش مقاومت نمونه تقویت شده با میلگرد بستر به ترتیب ۳۲۷۲ و ۱۰۶۲ کیلونیوتن بر متر بوده و این مقادیر در نمونه تقویت شده با TRC به ترتیب برابر با ۱۹۶۳ و ۱۶۳۹ کیلونیوتن بر متر می‌باشد. بنابراین، سختی اولیه و سکانتی نمونه تقویت شده با TRC نسبت به نمونه تقویت شده با میلگرد بستر به ترتیب حدود ۶۰٪ و ۵۴٪ برابر می‌باشد.

۳.۳. تغییر مکان خارج از صفحه

تغییر مکان خارج از صفحه نمونه‌ها حاصل میانگین تغییر مکان‌های خارج از صفحه اندازه‌گیری شده توسط دو تغییر مکان‌سنج نصب شده در قسمت میانی نمونه‌ها می‌باشد. بر همین اساس، نمودار تغییر مکان خارج از صفحه-تغییر مکان نسبی نمونه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، حداکثر تغییر مکان خارج از صفحه نمونه شماره ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۳۳/۵ و ۴۷/۴۳ و ۲۹/۱ میلی‌متر می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۱ الف نشان داده شده است، نمونه شماره ۱ در جابه‌جایی نسبی حدود ۱۵٪ درصد دچار تغییر مکان زیاد خارج از صفحه شده و این امر موجب خرابی کلی سازه در همین جابه‌جایی شده که مانع از ادامه آزمایش شد. از طرف دیگر، تغییر مکان خارج از صفحه نمونه‌های شماره ۲ و ۳ در متوسط تغییر مکان نسبی مربوط به کاهش مقاومت به ترتیب ۱۷/۳۲ و ۲۱/۴۵



شکل ۹. نمودار هیستریزیس.

مقاومت حداکثر در بخش منفی در جابه‌جایی نسبی ۱/۸ درصد و با نیروی ۷۹/۳ کیلونیوتن و در بخش مثبت نیز در جابه‌جایی نسبی ۳/۵ درصد با حداکثر نیروی ۸۱/۵ کیلونیوتن رخ داده است. بر همین اساس، متوسط جابه‌جایی نسبی مقاومت حداکثر آن ۲/۴ و متوسط حداکثر نیروی داخل صفحه اعمال شده نیز ۸۵/۴ کیلونیوتن می‌باشد. در نمونه شماره ۳ (نمونه تقویت شده با TRC)، مقاومت حداکثر در بخش منفی در جابه‌جایی نسبی ۳/۵ درصد و با نیروی ۹۷ کیلونیوتن و در بخش مثبت نیز در جابه‌جایی نسبی ۲/۵ درصد با حداکثر نیروی ۱۶۷ کیلونیوتن رخ داده است. بر همین اساس، متوسط تغییر مکان نسبی مربوط به مقاومت حداکثر آن ۲/۷۵ و متوسط حداکثر نیروی داخل صفحه اعمال شده نیز ۱۲۳/۷ کیلونیوتن می‌باشد. بنابراین، متوسط جابه‌جایی نسبی مقاومت حداکثر و حداکثر نیروی داخل صفحه اعمال شده نمونه تقویت شده با TRC



شکل ۱۲. الگوی ترک و خرابی در نمونه شماره ۱ در تغییر مکان نسبی ۰/۱۵ درصد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۳. الف) شکسته شدن جوش بست انتهایی ب) خردشدگی بلوک‌های گوشه.



(ب)

(الف)

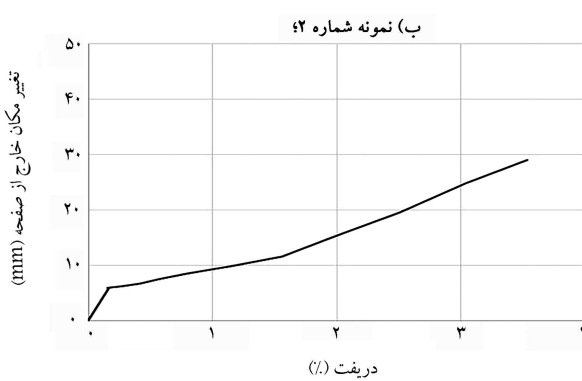
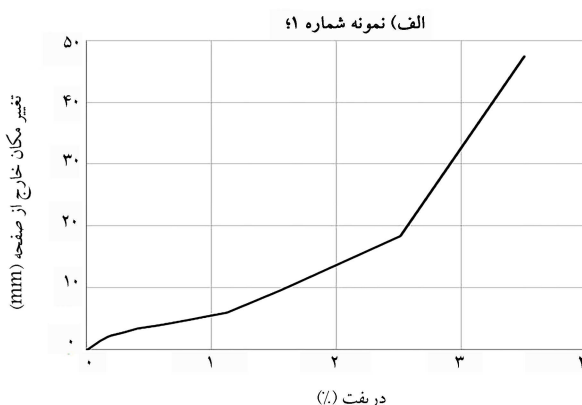
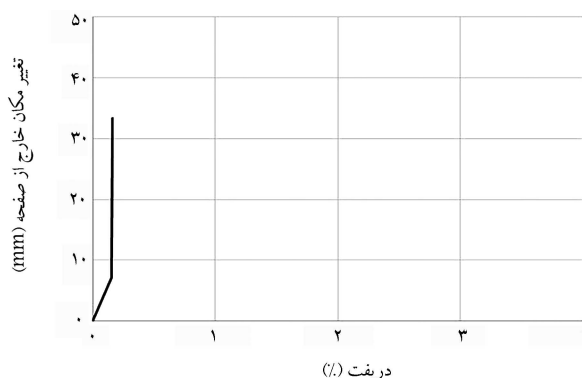


(د)

(ج)

شکل ۱۴. مراحل خرابی نمونه شماره ۳.

۰/۱۵ درصد در جهت رفت، بلندشدگی دیوار از کف اتفاق افتاد. در ادامه، در تغییر مکان نسبی ۱/۱ درصد و نیروی داخل صفحه ۵۰ کیلونیوتن، ترک خوردگی بلوک گوشه چپ بالای دیوار مشاهده شد. سپس در تغییر مکان نسبی ۱/۵ درصد، جوش بست شاخک‌های انتهایی شکسته شد (شکل ۱۳ الف). در انتها، در تغییر مکان نسبی ۳ درصد، در جهت برگشت و نیروی داخل صفحه ۷۷ کیلونیوتن، بلوک پایین سمت راست خرد شد (شکل ۱۳).
مراحل خرابی نمونه شماره ۳ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی انجام شده، اولین ترک‌های مویی در ملات از تغییر مکان



ج) نمونه شماره ۳.

شکل ۱۱. نمودار تغییر مکان خارج صفحه - تغییر مکان نسبی داخل صفحه.

میلی متر می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که تقویت نمونه با TRC نسبت به نمونه تقویت شده با میلگرد بستر با افزایش مقاومت خارج از صفحه دیوار موجب کاهش حدود ۳۹ درصدی حداکثر تغییر مکان خارج از صفحه دیوار شد و دیوار تقویت شده با مش الیاف تا تغییر مکانی ۲۴ درصد بیش از نمونه تقویت شده با میلگرد دچار افت مقاومت نشد.

۴.۳. الگوی ترک و خرابی

نمونه شماره ۱ (نمونه جداسازی شده بدون تقویت)، در چرخه‌های ابتدایی آزمایش و در جابه‌جایی نسبی ۰/۱۵ درصد و نیروی ۱۹/۳ کیلونیوتن دچار ناپایداری خارج از صفحه و خرابی کلی سازه شد که در شکل ۱۲ نمای کلی نمونه در این جابه‌جایی نسبی نشان داده شده است.
در آزمایش مربوط به نمونه شماره ۲، براساس مشاهدات در تغییر مکان نسبی

درون صفحه ۴ درصد نیز پایداری عمود بر صفحه خود را حفظ می‌کنند. البته میزان جابه‌جایی عمود بر صفحه و کاهش سختی در دو دیوار بسته به روش تسلیح متفاوت است. مساله دیگر، مود خرابی حاکم می‌باشد که در دو روش تسلیح انجام شده با توجه به افزایش ظرفیت قابل توجه کششی دیوار مسلح شده عملاً مود خرابی کششی حاکم نمی‌باشد. در روش‌های تسلیح، عملاً مود خرابی حاکم، خرابی فشاری بلوک می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار لرزه‌ای دیوارهای غیرسازه‌ای تحت اثر اندرکنش بارهای خارج از صفحه و جابه‌جایی‌های داخل صفحه و دو روش مختلف مسلح‌سازی دیوار بررسی و مقایسه شد. بر همین اساس، سه نمونه دیوار تمام مقیاس از جنس بلوک سیمانی سبک که به اندازه یک درصد ارتفاع آن از قاب فولادی جداسازی شد، در آزمایشگاه بخش سازه مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ساخته و آزمایش شد. دیوار شماره ۱ به صورت شاهد و بدون تسلیح و در دیوار شماره ۲ دیوار به منظور تامین پایداری خارج از صفحه با میلگرد بستر مسلح‌سازی شد. نمونه شماره ۳ نیز از دو طرف با استفاده از ملات بتنی مسلح شده با مش الیاف شیشه مسلح شد. عملکرد لرزه‌ای این دیوارها تحت بار خارج صفحه معادل بار زلزله آیین‌نامه و جابه‌جایی نسبی چرخه‌ای داخل صفحه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات در قالب نمودارهای هیستریزیس، منحنی بک‌بون، نمودار تغییر مکان خارج از صفحه - تغییر مکان نسبی و الگوی ترک مورد ارزیابی قرار گرفتند. برخی از مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

۱. دیوارهای غیر سازه‌ای غیر مسلح شدیداً نسبت به اثر توام و سلسه‌وار بارهای لرزه‌ای داخل و خارج از صفحه حساس می‌باشند و به سرعت ناپایدار می‌شوند. در این راستا، دهانه کوچک دیوار یا وجود وال پست و نبشی به تنهایی جهت پایداری خارج از صفحه دیوار به تنهایی کفایت نمی‌کند.
۲. هر دو روش مسلح‌سازی دیوار غیر سازه‌ای، پایداری خارج صفحه دیوار را تا جابه‌جایی نسبی داخل صفحه مجاز آیین‌نامه برآورده نموده‌اند و برای تسلیح دیوار غیر سازه‌ای از کارایی مناسب برخوردار می‌باشند.
۳. روش تسلیح دیوار به وسیله ملات مسلح شده با مش الیاف نسبت به روش تقویت با میلگرد بستر موجب افزایش ۱۵ و ۵۴ درصدی جابه‌جایی نسبی مربوط به کاهش مقاومت دیوار و حداکثر نیروی داخل صفحه شده است.
۴. با افزایش مقاومت خارج از صفحه در نمونه تقویت شده با مش الیاف، حداکثر تغییر مکان خارج از صفحه دیوار نسبت به نمونه تقویت شده با میلگرد بستر، حدود ۳۹ درصد کاهش یافته است. همچنین، تغییر مکانی که دیوار تقویت شده با مش الیاف دچار افت مقاومت شد، نسبت به نمونه تقویت شده با میلگرد، ۲۴ درصد افزایش داشته است. به عبارت دیگر، سختی و شکل‌پذیری دیوار تقویت شده با مش الیافی به میزان قابل توجهی افزایش داشته است.
۵. ترک‌ها و خرابی در نمونه تقویت شده با ملات مسلح شده با الیاف به‌طور چشم‌گیری نسبت به روش تسلیح با میلگرد بستر کاهش یافته است. مجموعه موارد فوق، بیانگر کارایی بیشتر روش تسلیح دیوار با ملات مسلح شده با مش الیاف نسبت به روش میلگرد بستر می‌باشد.

نسبی ۵۶/۰ درصد با نیروی داخل صفحه حدود ۴۰ کیلونیوتن در گوشه‌های دیوار شروع شد (شکل ۱۴الف). در ادامه، در جابه‌جایی نسبی ۲ درصد با نیروی داخل صفحه حدود ۱۰۹ کیلونیوتن، این ترک‌ها عمیق‌تر شدند (شکل ۱۴ب). با ادامه دادن آزمایش، در جابه‌جایی نسبی ۲/۵ درصد و با نیروی داخل صفحه حدود ۱۲۳/۶ کیلونیوتن، خردشدگی در بلوک‌های گوشه‌های دیوار مشاهده شد (شکل ۱۴ج). در نهایت، نمونه به دلیل خردشدگی بیشتر بلوک‌های گوشه دچار کاهش مقاومت شد اما باقی قسمت‌های دیوار بدون ترک و سالم باقی ماند (شکل ۱۴د). با توجه به مشاهدات، این نمونه دارای کمترین ترک و آسیب نسبت به دو نمونه قبلی در تغییر مکان‌های نسبی مشابه می‌باشد.

با توجه به مشاهدات انجام شده، نمونه شاهد که بدون تقویت اجرا شده بود، پیش از اعمال جابه‌جایی داخل صفحه، در برابر بار معادل لرزه‌ای خارج از صفحه آیین‌نامه پایداری کرد. بلافاصله پس از اعمال جابه‌جایی خارج از صفحه و پس از دو دامنه از جابه‌جایی داخل صفحه در چرخه‌های ابتدایی آزمایش و در جابه‌جایی نسبی ۱۵/۰ درصد، نمونه دچار ناپایداری خارج از صفحه و خرابی کلی و ریزش دیوار شد. این مساله نشان می‌دهد که دیوارهای غیر سازه‌ای غیر مسلح شدیداً نسبت به اثر توام و سلسه‌وار بارهای لرزه‌ای داخل و خارج از صفحه حساس می‌باشند و به سرعت ناپایدار می‌شوند. در این آزمایش، ستون‌ها با توجه به دهانه سه متری آن می‌توانند وظیفه وال پست را برای دیوار غیر سازه‌ای بر عهده بگیرند، اما همانطور که مشاهده می‌شود، محدود شدن دهانه دیوار و نگه داشتن دیوار با استفاده از نبشی در اطراف آن در محل اتصال به تیر و ستون به تنهایی موجب پایداری دیوار نمی‌شود. گسیختگی ۱ همچنین، با توجه به نتایج آزمایشات، روش تسلیح TRC از روش میلگرد بستر کاراتر بوده است. در توضیح این امر می‌توان گفت که در راستای قائم، وزن دیوار و وجود ملات کامل در راستای افقی، به باربری دیوار کمک می‌کند و ظرفیت باربری دیوار در این راستا نسبت به راستای افقی بیشتر می‌شود. نکته دیگر این است که قرارگیری الیاف به عنوان عضو کششی در سطح خارجی دیوار در روش TRC موجب می‌شود بازوی خمشی و کارایی آن در مقایسه با میلگرد بستر که در داخل ملات دیوار قرار می‌گیرد، بیشتر شود. همچنین، در صورت تسلیح با میلگرد بستر، به علت راستای افقی تسلیح، در هر ۳ تا ۴ متر طول دیوار، باید یک وال پست قائم اجرا شود که این مساله نیز موجب افزایش هزینه‌های روش میلگرد بستر می‌شود. در حالی که در روش TRC، با توجه به راستای قائم تسلیح، نیازی به اجرای وال پست نمی‌باشد. باید توجه داشت که مطالعه انجام شده، بررسی رفتار لرزه‌ای دیوارهای غیر سازه‌ای می‌باشد. رفتار چنین دیواری از دیوار میانقاب‌ی متفاوت است و برعکس دیوار میانقاب‌ی از چنین دیواری توقع باربری جانبی درون صفحه نمی‌رود. نکته اساسی در این ارزیابی دو مساله زیر است:

- آیا بارگذاری چرخه‌ای درون صفحه موجب کاهش سختی و مقاومت و میزان باربری دیوار در جهت عمود بر صفحه می‌گردد؟
- در جابه‌جایی‌های بیشتر از ۱ درصد، آیا دیوار غیر سازه‌ای می‌تواند موجب افزایش ظرفیت قاب گردد یا خیر.

همانطور که مشاهده می‌شود، دیوار غیر مسلح تحت اثر بار عمود بر صفحه که بار ناشی از اینرسی دیوار در زلزله می‌باشد و جابه‌جایی نسبی درون صفحه قاب پس از چند سیکل و در دامنه بسیار کوچک، ظرفیت باربری عمود بر صفحه خود را از دست می‌دهد و فرو می‌ریزد. در حالی که دو دیوار دیگر تا جابه‌جایی نسبی

پانوشتها

1. Fiber Reinforced Polymers (FRP)
2. Textile Reinforced Concrete (TRC)
3. Textile Reinforced Mortar (TRM)
4. Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)
5. Inorganic Matrix Grid (IMG)
6. Manually
7. Sprayed
8. Multifilament
9. Backbone Curve

منابع (References)

1. Shabdin, M., Attari, N.K.A. and Zargaran, M., 2019. Experimental study on seismic behavior of unreinforced masonry (URM) brick walls strengthened in the boundaries with shotcrete experimental study on seismic behavior of unreinforced masonry (URM) brick walls strengthened in the boundaries. *J Earthq Eng*, 25(1), 00, pp.1-27. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1577763>.
2. Asadzadeh, S.A., Mohammadi, M., Attari, N.K.A. and Alireza, S., 2020. An experimental study on finding prequalified connectors between the wall and steel frame infilled with autoclave-cured aerated concrete blocks. *J Earthq Eng*, 26(2), 1-20 <https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1822231>.
3. Asadzadeh, S.A., Mohammadi, M., Attari, N.K.A. and Zareei, S.A., 2020. An experimental study on the effect of frame-to-wall connection type on the seismic behavior of steel frames infilled with autoclave-cured aerated concrete blocks. *Adv Struct Eng*, 23, pp.642-56. <https://doi.org/10.1177/1369433219877789>.
4. Jasinski, R., 2019. Research on the influence of bed joint reinforcement on strength and deformability of masonry shear walls. *Materials*, 2543(12). <https://doi.org/10.3390/ma12162543>.
5. Appendix No.6 of Standard No. 2800 Seismic Design and Construction of Architectural Nonstructural Elements, Iranian Building Codes and Standards, Tehran, Iran (2019).
6. Instruction of Structure Design and Requirement of Cladding of Buildings (No. 714) Plan and Budget Organization, Tehran, Iran (2022).
7. ACI 530-11., 2011. Building code requirements and specification for masonry structures, American Concrete Institute.
8. Eurocode 6., 2006. Design of masonry structures, British Standard.
9. Azadvar, N., Zargaran, M., Rofooei, F.R., Attari, N.K.A., 2021. Experimental comparison of cyclic behavior of RC columns strengthened with TRC and FRP. *Bull Earthq Eng*, 19, pp.2941-70. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-021-01092-2>.
10. Azadvar, N., Zargaran, M., Rahimzadeh Rofooei, F. and K.A.Attari, N., 2021. Numerical investigation of the effect of cross section shape, mortar strength and number of textile layers on cyclic behavior of RC columns. *Civ Eng Sharif*, 2, pp.105-15. <https://doi.org/10.24200/j30.2021.57462.2911>.
11. Martins, A., Vasconcelos, G., Fangueiro, R. and Cunha, F., 2015. Experimental assessment of an innovative strengthening material for brick masonry infills. *Composites Part B*, 80, pp.328-342. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.012>.
12. Bernat-Maso, E., Gil, L. and Roca, P., 2015. Numerical analysis of the load-bearing capacity of brick masonry walls strengthened with textile reinforced mortar and subjected to eccentric compressive loading. *Engineering Structures*, 91, (Supplement C), pp.96-111. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.02.032>.
13. Bernat, E., Gil, L., Roca, P. and Escrig, C., 2013. Experimental and analytical study of TRM strengthened brickwork walls under eccentric compressive loading. *Construction and Building Materials*, 44, pp.35-47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.006>.
14. Babaeidarabad, S., Arboleda, D., Loreto, G. and Nanni, A., 2014. Shear strengthening of un-reinforced concrete masonry walls with fabric-reinforced-cementitious-matrix. *Construction and Building Materials*, 65, pp.243-253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.116>.
15. Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C., Karlos, K., Papathanasiou, M., 2007. Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: In-plane cyclic loading. *Materials and Structures*, 40, pp.1081-1097. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-006-9207-8>.
16. Triantafillou, T.C., Papanicolaou, C.G., Panagiotis Zissimopoulos, P. and Laourdekis, T., 2006. Concrete confinement with textile-reinforced mortar jackets. *ACI Struct J*, 103, pp.28-37.
17. Ombres, L., 2007. Confinement effectiveness in concrete strengthened with fiber reinforced cement based composite jackets. FRPCS-8. Patras, Greece.
18. De Caso y Basalo, F.J., Matta, F. and Nanni, A., 2009. Fiber Reinforced Cementitious Matrix Composites for Infrastructure Rehabilitation. Proc Compos Poly, Tampa, FL, L, (USA).
19. Colajanni, P., De Domenico, F., Maugeri, N., Recupero, A., Spinella, N. and Mantegazza, G., 2012. Experimental results of RC columns strengthened with fiber reinforced cementitious mortars. In: *3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting*. Cape Town, South Africa.
20. Thi-Loan Bui., Si Larbi, A., Reboul, N. and Ferrier, E., 2015. Shear behaviour of masonry walls strengthened by external bonded FRP and TRC. *Composite Structures*, 132, pp.923-932. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.057>.
21. ASTM C1314-07., 2009. American Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, American Standard Test Method, West Conshohocken, PA, USA.
22. ASTM E519/E519M-10., 2009. American Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, American Standard Test Method, West Conshohocken, PA, USA (2009).

23. ASTM E2098 / E2098M - 13., 2018. American Standard Test Method for Determining Tensile Breaking Strength of Glass Fiber Reinforcing Mesh for Use in Class PB Exterior Insulation and Finish Systems (EIFS), after Exposure to a Sodium Hydroxide Solution., American Standard Test Method, west conshohocken, PA, USA.
24. ASTM C109 / C109M-20b., 2020. American Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). American Standard Test Method, West Conshohocken, PA, USA.
25. ASTM A951/A951M-16e1., 2016. American Standard Specification for Steel Wire for Masonry Joint Reinforcement., American Standard Test Method. East Conshohocken, PA, USA.
26. Shabdin, M., Zargaran, M. and Attari Nader, K.A., 2018. Experimental Diagonal Tension (shear) Test of Un-Reinforced Masonry (URM) Walls Strengthened with Textile Reinforced Mortar (TRM). *Construction and Building Materials*, 164, pp.704-715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.234>.
27. ASCE/SEI standard 7-21., 2021. Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE/SEI, Reston, Virginia, USA.