

Investigation of out-of-plane behavior of non-bearing masonry walls reinforced with cement matrix and fiber

S. Ali Razavi^{1*}, Ali Hajiakbari², Mohammad Chakahfar³, Mehdi Mousavi⁴

1- Assistant Professor, Faculty of Technology & Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran

2- M.Sc. in Civil Engineering – Structure, University of Science and Culture, Tehran, Iran

3- PhD Student in Civil Engineering – Structure, University of Science and Culture, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak University, Iran

ABSTRACT

Infill masonry walls, commonly used as non-structural components in buildings, are highly vulnerable to out-of-plane forces induced by earthquakes. Traditional retrofitting methods, such as the use of steel walers, often face challenges including implementation difficulties, increased structural weight, and architectural incompatibility. This study investigates the out-of-plane seismic performance of non-structural masonry walls using two novel reinforcement techniques: external vertical mesh reinforcement and bed-joint reinforcement with carbon fiber fabrics (FRCM systems). To this end, nine half-scale wall specimens were constructed in three groups control, externally reinforced, and bed-joint reinforced—and tested under cyclic out-of-plane loading using a hydraulic actuator. Evaluated parameters included flexural capacity, initial stiffness, ductility, and response modification factor. Experimental results showed that external vertical mesh reinforcement led to approximately a 324% increase in flexural capacity, while the bed-joint reinforcement method resulted in a 305% improvement compared to the control group. Initial stiffness increased by about 700% and 200% respectively for the two methods, along with notable improvements in ductility and energy dissipation capacity. The comparable seismic performance of the two techniques highlights the practical advantages and reduced technical constraints of the bed-joint method. Overall, the findings suggest that FRCM systems particularly the bed-joint approach offer an effective, lightweight, and practical solution for seismic retrofitting of non-structural masonry walls without adding significant weight or construction complexity.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.539686.3794

*Corresponding author: SeyedAli Razavi Tabatabaei

Email address: arazavi@usc.ac.ir

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 August 2025

Revise Date: 30 August 2025

Accept Date: 06 September 2025

Keywords:

Infill Masonry Wall
Seismic Retrofitting
Fiber-Reinforced Cementitious
Matrix (FRCM)
bed-joint mesh
Cement-based Plaster

بررسی رفتار لرزهای خارج صفحه دیوارهای بنایی غیر باربر مسلح شده توسط کامپوزیت سیمانی الیافدار

سید علی رضوی طباطبایی^{۱*}، علی حاجی اکبری^۲، محمد چکاه فر^۳، سید مهدی موسوی^۴

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد عمران سازه، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک، ایران

چکیده

دیوارهای میان‌قابی بنایی، به‌عنوان عناصر غیرسازه‌ای در بسیاری از ساختمان‌ها، در برابر نیروهای خارج از صفحه ناشی از زلزله بسیار آسیب‌پذیر هستند. روش‌های سنتی مقاوم‌سازی، مانند استفاده از وال‌پست با چالش‌هایی نظیر دشواری اجرا، افزایش وزن و تداخل با معماری مواجه‌اند. در این پژوهش، عملکرد خارج صفحه دیوارهای بنایی غیرسازه‌ای تحت بارگذاری چرخه‌ای، با استفاده از دو تکنیک نوین مقاوم‌سازی شامل تسلیح خارجی با مش قائم و تسلیح میان‌رجی با منسوجات فیبرکربنی (FRCM) بررسی شد. برای این منظور، ۹ نمونه دیوار بنایی در سه گروه شاهد، تقویت‌شده با مش قائم و تقویت‌شده میان‌رجی ساخته شده و تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج صفحه قرار گرفتند. پارامترهای مورد ارزیابی شامل ظرفیت خمشی، سختی اولیه، شکل‌پذیری و ضریب رفتار غیرخطی بودند. نتایج نشان داد که تقویت با مش قائم خارجی منجر به افزایش حدود ۳۲۴ درصدی، و روش میان‌رجی حدود ۳۰۵ درصدی در ظرفیت خمشی نسبت به نمونه‌های شاهد شده‌اند. همچنین، سختی اولیه در روش‌های مذکور به ترتیب حدود ۷ و ۱۰ برابر افزایش یافته و ضریب رفتار و شکل‌پذیری نیز بهبود یافته است. اختلاف ناچیز بین عملکرد این دو روش، مزایای اجرایی و کاهش محدودیت‌های فنی در روش میان‌رجی را برجسته می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از سامانه‌های FRCM، به‌ویژه در حالت میان‌رجی، می‌تواند راهکاری مؤثر، سبک، و قابل‌اجرا باشد.

کلمات کلیدی: دیوار بنایی میان‌قابی، مقاوم‌سازی لرزهای، کامپوزیت سیمانی الیاف، مش میان‌رجی، پلاستر سیمانی

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: 10.22065/jsce.2025.539686.3794	۱۴۰۴/۰۵/۱۵	۱۴۰۴/۰۶/۰۸	۱۴۰۴/۰۶/۱۵	۱۴۰۴/۰۶/۱۵	۱۴۰۵/۰۱/۳۱
10.22065/jsce.2025.539686.3794	سید علی رضوی طباطبایی arazavi@usc.ac.ir				
*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:					

۱- مقدمه

تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که یکی از آسیب پذیرترین اجزای ساختمان‌ها، دیوارهای بنایی میان‌قابی غیرسازه‌ای هستند. این دیوارها که عمدتاً برای جداسازی فضا و نه تحمل بارهای سازه‌ای اجرا می‌شوند، تحت تأثیر نیروهای جانبی ناشی از زمین‌لرزه، به‌ویژه در راستای خارج از صفحه، مستعد ایجاد مکانیسم‌های شکست ناگهانی و فروریزش می‌باشند. وقوع چنین شکست‌هایی نه تنها ایمنی ساکنین را به‌طور جدی تهدید می‌کند، بلکه باعث ایجاد خسارات اقتصادی فراوان می‌شود. اهمیت بررسی و کنترل رفتار لرزه‌ای این دیوارها موجب شده است که رویکردهای نوین مقاوم‌سازی در طراحی و اجرای ساختمان‌ها بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد [۱].

بررسی رفتار دیوارهای غیر باربر در زلزله‌ها نشان می‌دهد که بی‌توجهی به مشخصات اجرایی، کیفیت مصالح و طراحی لرزه‌ای این عناصر می‌تواند منجر به تخریب جدی شود. مهندسی سازه معمولاً دیوارهای پرکننده را به‌عنوان عناصر غیرسازه‌ای در نظر می‌گیرند و تنها جرم آن‌ها را در محاسبات لحاظ می‌کنند، درحالی‌که این دیوارها بسته به جزئیات اجرا می‌توانند نقش عمده‌ای در سختی، مقاومت و رفتار کلی سازه ایفا کنند. از سوی دیگر، معماران نیز مشخصات دیوار را اغلب بدون در نظر گرفتن عملکرد لرزه‌ای آن تعیین می‌کنند. این مسئله نشان‌دهنده ضرورت بازنگری در دیدگاه طراحی و اجرای دیوارهای بنایی است [۲].

در حال حاضر، یکی از روش‌های متداول برای مهار لرزه‌ای دیوارهای غیرسازه‌ای، استفاده از وال‌پست‌های قائم و افقی است. این روش اگرچه در برخی موارد مؤثر بوده؛ اما دارای معایب متعددی، از جمله افزایش وزن سازه، دشواری در اجرا، نیاز به نیروی کار بیشتر و افزایش زمان ساخت می‌باشد. علاوه بر آن، اتصال مناسب این وادارها به اجزای سازه‌ای و کنترل جزئیات اجرایی، خود به چالشی اساسی در کارگاه‌های ساختمانی بدل شده است. بنابراین، نیاز به یافتن روشی نوین، سبک و سریع‌الاجرا با عملکرد لرزه‌ای قابل اعتماد، همواره از دغدغه‌های اصلی مهندسی طراح و مجریان پروژه‌ها بوده است [۳].

یکی از فناوری‌های نوظهور در این زمینه، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی تقویت‌شده با فیبر (FRCM)^۱ است. این سیستم شامل اجرای یک مش بافته‌شده از الیاف شیشه یا کربن بر روی سطح دیوار و پوشاندن آن با یک لایه نازک ملات یا پلاستر معدنی می‌باشد. ترکیب حاصل، کامپوزیتی مقاوم و سبک ایجاد می‌کند که نه تنها به‌سادگی قابل اجراست، بلکه موجب بهبود قابل توجه در رفتار لرزه‌ای دیوار در برابر نیروهای خارج از صفحه نیز می‌گردد. ویژگی‌هایی مانند عدم نیاز به وادارهای فلزی، حذف میلگرد بستر، کاهش زمان و هزینه اجرا و قابلیت هم‌پوشانی با معماری داخلی، این روش را به گزینه‌ای مطلوب در پروژه‌های مقاوم‌سازی تبدیل کرده است. مبنای طراحی این سیستم در ACI 549 ارائه شده و مطالعات آزمایشگاهی متعددی نیز کارایی آن را اثبات کرده‌اند [۴]. با این حال، اجرای روش FRCM نیز با چالش‌هایی همراه است. مهم‌ترین آن، عدم امکان اجرای دوطرفه وال‌مش در مجاورت دیوارهای همسایه به‌علت نبود یا تنگی درز انقطاع می‌باشد. این مشکل در بسیاری از ساختمان‌ها مشاهده شده و آیین‌نامه ۲۸۰۰ نیز در ویرایش چهارم خود راهکار مشخصی برای آن ارائه نکرده است. روش‌هایی مانند استفاده از فول‌مش، پوشاندن کل سطح دیوار با الیاف و پلاستر یا اسپایک، عبور مش و پلاستر توسط ایجاد حفره در دیوار و اعمال آن در آن سمت دیوار، در این مناطق به‌طور تجربی اجرا شده‌اند؛ اما از لحاظ عملکرد لرزه‌ای، هنوز تحلیل و ارزیابی علمی دقیقی برای آن‌ها صورت نگرفته است. این خلأ، ضرورت بررسی عملکرد دیوارهایی که تنها از یک طرف مقاوم‌سازی شده‌اند را دوچندان می‌کند.

در پژوهش حاضر، با هدف پاسخ به همین نیاز، عملکرد لرزه‌ای خارج صفحه دیوارهای بنایی غیرسازه‌ای که با سیستم FRCM و به‌صورت میان‌رجی از یک طرف تقویت شده‌اند، مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، از الیاف و پلاستر در میان رج‌های بلوک‌ها استفاده می‌شود تا باعث ایجاد پیوستگی میان رج و بلوک و همچنین افزایش چسبندگی میان آن‌ها شود. همچنین با استفاده از این روش، الزام دسترسی به دو سمت دیوار برای اجرا رفع شده و در نواحی مجاورت با دیوار همسایه یا در جایی که دسترسی به پشت دیوار غیر ممکن است، قابل استفاده می‌باشد.

^۱ Fiber Reinforced Cement Composites

در این راستا، پس از مرور منابع و مطالعات پیشین، نمونه‌هایی با انواع روش‌های تقویت ساخته و تحت آزمایش‌های چرخه‌ای خارج صفحه قرار گرفته‌اند. سپس، نتایج به دست آمده از نظر مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و سایر پارامترهای رفتاری تحلیل و ارزیابی شده‌اند. هدف نهایی این تحقیق، ارائه روشی اجرایی و قابل اتکا برای ساخت و مقاوم‌سازی یک‌طرفه دیوارهای بنایی غیر باربر با استفاده از FRCM، در شرایطی است که محدودیت‌های اجرایی در پروژه‌های واقعی وجود دارد.

۲- بررسی پژوهش‌های مرتبط

در سال‌های اخیر، تحقیقات متعددی با هدف مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در برابر نیروهای زلزله به ویژه بارهای خارج از صفحه صورت گرفته است. این مطالعات که گاه به صورت تحلیلی و گاه با روش‌های آزمایشگاهی انجام شده‌اند، به بررسی مکانیزم‌های شکست، رفتار لرزه‌ای و تأثیر مصالح تقویتی مختلف پرداخته‌اند. محققان در این مسیر، از مصالحی نظیر پلیمرهای مسلح، شبکه‌های GFRP و PBO، سامانه‌های TRM و نیز فناوری‌های نوینی چون FRCM بهره برده‌اند تا بتوانند ضمن ارتقای ظرفیت خمشی و مقاومت دیوار، جزئیات اجرای مناسبی نیز برای کاربرد عملی در پروژه‌های عمرانی ارائه دهند. برای مثال، هوجدیس و کرایوسکی^۲ (۲۰۲۱) با آزمایش مقاومت کششی مستقیم بر روی شش سیستم مختلف FRCM، نتایجی با تنش شکست تا ۱۳۲۹ نیوتن بر میلی‌متر مربع گزارش کردند [۶]. در ادامه، در رسی^۳ و همکاران (۲۰۲۰) با آزمایش بارگذاری شبه‌استاتیک روی دیوارهای بنایی درون قاب‌های بتن مسلح، نشان دادند که استفاده از TRM می‌تواند سختی اولیه دیوار را تا ۵/۳ برابر افزایش داده و مقاومت نهایی خارج صفحه را تا حدود ۷۸ درصد بهبود بخشد [۷]. در مطالعه‌ای دیگر، حراجیلی^۴ و همکاران (۲۰۱۰) افزایش ظرفیت خمشی و جابجایی خارج از صفحه دیوارهای تقویت شده با FRCM را مستقل از نوع مصالح دیواری (بلوک توخالی، آجر و ماسه‌سنگ) اثبات کردند [۸]. بلینی^۵ و همکاران (۲۰۱۸) با اعمال بار خارج صفحه بر دیوار کامل بنایی تقویت شده با FRCM، از جلوگیری تشکیل لولای خمشی مرکزی و بهبود توزیع تنش خبر دادند [۹]. ترکمن^۶ و همکاران (۲۰۲۱) در بررسی استفاده از CFRP در میان رج‌های آجر، ظرفیت خمشی دیوار را تا ۱۳۳ درصد نسبت به نمونه‌های بدون تقویت افزایش دادند [۱۰]. همچنین، سیستی^۷ و همکاران (۲۰۱۶) در تقویت تیرهای بنایی با شبکه‌های GFRP و PBO به این نتیجه رسیدند که GFRP عملکرد بهتری در باربری و پیوند با ملات دارد [۱۱]. در نهایت، بوری^۸ و همکاران (۲۰۰۸) با آزمایش بر روی تیرهای بنایی تقویت شده با SRG و GFRP، افزایش بار نهایی در بارگذاری‌های خمشی و برشی را گزارش کردند [۱۲]. این مطالعات در مجموع، پایه نظری مستحکمی برای توسعه روش‌های نوین مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی فراهم کرده‌اند و خلأهایی چون اجرای یک‌طرفه، محدودیت فضای همسایگی یا کارایی میان‌رجی را به خوبی برجسته کرده‌اند. پژوهش حاضر نیز با هدف پر کردن بخشی از این خلأ و ارائه راهکار اجرایی ساده‌سازی شده بر مبنای تقویت میان‌رجی با FRCM، به بررسی رفتار لرزه‌ای خارج صفحه دیوارهای بنایی می‌پردازد.

۳- تنظیمات آزمایش

به منظور شبیه‌سازی رفتار واقعی لرزه‌ای دیوارهای بنایی در برابر نیروهای خارج از صفحه، از یک سامانه آزمایشگاهی با قابلیت اعمال نیروی چرخه‌ای استفاده شد؛ از این رو آزمایشگاه سازه دانشگاه علم و فرهنگ جهت پیشبرد و انجام این آزمایشات برگزیده شد. هدف اصلی از طراحی این آزمایش، بررسی عملکرد دیوار تحت جابه‌جایی‌های رفت و برگشتی در شرایط مشابه با بارگذاری زلزله است. برای این منظور، دیوارها تحت بارگذاری به صورت تغییر مکان-کنترل توسط جک هیدرولیکی با توان اعمال بار ۶۰ تنی و با ضریب خطای ۱:۳۰۰۰ قرار گرفتند و ادامه آزمایش تا زمانی انجام شد که منحنی نیرو-جابجایی نمونه دچار افت ۸۰ درصدی مقاومت نسبت به نقطه اوج خود شود. این رویکرد، امکان ارزیابی دقیق‌تری از شکل‌پذیری، سختی و دوام نمونه‌ها را در شرایط بحرانی فراهم می‌کند. همچنین در این مطالعه، از مقیاس کردن واحدهای بنایی و بلوک‌ها صرف نظر شده و نمونه‌ها با ابعاد واقعی یک دیوار میان‌نقاب متداول مورد استفاده قرار نگرفته‌اند؛ با این حال، جهت

² Hojdys & Krajewski

³ De Risi

⁴ Harajli

⁵ Bellini

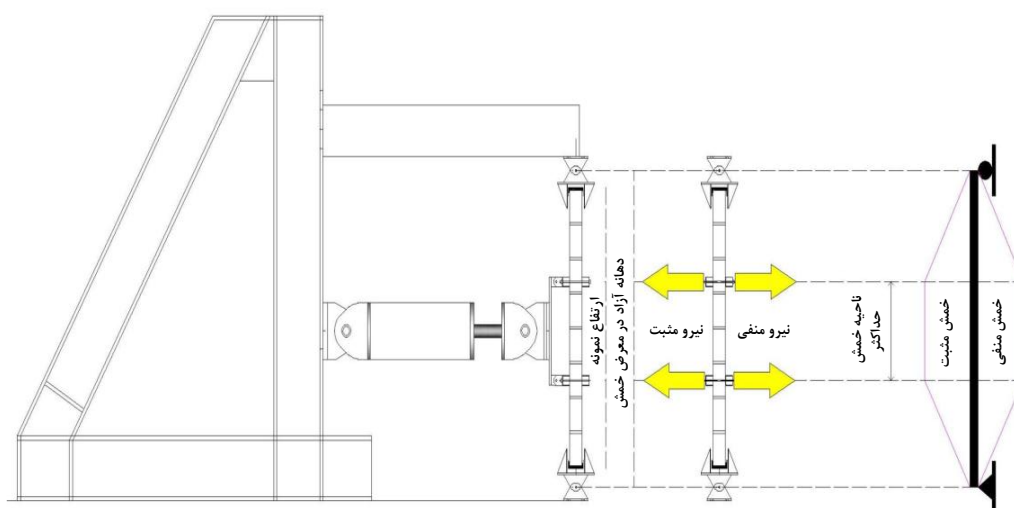
⁶ Türkmen

⁷ Sisti

⁸ Borri

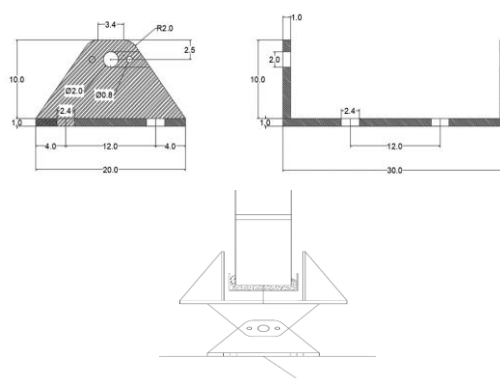
ارزیابی رفتار مصالح، روندی مقایسه‌ای با نمونه‌های شاهد در نظر گرفته شده است. عدم مقیاس کردن می‌تواند منجر به بروز تفاوت‌هایی در رفتار غیرخطی مصالح شود، از جمله تغییر در نحوه گسترش ترک‌ها، مقاومت نهایی، سختی اولیه، و نحوه تسلیم مصالح. در مقیاس‌های کوچک‌تر، نسبت سطح به حجم، نحوه توزیع تنش‌ها، و اثرات اتصال بین اجزا ممکن است متفاوت باشد که این عوامل می‌توانند بر نتایج نهایی تأثیرگذار باشند. با در نظر گرفتن نمونه‌های شاهد، تلاش شده است تا این اثرات به صورت نسبی کنترل و تحلیل شوند. در این تحقیق رفتار خارج‌صفحه دیوارها بررسی شده، اما رفتار درون‌صفحه مورد ارزیابی قرار نگرفته است. این رفتار شامل مقاومت برشی، سختی جانبی و ظرفیت جذب انرژی در برابر بارهای افقی است. عدم بررسی آن می‌تواند منجر به تحلیل ناقص عملکرد واقعی دیوار در شرایط لرزه‌ای شود. تعامل بین رفتارهای درون‌صفحه و خارج‌صفحه در تعیین مکانیزم شکست و پاسخ کلی دیوار میانقاب مؤثر است.

در این سامانه، از یک سیستم قاب صلب برای ایجاد شرایط مهاری بهره‌گیری شده است. دو تکیه‌گاه مفصلی در بالا و پایین دیوار تعبیه شده‌اند تا تحلیل نیروهای وارد بر دیوار ساده‌تر صورت گیرد. اتصال تکیه‌گاه‌ها به قاب، در بالا توسط یک تیر به طول ۲۱۰ سانتی‌متر و در پایین مستقیماً بر روی بال ریل آزمایشگاه انجام شده است. موقعیت تکیه‌گاه‌ها به گونه‌ای تعیین شده که فاصله افقی آن‌ها از محل اتصال جک به ترتیب برابر با ۲۰۷ سانتی‌متر باشد. برای فراهم‌سازی رفتار مفصلی، از فک‌هایی با طول ۲۰ و عرض ۳۰ سانتی‌متر استفاده شده که دارای زبانه‌های دوزنقه‌ای با سوراخ‌هایی به قطر ۲/۵ سانتی‌متر هستند. اتصال پین به قطر ۲ سانتی‌متر بین این زبانه‌ها و صفحه دیوار، امکان چرخش نسبی و رفتار مفصلی را فراهم کرده است.



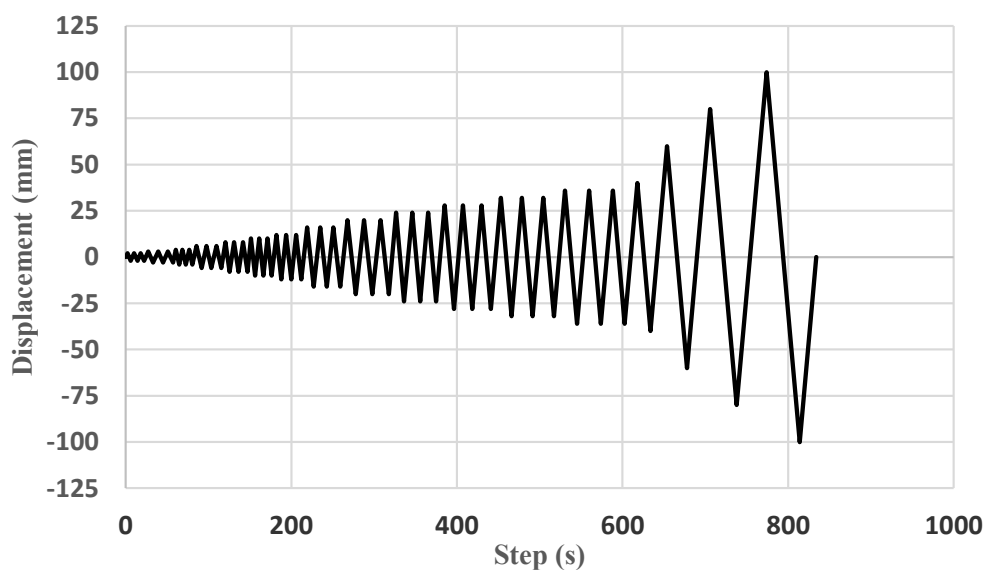
شکل ۱: شماتیک کلی سامانه آزمایش شامل تکیه‌گاه‌های مفصلی، دیوار تحت آزمایش و محل قرارگیری جک هیدرولیکی

برای جای‌گیری صحیح نمونه‌ها، نشیمنگاه‌هایی با عرض ۶۰ سانتی‌متر ساخته شد که درون آن‌ها فاصله‌ای به عرض ۱۴/۲ و ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر برای قرارگیری دیوارها تعبیه شده بود. ضخامت نمونه‌ها برابر ۱۲ سانتی‌متر در نظر گرفته شده و به منظور سهولت در نصب، ۲/۲ سانتی‌متر بادخور نیز در طراحی لحاظ گردید. این فضای خالی با استفاده از تخته‌های چوبی در هنگام نصب پر شد. برای اعمال نیروی چرخه‌ای، بازوهای از جنس قوطی‌های فولادی به ابعاد ۶۰×۶۰ میلی‌متر و طول ۱ متر در یک‌سوم ابتدا و انتهای دیوار نصب شد. محل اتصال این بازوها به گونه‌ای انتخاب شد که بر روی ملات رجاها قرار نگیرند و هم‌زمان، توزیع یکنواخت نیرو را فراهم کنند. در سمت مقابل دیوار نیز بازوهای مشابه به کار گرفته شد که با استفاده از رادهای فولادی، به یکدیگر متصل شده و مسیر بارگذاری رفت‌وبرگشتی را ایجاد کردند.



شکل ۲: نحوه قرارگیری دیوار در ست آپ آزمایش و ایجاد اتصال مفصلی در بالا و پایین دیوار

پروتکل بارگذاری بر اساس آیین نامه AC434-24 تنظیم شده است. مطابق با این استاندارد، برای هر سطح جابه جایی مشخص، باید سه سیکل کامل بارگذاری رفت و برگشت اجرا گردد. این آیین نامه سرعت ثابتی برای بارگذاری مشخص نمی کند، از این رو در آزمایش حاضر، سرعت اعمال جابه جایی متناسب با میزان حرکت انتخاب شد. حداکثر سرعت بارگذاری برابر با 0.3 میلی متر بر ثانیه تعیین گردید که این مقدار از آزمایش اولیه جک هیدرولیکی و عملکرد آن استخراج شده است. این سرعت به عنوان حد نهایی توان دستگاه در دستیابی به مقادیر نهایی جابه جایی در پروتکل انتخاب شد تا ضمن رعایت الزامات فنی، شرایط ایمن برای نمونه ها و تجهیزات حفظ شود.



شکل ۳: پروتکل بارگذاری

۳-۱- مشخصات نمونه ها و مصالح مورد استفاده در آزمایش

با توجه به قاب های متداول دیوارهای خارجی و همچنین تحقیقات انجام شده در این زمینه، جهت شبیه سازی دقیق تر شرایط واقعی، نمونه ها با مقیاس ۱ به ۲ طراحی و ساخته شده اند. این مقیاس امکان رعایت تناسب هندسی با نمونه های اجرایی واقعی را فراهم کرده و از سوی دیگر با مطالعات آزمایشگاهی مشابه نیز همخوانی دارد. ابعاد در نظر گرفته شده برای هر نمونه عبارتند از: عرض ۸۰ سانتی متر، ارتفاع ۱۶۰ سانتی متر و ضخامت ۱۰ سانتی متر که متناظر با ابعاد واقعی ۱۶۰ سانتی متر عرض، ۳۲۰ سانتی متر ارتفاع و ۲۰ سانتی متر ضخامت می باشد. جزئیات نمونه های آزمایش و روش مسلح سازی آن در جدول ۱ ارائه شده است؛

جدول ۱: مشخصات نمونه های آزمایش

شماره ترتیب آزمایش	نام	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	نوع بلوک	نوع ملات	نوع تسلیح
۱	URMV-1	۸۰	۱۷۲	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	ندارد
۲	URMV-2	۸۰	۱۷۰	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	ندارد
۳	URMV-3	۸۰	۱۷۰	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	ندارد
۴	EBRV-1	۸۰	۱۷۲	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	FRCM
۵	EBRV-2	۸۰	۱۷۳	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	۱ لایه- مش
۶	EBRV-3	۸۰	۱۷۳	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	قائم خارجی
۷	BJMV-1	۸۰	۱۶۵	سیمانی	پلاستر سیمانی-	FRCM
۸	BJMV-2	۸۰	۱۶۶	سیمانی	نسبت آب به پلاستر ۱	۲ لایه- مش
۹	BJMV-3	۸۰	۱۶۵	سیمانی	نسبت آب به پلاستر ۱	در بند بستر

جهت بررسی رفتار خارج از صفحه در حالت خمش قائم، ۹ نمونه متشکل از بلوک های سیمانی با ارتفاع ۱۶۰ سانتی متر و عرض ۸۰ سانتی متر ساخته شد. برای شروع ساخت، ناودانی هایی به ضخامت ۲ میلی متر و عرض ۱۲۰ میلی متر در بالا و پایین هر دیوار نصب شدند تا بستری مناسب برای چیدمان بلوک ها و تراز نمونه ها فراهم گردد. زیر ناودانی های تحتانی، قوطی هایی به ابعاد ۴۰×۴۰ میلی متر و طول ۳۰ سانتی متر جهت ایجاد سطح تراز و جای دست برای حمل و نقل تعبیه شد. اجرای دیوار در ۸ رج متوالی با بلوک هایی به ارتفاع ۲۰ سانتی متر انجام شده که با در نظر گیری ضخامت ملات، ارتفاع نهایی دیوار بین ۱۷۰ تا ۱۷۵ سانتی متر محاسبه گردید.



شکل ۴: نحوه ساخت رج های بلوکی و جانمایی ناودانی های فوقانی و تحتانی

در بخش فوقانی دیوار، به منظور اطمینان از اتصال مناسب با ناودانی، یک لایه ملات با ضخامت ۳ تا ۴ سانتی متر اجرا گردید. همچنین، با استفاده از یونولیت های چسبانده شده به لبه ناودانی، از ریزش ملات جلوگیری شد. پس از نصب کامل ناودانی ها، جهت جلوگیری از ایجاد آسیب در حین حمل و نقل، دو ناودانی فوقانی و تحتانی با استفاده از پیچ متری به قطر ۸ میلی متر به یکدیگر متصل شده اند. این پیچ های بلند با اعمال پیش تنیدگی ملایم، دیوار را تحت فشار جزئی قرار داده اند تا بندهای بستر تحت کشش ناخواسته قرار نگیرند.



شکل ۵: بلوک چینی نمونه های قائم



شکل ۶: نحوه نصب ناودانی های فوقانی

در این بخش از آزمایش، نمونه‌ها در سه گروه دسته‌بندی شده‌اند: (۱) سه نمونه شاهد (فاقد تقویت)، (۲) سه نمونه تقویت شده با مش‌های قائم از جنس فیبر کربن با روش چسبندگی خارجی و (۳) سه نمونه ساخته شده با روش میان‌رحی (بند بستر). در نمونه‌های دارای مش قائم، پس از ساخت کامل دیوار و گذشت یک هفته، ابتدا سطح دیوار تمیز و مرطوب شده، سپس یک لایه پلاستر پایه سیمانی به عرض ۲۰ سانتی‌متر در دو طرف دیوار اجرا شد. پس از نصب مش فیبر شیشه در مرکز لایه پلاستر، مجدداً یک لایه پلاستر دیگر بر روی آن اجرا شده و به مدت ۱۴ روز در شرایط آزمایشگاه عمل‌آوری گردید. اتصال مش تنها از طریق چسبندگی پلاستر به سطح دیوار انجام شد و از هیچ نوع مهار مکانیکی مانند بولت یا اتصال فلزی استفاده نگردید.

جدول ۲: مشخصات الیاف شیشه مورد استفاده

مقاومت کششی عرضی (N/5cm)	مقاومت کششی طولی (N/5cm)	فاصله چشمه‌ها	نوع منسوج
۱۵۴۲	۱۶۲۹	۵ در ۵ (میلی متر)	مش فایبرگلاس زیرکونیا دار سفید





شکل ۷: توالی مراحل اجرای مش قائم روی دیوار بنایی

در نمونه‌های میان‌رجی، اجرای دیوار از ابتدا با پلاستر به جای ملات و با استفاده از دو لایه مش در هر رج صورت گرفت. میان این دو لایه، یک لایه پلاستر قرار داده شد تا درگیری مکانیکی مناسب حاصل شود. به‌طور کلی، در هر رج از دیوار، لایه پلاستر-مش-پلاستر-مش اجرا شده و سپس، رج بعدی دیوار بر روی آن قرار گرفت. در این حالت نیز ضخامت هر رج برابر با ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در پایان، تمامی نمونه‌ها به مدت دو هفته در محیط آزمایشگاه، دور از جریان باد و حرارت مستقیم نگهداری شدند. برای یکپارچه‌سازی و پیشگیری از تغییر شکل ناخواسته در نمونه‌ها، آن‌ها به‌صورت سری کنار هم چیده شده و از بالا با استفاده از قوطی‌های بلند فولادی کلاف‌بندی شدند.



شکل ۸: نحوه کلاف کردن نمونه‌ها در محیط نگهداری آزمایشگاه

۴- نتایج آزمایش

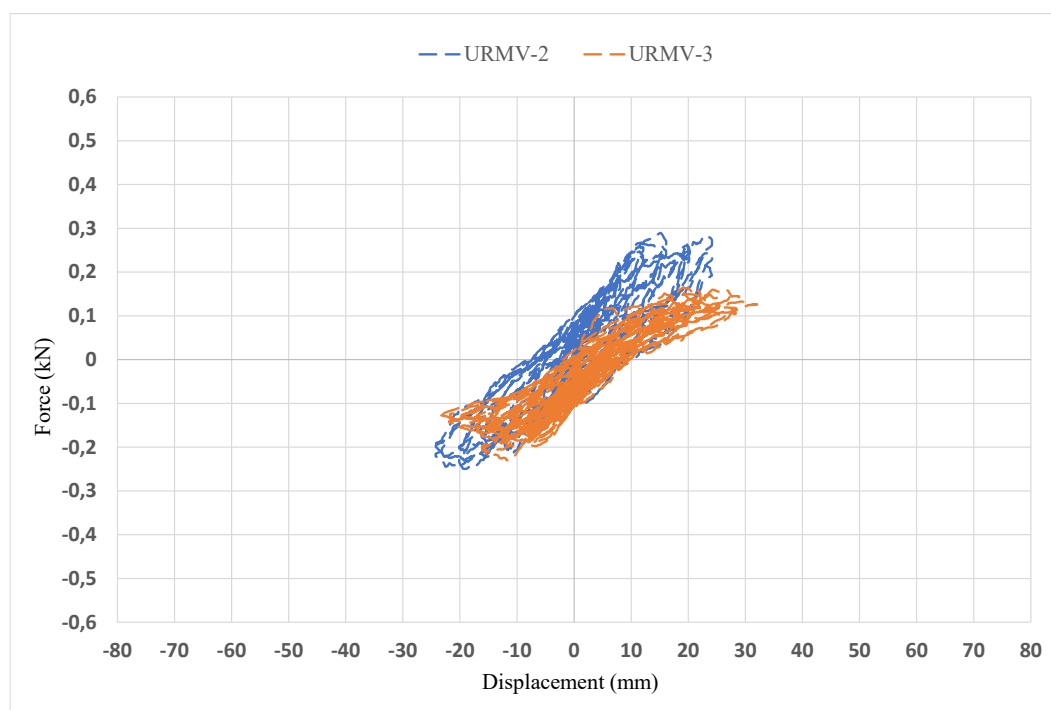
۴-۱- نمونه‌های شاهد

در این بخش، به بررسی عملکرد لرزه‌ای نمونه‌های شاهد در حالت خمش قائم پرداخته می‌شود. این نمونه‌ها به‌عنوان مبنای مقایسه برای سایر روش‌های تقویتی، بدون هیچ‌گونه تسلیح یا تقویت خاصی ساخته شده‌اند. مصالح مصرفی در ساخت این دیوارها شامل بلوک‌های سیمانی با ابعاد استاندارد مقیاس‌شده و ملات ماسه سیمان با نسبت حجمی ۱ به ۴ بوده است. هر دیوار دارای عرض ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع تقریبی ۱۷۰ تا ۱۷۵ سانتی‌متر پس از اعمال ملات و رج‌چینی نهایی بود. به‌منظور ایجاد شرایط ساخت واقعی، ناودانی‌های فلزی در بالا و پایین دیوار تعبیه شد تا تکیه‌گاه سازه‌ای مناسبی فراهم شود. نمونه‌ها پس از اجرا به مدت یک هفته در شرایط آزمایشگاه نگهداری شدند تا به مقاومت اولیه مورد نظر برسند. جدول ۲، مشخصات کلی این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۳: مشخصات هندسی و مصالح نمونه‌های شاهد (URMV) در خمش قائم

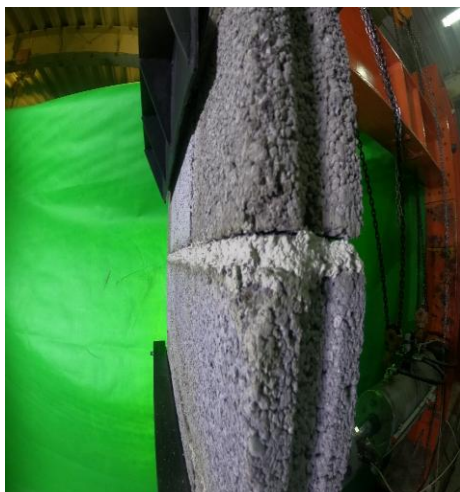
شماره ترتیب	نام	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	نوع بلوک	نوع ملات	نوع تسلیح
۱	URMV-1	۸۰	۱۷۲			
۲	URMV-2	۸۰	۱۷۰	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱ به ۴	ندارد
۳	URMV-3	۸۰	۱۷۰			

فرایند آزمایش شامل اعمال بار جانبی چرخه‌ای در جهت عمود بر صفحه دیوار با استفاده از جک هیدرولیکی آزمایشگاه بود. هدف این بارگذاری، شبیه‌سازی نیروی زلزله در راستای برون‌صفحه‌ای و بررسی منحنی‌های رفتار نیرو-جابجایی (هیستریزیس) بود. به علت آسیب نمونه اول در حمل و نقل، نمودار چرخه‌ای این دو نمونه آزمایش به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته شده است. این نمونه‌ها رفتار نسبتاً پیوسته‌ای تحت بارگذاری رفت و برگشتی از خود نشان داد و نمودار هیستریزیس قابل قبولی تولید کرد که مبنای تحلیل مکانیزم گسیختگی قرار گرفت.



شکل ۹: نمودار هیستریزیس میانگین نمونه‌های شاهد در حالت خمش قائم

بررسی کیفی الگوی گسیختگی نمونه‌ها نشان می‌دهد که محل اصلی شکست در میانه ارتفاع دیوار و عمدتاً در رج‌های میانی بوده است. ترک خوردگی ملات در رج فوقانی و ناحیه وسط دهانه، بیانگر ضعف چسبندگی ملات و مصالح بنایی در مقابل گشتاورهای ناشی از نیروی زلزله در حالت خارج صفحه است. این نوع گسیختگی نشان‌دهنده آن است که در صورت عدم استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی، دیوار بنایی بدون تسلیح، ظرفیت چندانی در مقابل بارهای دینامیکی ندارد. تصاویر زیر، نمای کلی از نمونه‌های ساخته شده و محل دقیق گسیختگی در نمونه‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: جزئیات گسیختگی چسبندگی ملات در نمونه URMV-3



شکل ۱۰: نمای کلی از نمونه‌های شاهد

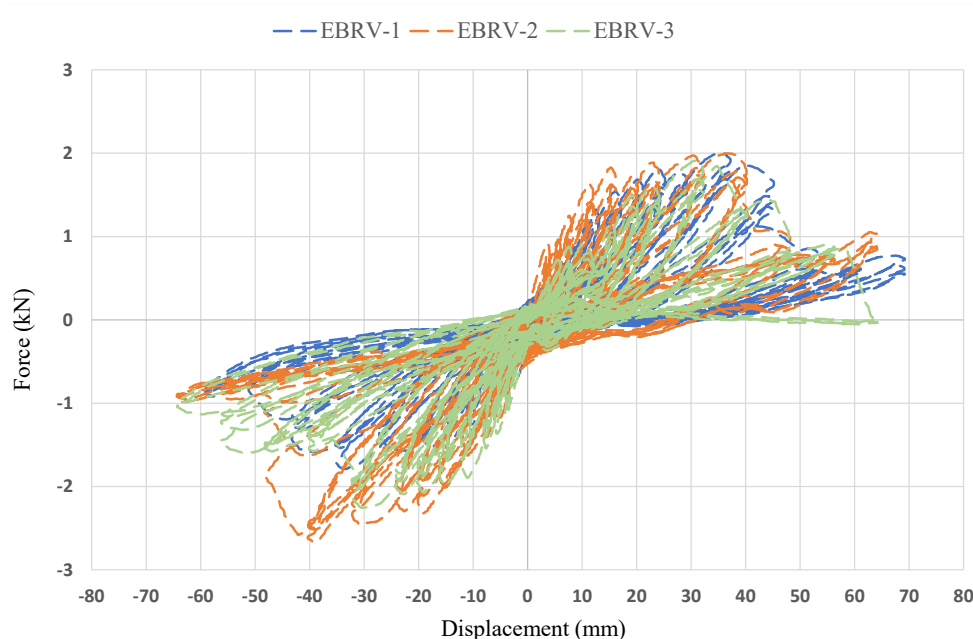
۲-۴- نمونه‌های تقویت‌شده با مش نواری قائم (تسلیح خارجی)

در این بخش، عملکرد خارج صفحه سه نمونه دیوار بنایی تقویت‌شده با سامانه FRCC شامل یک لایه مش شیشه ای قائم و دو لایه پلاستر پایه سیمانی تحت بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سیستم تقویتی مورد استفاده از نوع مش شیشه زیرکونیا دار تک‌لایه با چشمه‌های مربعی و مقاومت کششی بالا بوده که به صورت سطحی روی هر دو وجه دیوار، به کمک ملات سیمانی اجرا شده است. در جدول ۳، مشخصات هندسی و مصالح نمونه‌ها ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات نمونه‌های قائم - تسلیح خارجی با مش شیشه زیرکونیا دار

شماره ترتیب آزمایش	نام	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	نوع بلوک	نوع ملات	نوع تسلیح
۴	EBRV-1	۸۰	۱۷۲			FRCC
۵	EBRV-2	۸۰	۱۷۳	سیمانی	ماسه سیمان نسبت ۱	۱ لایه- مش
۶	EBRV-3	۸۰	۱۷۳		به ۴	قائم خارجی

رفتار کلی هر سه نمونه تقویت‌شده تحت بارگذاری چرخه‌ای، در مقایسه با نمونه‌های شاهد، افزایش محسوس در ظرفیت باربری و تغییر مکان نهایی را نشان می‌دهد. نمودارهای هیستریزس این نمونه‌ها دارای پهنای بیشتر، پایداری سیکل‌های متوالی و مقاومت باقی‌مانده پس از گسیختگی اولیه هستند که نشان از جذب انرژی بیشتر، افزایش شکل‌پذیری و بهبود رفتار غیرخطی سیستم تقویت‌شده دارد.



شکل ۱۲: نمودار هیستریزیس نمونه‌های تقویت‌شده با مش قائم FRCM

بر اساس داده‌های استخراج‌شده از بار-تغییر مکان، بیشترین مقاومت محوری برای نمونه EBRV-2 به میزان $2/30$ kN حاصل شد. همچنین بیشینه لنگر مثبت در این نمونه $0/75$ kN.m ثبت شده که نسبت به نمونه‌های غیر مسلح رشد چشمگیری دارد. میانگین لنگر خمشی نمونه‌ها $0/68$ kN.m گزارش شده است. مقدار تغییر مکان نهایی تا ± 45 میلی‌متر بدون گسیختگی ترد، مؤید قابلیت تحمل شکل‌پذیری بالا در این نوع تسلیح است.

جدول ۴: نتایج مقاومت، جابه‌جایی و لنگر نمونه‌های تسلیح خارجی

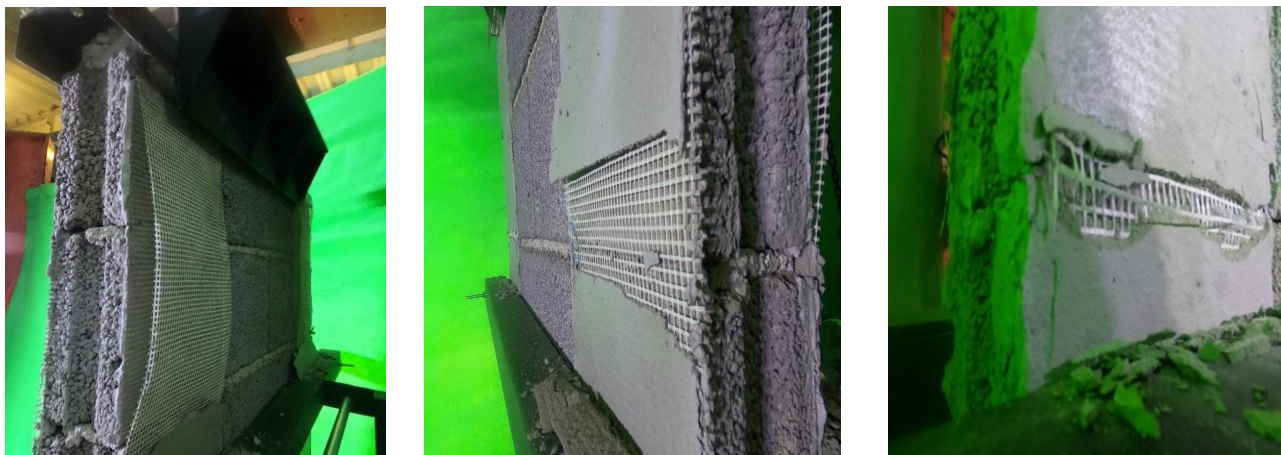
نمونه	حداکثر مقاومت (تن)	حداکثر مقاومت (kN)	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	لنگر مثبت (kN.m)	لنگر منفی (kN.m)	میانگین لنگر (kN.m)
EBRV-1	0/23	2/27	-35	0/69	0/55	0/62
EBRV-2	0/27	2/30	± 40	0/75	0/77	0/76
EBRV-3	0/22	2/25	± 35	0/61	0/74	0/67

بررسی چشمی و تحلیل دقیق خرابی‌ها نشان می‌دهد که گسیختگی در این نمونه‌ها به صورت مرحله‌ای و ترکیبی بوده است. در گام نخست، جدایش چسبندگی بین لایه پلاستر و مش در بازوهای بالا و پایین دیوار (مجاور تکیه‌گاه‌ها) رخ داده است. در مراحل بعدی و همزمان با افزایش بارگذاری، پارگی کششی مش در وسط دهانه مشاهده شد که ناشی از عبور از حد نهایی کرنش مجاز الیاف کربنی بوده است.

در برخی نمونه‌ها، از جمله EBRV-3، روند افت مقاومت پس از گسیختگی منسوج با شیب ملایم‌تری ادامه یافته که این رفتار نشان‌دهنده انتقال مؤثر نیرو از طریق پلاستر باقی‌مانده و چسبندگی مناسب در محل اتصال است. در مجموع می‌توان گفت که رفتار نمونه‌ها پس از گسیختگی اولیه نیز دارای ظرفیت باقیمانده مشخصی بوده و تخلیه انرژی به صورت پایدار اتفاق افتاده است. الگوهای خرابی مشاهده‌شده به شرح زیر بود:

- گسیختگی چسبندگی پلاستر با مش (ابتدایی‌ترین شکست):

- گسیختگی کششی منسوج در دهانه؛
- بیرون کشیده شدن منسوج از پلاستر؛
- گسیختگی ملات در رج‌های میانی.



شکل ۱۳: تصاویر گسیختگی در نمونه‌های تسلیح خارجی

تحلیل عملکرد

- نمونه EBRV-1 با وجود چسبندگی ضعیف‌تر بین لایه‌ها، مقاومت قابل قبولی تا جابه‌جایی ۳۵ میلی‌متر از خود نشان داد.
- نمونه EBRV-2 دارای بیشترین ظرفیت باربری، تقارن در نمودار رفت و برگشت و پایداری بهتر پس از گسیختگی مش بود.
- نمونه EBRV-3 عملکرد مشابهی با نمونه دوم داشت؛ اما افت مقاومت آن با نرخ کندتری رخ داد که به چسبندگی مؤثرتر پلاستر نسبت داده شد.

در مجموع، نتایج حاکی از آن است که تسلیح خارجی با سیستم FRCM می‌تواند به صورت معناداری ظرفیت خمشی خارج از صفحه دیوار بنایی را بهبود داده و رفتار انرژی‌گیرانه‌تری نسبت به حالت غیر مسلح ارائه کند. همچنین، ترکیب مناسب ملات، ضخامت بهینه لایه‌ها و کیفیت اتصال سطحی نقش کلیدی در پایداری پس از گسیختگی ایفا می‌کند.

۳-۴- نمونه‌های تقویت‌شده به روش میان‌رجی (مش در بند بستر)

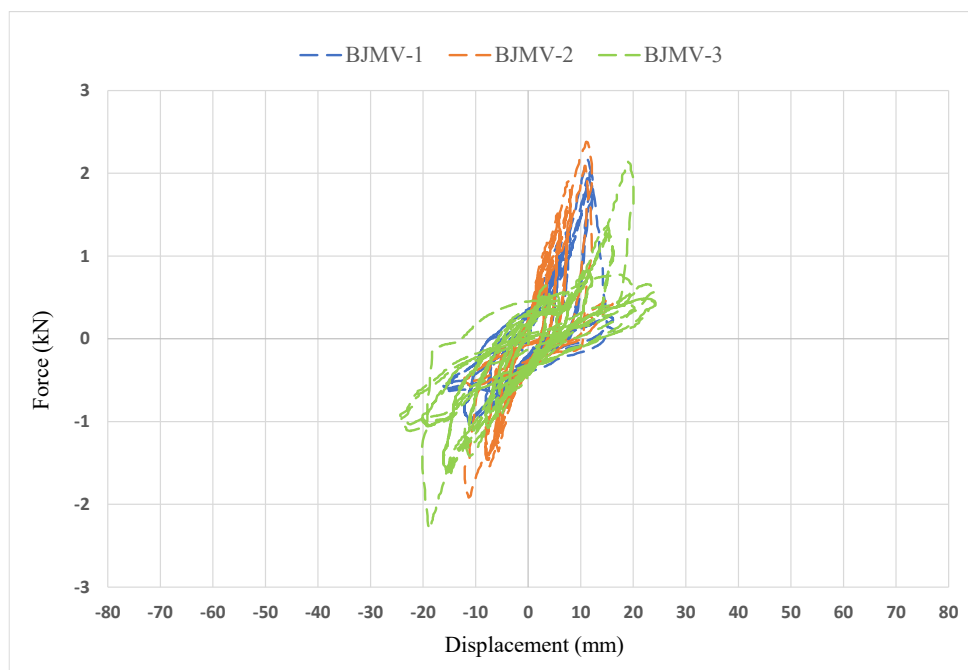
در این بخش، رفتار خارج‌صفحه دیوارهای بنایی مسلح‌شده با سیستم FRCM از نوع مش در بستر ملات مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این آزمون‌ها، ارزیابی اثر مقاوم‌سازی میان‌رجی بر رفتار چرخه‌ای، ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری دیوارهای بلوکی می‌باشد. تسلیح مورد استفاده، مش‌های تک‌جهته با آرایش دو لایه در بستر ملات بوده که به منظور بهبود چسبندگی و افزایش ظرفیت نهایی نصب شده‌اند.

جدول مشخصات هندسی و مصالح مصرفی نمونه‌ها شامل نوع بلوک، ملات، سیستم تسلیح، و ابعاد هندسی (ارتفاع و عرض) در جدول ۵ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، در این نمونه‌ها به جای ملات‌های مرسوم، از پلاستر سیمانی با نسبت آب به پلاستر خاص استفاده شده که منجر به تفاوت‌هایی در سختی اولیه شده است.

جدول ۵: مشخصات نمونه های قائم- سلیح میان رجی

شماره ترتیب آزمایش	نام	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	نوع بلوک	نوع ملات	نوع تسلیح
۷	BJMV-1	۸۰	۱۶۵		پلاستر سیمانی-	FRCM
۸	BJMV-2	۸۰	۱۶۶	سیمانی	نسبت آب به پلاستر ۱	۲ لایه- مش
۹	BJMV-3	۸۰	۱۶۵		به ۳	در بند بستر

نمودارهای هیستریزیس مربوط به نمونه‌های BJMV-1 تا BJMV-3 در نمودار زیر ارائه شده‌اند. این نمودارها بیانگر رفتار غیرخطی مصالح در طول بارگذاری چرخه‌ای هستند. منحنی‌ها نشان می‌دهند که در مقایسه با نمونه‌های بدون تسلیح، دیوارهای دارای مش میان‌رجی دارای ظرفیت باربری بالاتر و دامنه شکل‌پذیری بیشتر می‌باشند.



شکل ۱۴: نمودار هیستریزیس نمونه های قائم - تسلیح میان رجی

بر اساس نتایج، تمامی نمونه‌های این گروه توانسته‌اند مقادیر مقاومت نهایی قابل مقایسه یا حتی بالاتر از نمونه‌های دارای تسلیح خارجی از خود نشان دهند. با این حال، رفتار آن‌ها از منظر سختی اولیه و نحوه کاهش مقاومت پس از گسیختگی نهایی تفاوت‌هایی دارد. شکست در این نمونه‌ها عمدتاً شامل گسیختگی خمشی در بلوک سیمانی در وسط دهانه و گسیختگی برشی در محل اتصال بازوها (جک) به دیوار بوده است. به‌طور خاص، در نمونه BJMV-3، به علت شکل‌پذیری بیشتر، گسیختگی نهایی در بارگذاری‌های با دامنه بالاتر و با شیب کاهش مقاومت ملایم‌تری رخ داده است. خلاصه‌ای از مقادیر مقاومت حداکثر، جابه‌جایی متناظر، لنگر مثبت و منفی و لنگر متوسط برای این نمونه‌ها در جدول زیر آمده است. نتایج بیانگر آن است که در تمامی نمونه‌ها، ظرفیت خمشی به‌طور محسوسی نسبت به دیوارهای غیرمسلح افزایش یافته است.

جدول ۶: نتایج مقاومت، جابه‌جایی و لنگر نمونه‌های تقویت شده به روش میان‌رجی

نمونه	حداکثر مقاومت (تن)	حداکثر مقاومت (kN)	حداکثر جابه‌جایی (میلی‌متر)	لنگر مثبت (kN.m)	لنگر منفی (kN.m)	میانگین لنگر (kN.m)
BJMV-1	۰/۲۲	۲/۲۷	+۱۲	۰/۷۰	۰/۳۳	۰/۵۱
BJMV-2	۰/۲۴	۲/۲۹	±۱۱	۰/۷۶	۰/۶۳	۰/۶۹
BJMV-3	۰/۲۳	۲/۲۸	±۱۸	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۷۱

- نمونه BJMV-1: به رغم ارتفاع کمتر، این نمونه مقاومتی مشابه نمونه‌های دارای مش خارجی نشان داد. گسیختگی پلاستر و اتصال دقیق مش، موجب درگیری مناسب منسوج شد؛ اما سختی اولیه بالا در نهایت منجر به ترک‌های خمشی شدید در دهانه شد.
- نمونه BJMV-2: این نمونه بیشترین سختی اولیه را از خود نشان داد. با وجود مقاومت بالاتر، گسیختگی در جابه‌جایی بسیار پایین (حدود ۱۱ میلی‌متر) رخ داد که بیانگر رفتار شکننده‌تر نسبت به سایر نمونه‌ها است.
- نمونه BJMV-3: اگرچه سختی اولیه کمتری نسبت به نمونه‌های دیگر داشت؛ اما توانست شکل‌پذیری بهتری از خود نشان دهد. افت مقاومت با شیب ملایم‌تری رخ داده و گسیختگی در جابه‌جایی ۱۸ میلی‌متر در محل اتصال جک اتفاق افتاده است.



شکل ۱۵: تصاویر گسیختگی در نمونه‌های تسلیح میان‌رجی

۴-۴- مقایسه عملکردی سیستم‌های مقاوم سازی

۴-۴-۱- مقایسه ظرفیت خمشی در نمونه‌های مختلف

جهت ارزیابی عملکرد خمشی نمونه‌ها در خمش قائم، تحلیل داده‌های آزمایشگاهی بر روی سه دسته از دیوارهای بنایی شامل دیوارهای غیرمسلح (URMV)، دیوارهای تقویت‌شده با مش نواری روی سطح خارجی (EBRV) و دیوارهای تقویت‌شده با مش نواری در بند بستر (BJMV) انجام گرفت. هدف این تحلیل، مقایسه دقیق مقاومت نهایی، رفتار لنگری و تغییر شکل نمونه‌ها در برابر خمش خارج صفحه بود. مطابق داده‌های جدول ۷، نمونه‌های تقویت‌شده به‌طور قابل توجهی ظرفیت خمشی بالاتری نسبت به نمونه کنترل از خود نشان دادند. به‌طور مشخص، نمونه‌های URMV دارای حداقل مقاومت خمشی با مقدار متوسط حدود ۰/۰۳ تن بوده و در جابه‌جایی‌های کم (زیر ۱۵ میلی‌متر) دچار گسیختگی شدند. این نتایج تأیید می‌کنند که دیوارهای بنایی بدون تسلیح، رفتار شکننده و ظرفیت پایین‌تری در برابر بارهای

خارج صفحه دارند. در مقابل، نمونه‌های EBRV که به صورت سطحی با یک لایه FRM تقویت شده بودند، میانگین مقاومت نهایی حدود ۰/۳۳ الی ۰/۳۷ تن داشته و توانستند جابجایی‌هایی تا ۴۵ میلی‌متر را تحمل نمایند. همچنین، نسبت لنگر مثبت به منفی در این گروه، حدود ۱/۱۰ الی ۳۷/۱ گزارش شد که بیانگر رفتار پایدار در چرخه‌های بارگذاری رفت و برگشتی است. مقادیر لنگر به دست آمده نیز بین ۰/۶۹ تا ۰/۷۶ کیلونیوتن.مترمربع متغیر بود. از سوی دیگر، نمونه‌های BJMV با استفاده از تسلیح میان‌رجی و دو لایه مش در بند ملات بستر، عملکردی نزدیک به گروه EBRV داشتند. حداکثر مقاومت ثبت شده در این گروه تا ۰/۳۴ تن افزایش یافته و جابجایی‌هایی معادل ۱۲ تا ۱۸ میلی‌متر پیش از گسیختگی ثبت شد. نکته قابل توجه در این گروه، افزایش سختی اولیه و تأخیر در گسیختگی نهایی بود که از عملکرد همبسته‌ی بهتر میان ملات، مش و بلوک حکایت دارد. بر اساس میانگین‌های عملکرد خمشی، می‌توان بیان کرد که:

- روش تسلیح خارجی نسبت به نمونه کنترل، حدود ۳۲۴ درصد افزایش ظرفیت خمشی ایجاد کرده است.
- روش میان‌رجی (درون بند) نیز عملکردی معادل با حدود ۳۰۵ درصد بهبود نسبت به نمونه غیر مسلح داشته است.

این تحلیل‌ها حاکی از آن است که هر دو روش، در افزایش ظرفیت خمشی دیوارهای بنایی در برابر خمش خارج صفحه مؤثر بوده‌اند. با این حال، در روش میان‌رجی، به دلیل نفوذ بهتر مش در ملات و درگیری عمیق‌تر، سختی و کنترل گسیختگی مؤثرتر ثبت شده که می‌تواند در طراحی‌های مقاوم‌سازی مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۷: مقایسه عملکرد ظرفیت خمشی نمونه‌های قائم در خمش قائم

نمونه	حداکثر مقاومت (تن)	حداکثر مقاومت (KN)	حداکثر جابه‌جایی (میلی متر)	لنگر مثبت (kN.m)	لنگر منفی (kN.m)	نسبت لنگر مثبت و منفی	میانگین لنگر (kN.m)	کل بر اساس نوع نمونه (kN.m)	میانگین لنگر
URMV-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
URMV-2	۰/۰۲	۰/۳۲	+۶۰	۰/۱۵	۰/۲۰	۱/۳۳	۰/۱۷	۰/۲۱	-
URMV-3	۰/۰۵۲	۰/۵۳	+۴۰	۰/۲۸	۰/۲۴	۱/۱۶	۰/۲۶	۰/۲۶	-
EBRV-1	۰/۲۳	۲/۲۷	-۳۵	۰/۶۹	۰/۵۵	۱.۱۱	۰/۶۲	۰/۶۲	-
EBRV-2	۰/۲۷	۲/۳۰	±۴۰	۰/۷۵	۰/۷۷	۱/۰۱	۰/۷۶	۰/۶۸	-
EBRV-3	۰/۲۲	۲/۲۵	±۳۵	۰/۶۱	۰/۷۴	۱/۱۰	۰/۶۷	۰/۶۷	-
BJMV-1	۰/۲۲	۲/۲۷	+۱۲	۰/۷۰	۰/۳۳	۱/۳۷	۰/۵۱	۰/۶۴	-
BJMV-2	۰/۲۴	۲/۲۹	±۱۱	۰/۷۶	۰/۶۳	۱/۱۰	۰/۶۹	۰/۶۴	-
BJMV-3	۰/۲۳	۲/۲۸	±۱۸	۰/۶۸	۰/۷۵	۱/۰۶	۰/۷۱	۰/۶۴	-

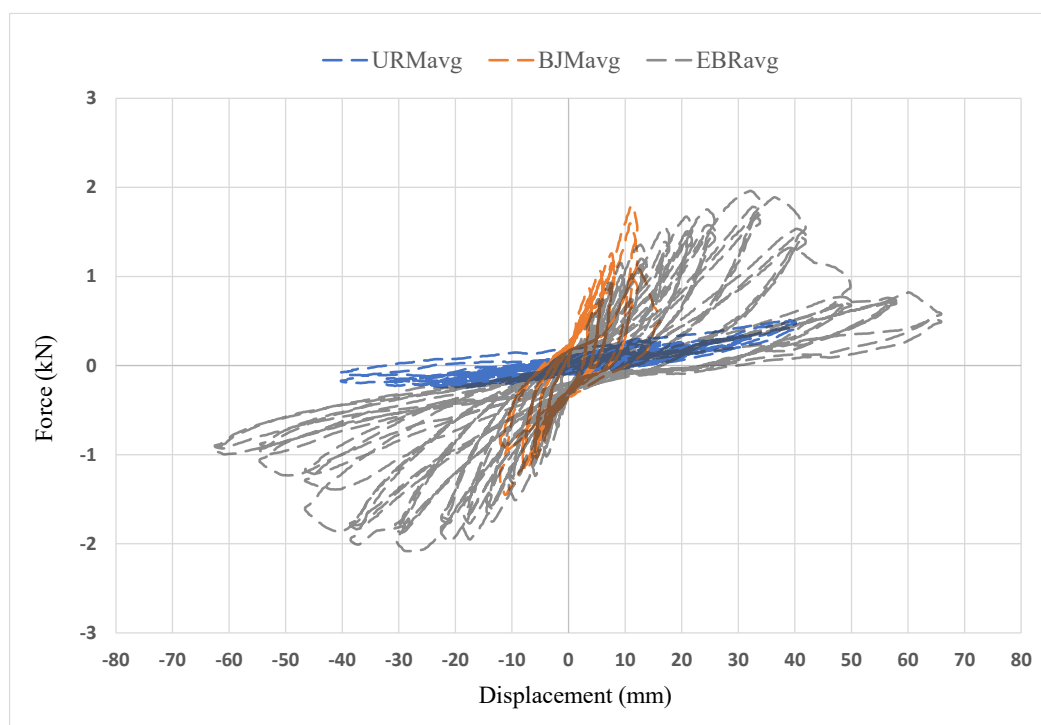
۴-۴-۲- مقایسه نمودارهای رفت و برگشتی (هیستریزیس)

تحلیل نمودارهای هیستریزیس به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارها برای ارزیابی رفتار غیرخطی و چرخه‌ای مصالح و اجزای سازه‌ای، نقش مؤثری در شناخت عملکرد واقعی دیوارهای بنایی تحت بارگذاری رفت و برگشتی دارد. نمودارهای ثبت شده برای تمامی نمونه‌ها در سه گروه دیوارهای غیرمسلح، دیوارهای مسلح با سیستم سطحی و دیوارهای مسلح میان‌رجی در شکل زیر آورده شده‌اند.

در نمونه‌های غیرمسلح URMV، نمودار هیستریزیس روند صعودی با دامنه بارگذاری بسیار محدود را نشان می‌دهد. رفتار این نمونه کاملاً خطی تا لحظه شکست ناگهانی بوده و از خود انرژی جذب محدودی بروز داده است. در مقابل، نمودارهای نمونه‌های مسلح EBRV رفتار چرخه‌ای مشخص، مقاومتی غیرخطی، و افت بار تدریجی پس از مقاومت نهایی را به وضوح نمایش می‌دهند اما این رفتار در نمونه‌های BJMV نیز بصورت خطی و افت مقاومت ناگهانی، همچون نمونه‌های شاهد بوده است، با این تفاوت که در این نمونه‌ها جذب انرژی بسیار بالا بوده و به علت سختی زیاد، نمونه‌های شکل‌پذیری کمی از خود نشان داده‌اند. در گروه EBRV، شکل‌گیری حلقه‌های کامل رفت و برگشتی به خصوص در EBRV-1 و EBRV-2 نشان‌دهنده شکل‌پذیری مناسب، جذب انرژی بالا و ظرفیت تحمل بار در چرخه‌های مکرر است. تغییرات هندسی حلقه‌ها نیز نمایانگر مکانیسم‌های مختلف گسیختگی در مراحل گوناگون بارگذاری بوده است. در نمونه‌های BJMV نیز گرچه

سختی اولیه بیشتر و دامنه حلقه‌ها محدودتر است؛ اما رفتار پایدارتر، تقارن بهتر و افت مقاومت با شیب کمتر ثبت شده که مؤید افزایش پیوستگی بین اجزای مقاومتی سیستم است. این ویژگی‌ها خصوصاً در نمودار BJMV-3 بارزتر بوده و توانایی بهتر این سیستم در کنترل گسیختگی و افزایش دوام چرخه‌ای را نشان می‌دهد. در مجموع، تحلیل نمودارهای هیستریزس نشان می‌دهد:

- روش‌های تقویتی، به‌ویژه سیستم‌های نواری، با شکل‌پذیری بالا و رفتار غیرخطی کنترل‌شده، توانمندی مناسبی در جذب انرژی و مقابله با بارهای رفت و برگشتی دارند.
- سیستم تقویت میان‌رجی ضمن حفظ ظرفیت باربری، کاهش افت مقاومت و تقارن بیشتر در نمودارها را فراهم کرده است.



شکل ۱۶: نمودارهای هیستریزس میانگین نمونه‌های مختلف دیوار بنایی تحت بارگذاری خارج صفحه

۴-۵- مقایسه نمودارهای پوش

نمودار پوش یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل رفتار غیرخطی سازه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای است. این نمودار با ترسیم منحنی اتصال نقاط اوج بار-تغییر مکان در هر سیکل بارگذاری، اطلاعات مهمی از جمله مقاومت نهایی، سختی اولیه و شکل‌پذیری را ارائه می‌دهد. در این بخش، مقایسه‌ای میان رفتار نمونه‌های مختلف از منظر نمودار پوش صورت می‌پذیرد. با مشاهده کلی نمودارهای پوش، می‌توان دریافت که اغلب نمونه‌ها به‌ویژه نمونه‌های شاهد (URM)، دارای رفتار ترد بوده و پس از رسیدن به مقاومت اوج، دچار افت ناگهانی ظرفیت شده‌اند. این افت مقاومت را می‌توان ناشی از گسیختگی چسبندگی ملات در میانه رج‌های دیوار دانست که منجر به ایجاد مفصل ثانویه و افت سختی ناگهانی در نمونه‌ها شده است. در واقع، گسیختگی در این نوع دیوارها عمدتاً در ناحیه‌ای با ضعف در چسبندگی ملات و بلوک آغاز شده و گسترش یافته است. نمونه‌های تقویت‌شده به روش خارجی (EBR) و میان‌رجی (BJM) به‌وضوح عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های بدون تسلیح از خود نشان داده‌اند. در نمودار پوش، مشخص است که:

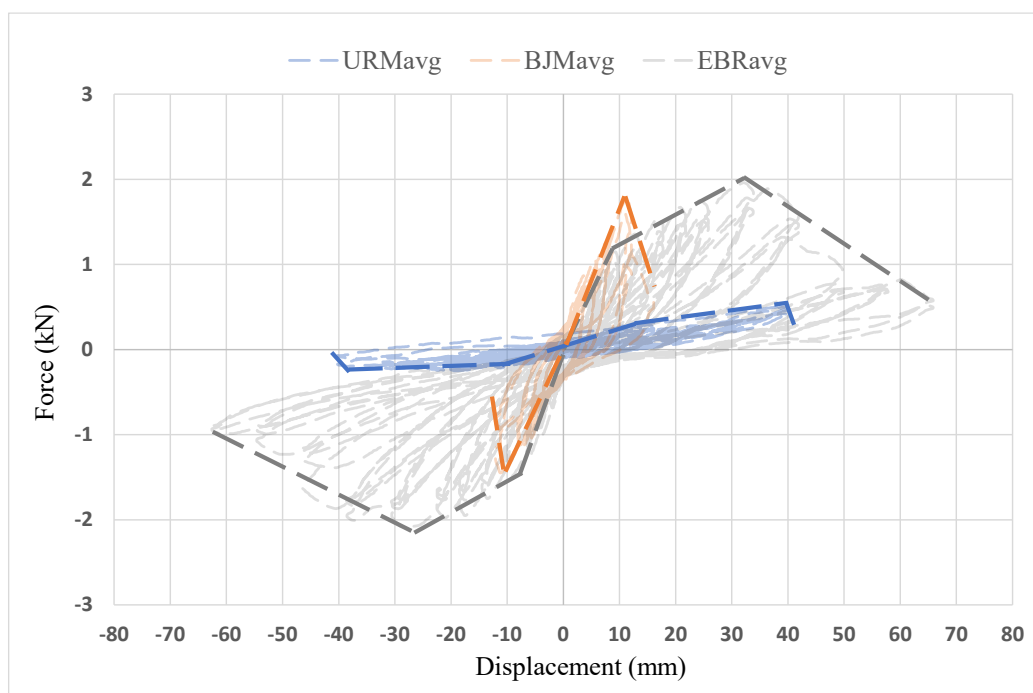
- دیوارهای تقویت‌شده با مش FRCM در روش EBR، دارای افزایش قابل توجهی در سختی اولیه و ظرفیت نهایی بوده‌اند.

• در مقابل، سیستم‌های BJM نیز عملکرد نزدیکی به EBR داشته‌اند، به گونه‌ای که تفاوت در پیک نهایی نیرو یا تغییر مکان چندان محسوس نیست؛ اما در برخی موارد شیب نمودار و دامنه تغییر مکان در BJM کمتر است که ناشی از سختی بالاتر این سیستم به دلیل انباشته شدن ملات و لایه مش در داخل رج‌هاست.

در اغلب نمودارها، عدم تقارن رفت و برگشت مشاهده می‌شود. این رفتار، ناشی از چند عامل همزمان است:

- ناهمسانی در اعمال بار کششی و فشاری جک هیدرولیکی که منجر به عملکرد غیرمتقارن در بارگذاری‌های رفت و برگشتی شده است.
- ترد بودن گسیختگی دیوارها در یکی از مسیرها (رفت یا برگشت) که افت مقاومت ناگهانی ایجاد کرده و باعث پدید آمدن ناحیه خالی در سمت مقابل نمودار شده است.
- غیر یکنواخت بودن مصالح دیوار که منجر به توزیع نامتعادل نیرو در دو جهت شده است.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از سیستم‌های مقاوم‌سازی چه در قالب مش خارجی (EBR) و چه روش میان‌رجی (BJM) به افزایش مقاومت و سختی نمونه‌ها در رفتار خارج از صفحه انجامیده است. با وجود اینکه تمامی نمونه‌ها در برابر بارگذاری خمشی رفتار شکل‌پذیر چشمگیری نداشتند ولی نمودارهای پوش به‌وضوح نشان‌دهنده بهبود عملکرد دیوار در سیستم‌های تقویتی بوده‌اند.



شکل ۱۷: نمودارهای پوش نمونه‌های قائم

۴-۵-۱- مقایسه سختی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار خارج صفحه

در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی غیرسازه‌ای تحت خمش خارج صفحه، تحلیل پارامترهایی نظیر سختی اولیه، ضریب شکل‌پذیری (μ) و ضریب رفتار (R) اهمیت ویژه‌ای دارد. این پارامترها، نه تنها تعیین‌کننده ظرفیت جذب انرژی و مقاومت نمونه‌ها در برابر تغییر شکل‌های بزرگ هستند، بلکه نقش کلیدی در نحوه رفتار غیرخطی دیوارها در شرایط زلزله ایفا می‌کنند. بر اساس جدول نتایج به‌دست‌آمده، مقدار سختی اولیه (K) برای نمونه شاهد URM برابر با 0.2 kN/mm ، برای نمونه مسلح‌شده با مش قائم خارجی (EBR) برابر با 0.14 kN/mm و برای نمونه میان‌رجی (BJM) برابر با 0.20 kN/mm است. به عبارت دیگر، میزان سختی در حالت EBR حدود ۷۰۰ درصد و در حالت BJM حدود ۱۰۰۰ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.

جدول ۸: نتایج سختی، شکل پذیری و ضریب رفتار نمونه‌ها

R	R _s	R _u	M _d (kN.m)	M _{avg} (kN.m)	μ	K(kN/mm)	کد نمونه	نوع خمش
۱/۸۱	۱/۴۳	۱/۲۶	۰/۰۷	۰/۲۱	۱/۳	۰/۰۲	URM-V	
۲/۳۵	۰/۹۶	۲/۴۵	۰/۷۱	۰/۶۸	۳/۵	۰/۱۴	EBR-V	تحت خمش قائم
۴/۹۷	۲/۰۶	۲/۴۱	۰/۳۱	۰/۶۴	۳/۴	۰/۲	BJM-V	

این افزایش قابل توجه در سختی اولیه، بیانگر ارتقاء توانایی دیوار در مقاومت در برابر جابجایی‌های اولیه است. با توجه به کاربرد این دیوارها به عنوان اجزای غیرسازه‌ای نما، ارتقاء سختی نقش بسزایی در کاهش جابجایی‌ها و جلوگیری از آسیب‌های اولیه به پوشش‌های معماری خواهد داشت.

شکل‌پذیری نمونه‌ها بر اساس نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان تسلیم (μ) ارزیابی شده است. مقدار μ در نمونه شاهد URM برابر با ۱/۳، در نمونه EBR برابر با ۳/۵ و در نمونه BJM برابر با ۳/۴ گزارش شده است. علیرغم تفاوت ناچیز بین دو روش تسلیح (اختلاف تنها ۰.۳ درصد)، هر دو روش عملکرد مناسبی در جذب انرژی پس از نقطه تسلیم نشان داده‌اند. شایان ذکر است که افزایش شکل‌پذیری موجب تأخیر در گسیختگی ترد شده و ظرفیت جذب انرژی در حین زلزله را افزایش می‌دهد. این موضوع به ویژه در دیوارهایی با وظیفه محدودکننده جابجایی (مانند دیوارهای تیغه‌ای یا نماهای سنگین) حائز اهمیت است.

ضریب رفتار (R) نشان‌دهنده کاهش مقاومت لازم در طراحی لرزهای به‌واسطه شکل‌پذیری است. مقدار R در نمونه‌های URM، EBR و BJM به ترتیب برابر با ۱/۸۱، ۲/۳۵ و ۴/۹۷ به‌دست آمده است. این مقادیر توسط رابطه ضریب شکل‌پذیری نیومارک محاسبه شده است [۱۴].

با توجه به آنکه ضریب رفتار پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ برای دیوارهای غیرسازه‌ای مقدار ثابت ۲/۵ در نظر گرفته شده است [۱۵]، نتایج نشان می‌دهد که این مقدار در حالت BJM بسیار محافظه‌کارانه بوده و ظرفیت انرژی‌پذیری این سیستم بالاتر از انتظار آیین‌نامه‌ای است. با این حال، باید توجه داشت که این ضریب بالا لزوماً در همه شرایط مطلوب نیست؛ زیرا شکل‌پذیری زیاد در دیوارهای غیرسازه‌ای می‌تواند منجر به افت پایداری نما و افزایش خطر ریزش مصالح شود.

نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی گویای آن است که هر دو روش تسلیح خارجی (EBR) و تسلیح در بند بستر (BJM) منجر به ارتقاء عملکرد دیوار از نظر سختی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار شده‌اند. با این حال، در مواردی مانند دیوارهای نما، افزایش بیش از حد شکل‌پذیری ممکن است منجر به رهاشدگی اجزای غیرسازه‌ای و افت ایمنی شود. در نهایت، می‌توان چنین نتیجه گرفت که روش تسلیح میان‌رجی علاوه بر ارائه سختی و مقاومت مناسب، شکل‌پذیری کافی نیز ایجاد کرده و به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی و اجرایی مناسب برای مقاوم‌سازی دیوارهای بنایی در برابر خمش خارج از صفحه پیشنهاد می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

- نتایج آزمایش‌های خمشی دیوارهای بنایی تحت خمش قائم نشان داد که استفاده از سیستم‌های تقویتی موجب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری دیوارها می‌شود. نمونه شاهد (URMV) با ظرفیت خمشی متوسط ۰.۲۱ تن، عملکرد پایه دیوار بدون تقویت را نشان داد، در حالی که نمونه‌های تقویت‌شده با سیستم تسلیح خارجی (EBRV) و تسلیح میان‌رجی (BJMV) به ترتیب ظرفیت‌هایی برابر با ۰.۶۸ و ۰.۶۴ تن داشتند. این افزایش معادل ۳۲۴٪ برای EBRV و ۳۰۵٪ برای BJMV نسبت به نمونه شاهد است. عملکرد برتر EBRV را می‌توان به قرارگیری مستقیم مصالح تقویتی در ناحیه کششی و افزایش سختی خمشی نسبت داد، در حالی که BJMV با بهبود پیوستگی میان واحدهای بنایی نیز نقش مؤثری در افزایش مقاومت ایفا کرده است. این نتایج با مطالعات پیشین هم‌راستا بوده و نشان‌دهنده پتانسیل بالای این روش‌ها در مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی موجود، به‌ویژه در برابر بارهای خمشی و لرزهای هستند.

- مقایسه سختی اولیه (K) بین نمونه‌های آزمایش شده نشان داد که سیستم تقویتی میان‌رجی (BJMV) با مقدار 0.20 kN/mm بالاترین عملکرد را داشته و به‌طور قابل توجهی سختی دیوار را افزایش داده است. در مقابل، نمونه‌های دارای تسلیح خارجی (EBRV) با مقدار 0.14 kN/mm و نمونه‌های شاهد (URMV) با مقدار 0.02 kN/mm در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این افزایش معادل ۹۰۰ درصد برای BJMV و ۶۰۰ درصد برای EBRV نسبت به نمونه‌های بدون تقویت است که نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر این روش‌ها در بهبود سختی اولیه دیوارهای بنایی می‌باشد. افزایش سختی اولیه به معنای مقاومت بیشتر در برابر تغییر شکل‌های اولیه و تأخیر در شروع ترک خوردگی است که نقش مهمی در ارتقاء رفتار سازه‌ای تحت بارهای لرزه‌ای دارد. عملکرد برتر BJMV را می‌توان به توزیع یکنواخت‌تر مصالح تقویتی در رج‌های ملات و افزایش پیوستگی بین اجزای دیوار نسبت داد، در حالی که EBRV نیز با تقویت سطح خارجی دیوار، به‌طور مؤثری در افزایش سختی نقش داشته است. این یافته‌ها با مطالعات پیشین هم‌راستا بوده و بر اهمیت انتخاب نوع سیستم تقویتی بر اساس نیازهای عملکردی سازه تأکید دارند.
- بررسی شکل‌پذیری (μ) نمونه‌ها نشان داد که سیستم‌های تقویتی مورد استفاده عملکرد مناسبی در جذب انرژی و تحمل تغییر شکل‌های غیرالاستیک داشته‌اند. نمونه‌های دارای تسلیح خارجی (EBRV) با مقدار شکل‌پذیری ۳.۵ و نمونه‌های تقویت‌شده با سیستم میان‌رجی (BJMV) با مقدار ۳.۴، عملکردی نزدیک به هم از خود نشان دادند. این فاصله ناچیز بیانگر آن است که هر دو روش تقویتی توانسته‌اند رفتار شکل‌پذیر مناسبی در دیوارهای بنایی ایجاد کنند، به‌طوری که دیوار پس از عبور از مرحله تسلیم، قادر به تحمل تغییر شکل‌های بیشتری بدون گسیختگی ناگهانی بوده است. شکل‌پذیری بالا در دیوارهای بنایی غیر باربر، به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز، اهمیت زیادی دارد زیرا موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی و کاهش احتمال فروپاشی ناگهانی می‌شود. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که هر دو سیستم تقویتی نه تنها در افزایش مقاومت مؤثر بوده‌اند، بلکه در بهبود رفتار غیرخطی و ارتقاء ایمنی لرزه‌ای نیز نقش مهمی ایفا کرده‌اند.
- تحلیل مقادیر ضریب رفتار (R) برای دیوارهای مورد بررسی، حاکی از آن است که روش میان‌رجی با مقدار $4/97$ و روش تسلیح خارجی با مقدار $2/35$ عملکرد بسیار بهتری نسبت به مقدار $1/81$ ثبت شده برای نمونه‌های شاهد دارند. این مقادیر نشان می‌دهند که در شرایط بارگذاری خارج از صفحه، ضرایب رفتار رایج در آیین‌نامه ممکن است کمتر از واقعیت عملکردی دیوارهای تقویت‌شده تخمین زده شوند و به بازنگری در مقادیر طراحی نیاز باشد.
- در نهایت، با توجه به نزدیکی نتایج مربوط به ظرفیت خمشی، سختی اولیه، ضریب رفتار و شکل‌پذیری بین دو روش تقویتی، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم میان‌رجی به‌عنوان جایگزینی مؤثر و اقتصادی برای روش تسلیح خارجی قابل طرح است. این روش علاوه بر کارآمدی سازه‌ای، به‌ویژه در مواردی که به دلایل اجرایی، امکان نصب پوشش‌های سطحی وجود ندارد، مزیت‌های قابل توجهی در اجرا و دوام فراهم می‌آورد.

مراجع

- [1] Gencturk, B., Sezen, H., Mieler, M., Griffith, M., Gudhka, P., & Garai, R. (2025). Vulnerability assessment of buildings in the aftermath of 2023 Turkiye earthquake sequence. *Earthquake Spectra*, 41(2), 1616-1641.
- [2] Bratu, C., Šokić, D., Ademović, N., Isik, E., Bulajić, B., Radu, D., & Hadzima-Nyarko, M. (2025). Assessment of Masonry-Infilled Steel Frames Using Existing Experimental Tests Database in Comparison to Standards. *Buildings*, 15(2), 190.
- [3] Onat, Ö., & Evcı, P. U. (2024). A parametric study in reinforced concrete frames with different infill wall materials. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(9), 4447-4476.
- [4] de Felice, G., Carloni, C., Nanni, A., Aldea, C. M., Banthia, N., Bentz, D. P., ... & Triantafillou Maria Rosa Valluzzi, A. P. T. C. (2020). Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures. In *ACI 549.6 R-20* (pp. 1-159). American Concrete Institute.
- [5] Thomoglou, A. K., Jagadesh, P., & Voutetaki, M. E. (2023). Review of out-of-plane strengthening techniques of unreinforced masonry walls. *Fibers*, 11(9), 78.

- [6] Hojdys, Ł., & Krajewski, P. (2021). Tensile behaviour of FRCM composites for strengthening of masonry structures—An experimental investigation. *Materials*, 14(13), 3626.
- [7] De Risi, M. T., Furtado, A., Rodrigues, H., Melo, J., Verderame, G. M., Arêde, A., ... & Manfredi, G. (2022). Influence of textile reinforced mortars strengthening on the in-plane/out-of-plane response of masonry infill walls in RC frames. *Engineering Structures*, 254, 113887.
- [8] Harajli, M., ElKhatib, H., & San-Jose, J. T. (2010). Static and cyclic out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. *Journal of materials in civil engineering*, 22(11), 1171-1180.
- [9] Bellini, A., Incerti, A., Bovo, M., & Mazzotti, C. (2018). Effectiveness of FRCM reinforcement applied to masonry walls subject to axial force and out-of-plane loads evaluated by experimental and numerical studies. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(3), 376-394.
- [10] Türkmen, Ö. S., Wijte, S. N., De Vries, B. T., & Ingham, J. M. (2021). Out-of-plane behavior of clay brick masonry walls retrofitted with flexible deep mounted CFRP strips. *Engineering Structures*, 228, 111448.
- [11] Sisti, R., Corradi, M., & Borri, A. (2016). An experimental study on the influence of composite materials used to reinforce masonry ring beams. *Construction and Building Materials*, 122, 231-241.
- [12] Borri, A., Castori, G., & Grazini, A. (2009). Retrofitting of masonry building with reinforced masonry ring-beam. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1892-1901.
- [13] AC 434. (2024). Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel Reinforced Grout (SRG) Composite Systems. International Code Council-Evaluation Service (ICC-ES)
- [14] Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). Earthquake spectra and design. Engineering Monographs on Earthquake Criteria.
- [15] Building and Housing Research Center. (2015). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800, 4th ed.). BHRC - PN Z 253. Tehran, Iran.