



Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



Steel fiber reinforced strips for out-of-plane retrofitting of unreinforced masonry infills with an opening

Asgar Panahandeh^{1*}, Farshid Fathi², Mohammad Amir Najafgolipour³

1- Phd Student, Department of Civil Engineering. Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering. Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering and Environment, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

In this paper, the results of an experimental study on the out-of-plane behavior of steel frames with unreinforced masonry infills with an opening, retrofitted with steel fiber reinforced strips are presented. Large scale test specimens were used, including an unreinforced masonry infill with an opening, a masonry infill retrofitted with steel fiber-reinforced strips in full contact with the surrounding frame, and a masonry infill retrofitted with steel fiber-reinforced strips with no contact with the steel frame. Steel fiber reinforced strips with a width and thickness of 200 mm and 20 mm, respectively, are used to strengthen the masonry infills. According to the test results, this retrofitting technique can enhance the out-of-plane strength and deformation capacity of the masonry infills. Therefore, it can be used as an effective technique to provide stability for unreinforced masonry buildings.

ARTICLE INFO

Receive Date: 25 August 2025

Revise Date: 27 November 2025

Accept Date: 17 December 2025

Keywords:

Steel Frame

Masonry Infill

Out Of Plane Behavior

Steel Fiber Concrete

Increasing Static Load

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2025.541406.3799>

*Corresponding author: Mohammad Amir Najafgolipour

Email address: najafgolipour@sutech.ac.ir

استفاده از نوارهای بتن الیافی فولادی جهت تقویت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌های بنایی بازشودار

عسگر پناهنده^{۱*}، فرشید فتحی^۲، محمدمیر نجف‌قلی‌پور^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در این مقاله نتایج حاصل از یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی با هدف بررسی رفتار خارج از صفحه‌ی قاب‌های فولادی دارای میان‌قاب آجری بازشودار تقویت شده توسط نوارهای بتنی مسلح شده با الیاف فولادی ارائه شده است. برای این منظور، نمونه‌های آزمایشگاهی شامل سه نمونه‌ی بزرگ مقیاس قاب فولادی با میان‌قاب به ترتیب، نمونه با میان‌قاب مصالح بنایی متکی به قاب بدون تقویت (به عنوان نمونه‌ی مرجع)، میان‌قاب تقویت شده توسط نوارهای بتن الیافی در هر دو وجه دیوار و متکی به قاب و میان‌قاب تقویت شده توسط نوارهای بتن الیافی در هر دو وجه دیوار و جدا از قاب می‌باشند. بارگذاری خارج از صفحه به صورت بار استاتیکی فزاینده بوده است. طرح تقویتی پیشنهادی به صورت نوارهای بتنی الیافی به عرض ۲۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۲۰ میلی‌متر می‌باشند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که تقویت میان‌قاب توسط نوارهای بتن الیافی باعث افزایش سختی اولیه تا حدود ۲/۵ برابر برای حالت میان‌قاب چسبیده به قاب و حدود ۱/۸ برابر برای حالت جدا از قاب نسبت به نمونه مرجع شد. همچنین مقاومت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب در حالات مختلف شرایط تکیه گاهی تا حدود ۲/۷ برابر بهبود یافت. علاوه بر این تقویت دیوارهای میان‌قاب به این شیوه ظرفیت تغییرشکل‌های غیرخطی میان‌قاب‌ها را ارتقا می‌بخشد. بنابراین از این روش اجرایی می‌توان به طور موثر جهت بهبود رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌ها، هم به عنوان یک روش تقویت میان‌قاب موجود و هم به عنوان پایدارسازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی جدید بهره گرفت.

کلمات کلیدی: قاب فولادی، میان‌قاب آجری، بازشو، رفتار خارج از صفحه، بتن الیافی فولادی، بار استاتیکی فزاینده

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۴/۰۶/۰۳	۱۴۰۴/۰۹/۰۶	۱۴۰۴/۰۹/۲۶	۱۴۰۴/۰۹/۲۶	۱۴۰۵/۰۵/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2025.541406.3799
*نویسنده مسئول:		محمدمیر نجف‌قلی‌پور			
پست الکترونیکی:		najafgholipour@sutech.ac.ir			

۱- معرفی

در طول تاریخ، در کشور ایران و بسیاری از نقاط جهان، وقوع زلزله‌های نیرومند خسارات جانی و مالی بزرگی را در بر داشته است. تجربه‌ی زلزله‌های گذشته، بیانگر این نکته است که مهم‌ترین عامل بروز خسارات، آسیب‌پذیری بالای ساختمان‌ها و تاسیسات احداث شده می‌باشند. در این میان، با توجه به حجم گسترده‌ی استفاده از میان‌قاب‌های مصالح بنایی در ساختمان‌سازی و عدم توجه به عملکردشان و نیز در کنار آن ضعف‌های فنی اجرایی، میان‌قاب را می‌توان از عوامل بروز خسارت و آسیب‌پذیری بالای آنها در ساختمان‌ها عنوان نمود.

در اکثر ساختمان‌ها با سیستم باربر ثقیلی و جانبی به صورت قاب‌های فولادی و بتن‌آرمه برای جداسازی فضاهای داخل ساختمان و نیز دیوارهای پیرامونی آنها، از دیوارهای مصالح بنایی همانند آجر و بلوک سیمانی استفاده می‌گردد. مطابق مطالعه‌ی آماری صورت گرفته برای ساختمان‌های رایج در یک بازه‌ی زمانی یک ساله از شهریور ماه ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۴ بر روی ۶۲۵ ساختمان در حال ساخت در نقاط مختلف تهران ۵۱/۶۸٪ دیوارها از بلوک سفالی سبک و ۴۰/۸٪ با استفاده از بلوک سیمانی سبک ساخته شده است [۱]. لازم به ذکر است بسته به موقعیت جغرافیایی شهر، تمایل به این دو نوع مصالح متفاوت است. در نقاط شمالی شهر تهران تمایل بیشتر به بلوک سیمانی سبک بوده در حالی که در مناطق جنوبی، بلوک‌های سفالی سبک بیشتر مورد استقبال قرار گرفته است [۲].

بررسی رفتار قاب‌های ساختمانی با میان‌قاب مصالح بنایی از جنبه‌های گوناگون قابل بررسی است. به عنوان مثال، وجود میان‌قاب‌ها در ساختمان می‌تواند بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها تاثیرگذار باشد. این اثرات در برخی مواقع تاثیر مثبت و در بسیاری از موارد می‌تواند عملکرد سازه را به خطر بیندازد. با پر کرن قاب‌ها با مصالح بنایی و یا با جداگرهای میان‌قابی، مشخصات رفتاری و دینامیکی سازه از قبیل سختی، مقاومت، شکل‌پذیری، پیرو ارتعاش و در نهایت رفتار کلی آن تحت تاثیر قرار می‌گیرد، بگونه‌ای که نمی‌توان با جمع خواص قاب و دیوار به طور جداگانه به خواص مجموعه‌ی مرکب آن دست یافت. به همین دلیل، پیچیدگی و ابهام قابل توجهی در محاسبات آنها وجود داشته و با در نظر گرفتن برخی ساده‌سازی‌ها از این اثرات بر روی قاب‌ها صرف نظر شده است [۳]. شاید به نظر برسد که در نظر نگرفتن وجود میان‌قاب‌ها در تحلیل و طراحی سازه‌ها در جهت اطمینان باشد و این دیوارها می‌توانند با ایجاد مقاومت اضافی در قاب، در تحمل نیروی زلزله و در نتیجه پایداری کلی سازه تاثیر مثبت داشته باشند، این در حالی است که در نظر نگرفتن میان‌قاب‌ها همیشه در جهت اطمینان نبوده زیرا که آنها در ابتدا سختی قاب‌ها را افزایش داده و باعث می‌شوند که قاب سهم بیشتری از نیروی زلزله را جذب کند که این نیروی زیاد بعد از چرخه‌های اولیه‌ی بارگذاری به دلیل کمبود مقاومت کششی و مقاومت برشی میان‌قاب‌ها، باعث شکست ترد آنها می‌گردد و نیروی پیش‌بینی نشده به ستون‌ها منتقل شده و این انتقال ناگهانی نیرو می‌تواند باعث آسیب به ستون و فروپاشی احتمالی قاب‌ها گردد.

خرابی خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌ها در رخداد‌های لرزه‌ای موجب آسیب‌های جانی و مالی قابل توجهی برای ساکنین شده است [۴]. بنابراین یکی از مهم‌ترین موضوعات در این حوزه، بررسی رفتار خارج از صفحه‌ی این عناصر است. هر چند که امروزه میان‌قاب‌های مصالح بنایی که به عنوان جداکننده‌ها استفاده می‌شوند عمدتاً فاقد نقش باربری می‌باشند و در واقع به عنوان اجزای غیرسازه‌ای به شمار می‌روند، می‌بایست پایداری خود را در زمان وقوع زلزله حفظ نمایند. این در حالی است که میان‌قاب‌های مصالح بنایی در حین زلزله تحت شتاب خارج از صفحه قرار گرفته و نیروی اینرسی ناشی از وزن آنها به دیوار وارد می‌شود. لذا دیوارهای میان‌قابی در معرض خرابی خارج از صفحه قرار می‌گیرند.

در زلزله‌های اخیر در کشور، نظیر زلزله‌ی کرمانشاه مشاهده شده است که در اثر نیروی زلزله، در عمده‌ی موارد آسیب جدی به سازه‌ها وارد نگردیده ولی ایجاد خرابی در میان‌قاب‌ها گسترده بوده است. در هنگام وقوع زلزله ایجاد ترک در میان‌قاب و یا خرابی محدود در آنها با توجه به انتظار شکل‌پذیری از سازه (بر اساس سطوح عملکردیشان) قابل پیش‌بینی می‌باشند اما خرابی کامل میان‌قاب و فروریزش آن غیرقابل قبول است. لذا ارائه‌ی راه حلی مناسب و اقتصادی جهت مهار و جلوگیری از فروریزش کامل میان‌قاب به نحوی که سازه بتواند شکل‌پذیری مناسب و متناسب با طراحی مورد نظر را داشته باشد امری ضروری به نظر می‌رسد [۵].

مطالعه بر روی رفتار لرزه‌ای میان‌قاب‌های مصالح بنایی از سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شده است و در حال حاضر نیز از موضوعات پرچالش و مورد توجه پژوهشگران می‌باشد. در اوایل قرن بیست و یکم مطالعات متعددی بر روی رفتار خارج از صفحه‌ی قاب دارای میان‌قاب

توسط ماندن [۶] یوسف [۷] انگل و ابرامس [۸] دیفلیسی و جیانینی [۹] رسیپ و ارجین [۱۰] گریفیت و همکاران [۱۱] فردیس و همکاران [۱۲] فلانگان و همکاران [۱۳] انجام شده است. در این بررسی‌ها، مواردی همچون تاثیر نیروی درون صفحه بر روی مقاومت خارج از صفحه‌ی میان قاب، تامین مقاومت عمود بر صفحه‌ی میان قاب، تغییرات شتاب خارج از صفحه در طبقات مختلف ساختمان، مرتبط بودن خرابی میان قاب با مقاومت خارج از صفحه در مقایسه با مقاومت درون صفحه، کافی بودن مقاومت میان قاب فاقد بازشو در برابر نیروی زلزله، شتاب قابل تحمل خارج از صفحه‌ی میان قاب بر اساس ابعاد و ضخامت میان قاب و تاثیر بارگذاری خارج از صفحه در رفتار درون صفحه‌ی آن در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال، آخوندی و همکاران [۱۴] پاسخ رفتار خارج از صفحه‌ی میان قاب مصالح بنایی با قاب‌های بتنی و تاثیر در نحوه‌ی اجرای آن با وجود بازشو در میان قاب را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نحوه‌ی اجرای میان قاب یکی از فاکتورهای مهم در عملکرد آن بوده و ممکن است پاسخ خارج از صفحه‌ی نمونه‌ها همانند تغییر در سختی و مقاومت را به دنبال داشته باشد. یکی دیگر از مسائل مهم اجرایی کار، اتصال بالای میان قاب به قاب به عنوان شرایط مرزی با پر کردن مناسب فضای بین قاب و میان قاب از طریق ملات مناسب می‌باشد، که در این حالت مکانیسم قوس دو طرفه مشاهده گردیده شده است، و در حالت دیگر مکانیسم قوس افقی یکطرفه تشکیل گردیده که مقاومت کمتری را در جهت خارج از صفحه از خود نشان می‌دهد. بنگی و همکاران [۱۵] رفتار خمشی خارج از صفحه‌ی میان قاب آجری تقویت شده با صفحات فولادی سوراخ‌دار را گزارش نمودند. نتایج نشان می‌دهند که تقویت میان قاب‌ها در هر دو طرف دیوار به طور قابل توجهی ظرفیت خمشی خارج از صفحه را بهبود می‌بخشند. آخوندی و همکاران [۱۶] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار خارج از صفحه‌ی میان قاب با مصالح بنایی آجری را مورد آزمایش قرار دادند. در آزمایش انجام شده، پارامترهای مختلف موثر بر پاسخ خارج از صفحه‌ی میان قاب‌ها از قبیل نحوه‌ی اجرا، وجود بازشو و آسیب‌های قبلی درون صفحه در نظر گرفته شده است. کویانی و مهدی [۱۷] اثرات بارگذاری درون صفحه بر روی ظرفیت خارج از صفحه‌ی دیوارهای میان قاب جدا از قاب را ارائه نمودند. نتایج بدست آمده بیان می‌کند که تاثیر رفتار درون صفحه بر روی ظرفیت خارج از صفحه قابل توجه می‌باشد. ماریانو و همکاران [۱۸] مقاومت لرزه‌ای خارج از صفحه‌ی دیوارهای میان قاب بنایی غیرمسلح را به صورت آزمایشگاهی که در آنها دیوارها تحت بارگذاری قائم ثابت و جابجایی چرخه‌ای خارج از صفحه به عنوان نماینده‌ی بارهای لرزه‌ای بود مورد بررسی قرار دادند. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، یک مدل تحلیلی جدید و اصلاح شده برای پیش‌بینی مقاومت خارج از صفحه میان قاب غیرمسلح پیشنهاد گردید که تطابق بهتری با نتایج تجربی داشته است. کهریزی و تحمیلی رودسری [۱۹] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی روش‌های متداول مهار دیوارهای میان قاب با مصالح بنایی با قاب‌های فولادی در ایران را در نظر گرفته‌اند. نتایج آزمایشات نشان دادند مهار میان قاب به قاب به طور قابل توجهی بر تشکیل الگوی ترک‌ها، مدهای شکست، سختی، مقاومت، شکل‌پذیری، تغییرشکل خارج از صفحه و میزان اتلاف انرژی موثر بوده است. میلانسی و همکاران [۲۰] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی پاسخ خارج از صفحه‌ی میان قاب با مصالح بنایی ابداعی با اتصالات لغزنده را بر روی میز لرزان مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که توجه به عملکرد آزمایشگاهی خارج از صفحه‌ی این نوع میان قاب و پاسخ رضایت‌بخش در صفحه‌ی میان قاب، به نظر می‌رسد راه حلی مناسب برای کاربردهای واقعی بسیار امیدوار کننده باشد. ماریانو و همکاران [۲۱] ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر شرایط مرزی بر رفتار خارج از صفحه‌ی میان قاب‌های غیرمسلح را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان محصورشدگی ناشی از قاب‌های بتن‌آرمه پیرامونی، مقاومت و ظرفیت جابجایی دیوارها را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. حجازی و ناظری [۲۲] در یک مطالعه‌ی عددی، رفتار خارج از صفحه‌ی میان قاب آجری بازشودار تقویت شده با نوار FRP در قاب‌های بتن مسلح تحت بار چرخه‌ای را مورد تحلیل قرار دادند. تقویت دیوار توسط نوارهای FRP انرژی مستهلک شده را افزایش داده است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد تقویت اطراف بازشو نسبت به دیگر موقعیت‌های دیوار تاثیر بیشتری را داشته است. ژو و همکاران [۲۳] مطالعه‌ی آزمایشگاهی رفتار خارج از صفحه‌ی میان قاب مصالح بنایی با درز لایه‌ی میراگر را تحت آزمایش قرار دادند. در این پژوهش آزمایش‌هایی روی میان قاب آجری در قاب فولادی با استفاده از لایه‌ی میراگر ویسکوالاستیک انجام شد. این لایه موجب تأخیر در شروع ترک‌خوردگی و افزایش جذب انرژی شد. نتایج نشان داد استفاده از لایه‌ی میراگر می‌تواند ایمنی لرزه‌ای در مقابل فروریزش خارج از صفحه را افزایش دهد. فورتادو و همکاران [۲۴] نقش بازشوها در رفتار خارج از صفحه‌ی میان قاب مصالح بنایی را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بازشوها مقاومت جانبی و سختی میان قاب را به شدت کاهش داده و تمرکز تنش و فروپاشی زودرس در اطراف قاب ایجاد می‌کنند. جین و همکاران [۲۵] بررسی آزمایشگاهی اندرکنش درون صفحه و بیرون صفحه‌ی دیوار میان قاب‌های جدا از قاب بتنی مسلح را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که وجود قیود مرزی

قابل اعتماد برای شکل‌گیری مکانیزم قوسی و جلوگیری از حرکت جسم صلب ضروری است. چن و همکاران [۲۶] رفتارهای خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌های بنایی غیرمسلح و یک‌طرف مقاوم‌سازی‌شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند که این مطالعه می‌تواند مرجع سودمندی برای ارزیابی و طراحی دیوارهای بنایی در مقابل بارهای انفجاری، چه در حالت غیرمسلح و چه در حالت مقاوم‌سازی‌شده با پلی‌یوریا اسپری‌شده را فراهم کند. مجدآبادی فراهانی و همکاران [۲۷] رفتار درون‌صفحه، خارج از صفحه و رفتار اندرکنشی درون‌صفحه-خارج از صفحه‌ی قاب‌های خمشی فولادی دارای دیوار میان‌قاب بنایی با در نظر گرفتن بازشوها و انعطاف‌پذیری‌های مختلف اجزای قاب را مورد بررسی مطالعه قرار دادند. در این تحقیق برای تحلیل‌های مربوط به اندرکنش بین رفتار درون‌صفحه (In-Plane) و خارج از صفحه (Out-of-Plane)، یک پروتکل بارگذاری نوآورانه معرفی و به کار گرفته شد و میزان کارایی و مناسب بودن آن با پروتکل‌های بارگذاری رایج در مطالعات پیشین مقایسه و به تفصیل بررسی و در ادامه نیز، ظرفیت دیوارهای میان‌قاب بنایی تحت بارگذاری هم‌زمان درون‌صفحه و خارج از صفحه استخراج گردید. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، یک رابطه‌ی جدید برای منحنی اندرکنش (Interaction Curve) ارائه شد. نتایج نشان دادند که فرمول‌بندی منحنی اندرکنش پیشنهاد شده در استاندارد ASCE/SEI 41-17 غیرمحافظه کارانه (Unconservative) بوده است. جیکورنولوس و همکاران [۲۸] رفتار خارج از صفحه با خرابی داخل صفحه‌ی تقویت شده میان‌قاب با ملات مسلح شده به کامپوزیت‌ها و عایق حرارتی را مورد مطالعه‌ی آزمایشگاهی قرار دادند. مطالعات بیان می‌کند که طرح تقویتی ملات مسلح، سختی و مقاومت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب از پیش آسیب دیده را بهبود بخشیده است. بایرامی‌آذر و امامی‌آزادی [۲۹] بررسی تجربی و عددی مقاومت خارج از صفحه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی پانل‌های میان‌قاب بنایی تسلیح شده را مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه نشان داده است که تسلیح پانل‌های میان‌قاب بنایی منجر به افزایش قابل توجه مقاومت خارج از صفحه از ۲ تا ۲/۴ برابر مقاومت خارج از صفحه‌ی پانل‌های میان‌قاب بنایی غیرمسلح می‌گردد. موراندی و همکاران [۳۰] آزمایش‌های دینامیکی میز لرزان رفتار خارج از صفحه‌ی دیوارهای بنایی ضعیف، با و بدون بارگذاری درون‌صفحه‌ای قبلی را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه، آزمایش‌های میز لرزه‌ای تمام مقیاس بر روی قاب‌های فولادی با میان‌قاب‌های آجری کم مقاومت مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها با و بدون آسیب درون‌صفحه‌ی قبلی آزموده شدند تا اثر ترک‌های موجود بر فروریزش خارج از صفحه بررسی شود. نتایج نشان داد ترک‌های درون‌صفحه مقاومت خارج از صفحه را به طور محسوسی کاهش داده و جدایی دیوار را تسریع می‌کنند که این نشان دهنده‌ی اندرکنش قوی بین رفتار درون‌صفحه و خارج از صفحه است. رن و همکاران [۳۱] مطالعه‌ی آزمایش مقیاس کامل بر رفتار خمشی خارج از صفحه‌ی دیوار مصالح بنایی مقاوم‌سازی شده با بتن مسلح را مورد انجام دادند. در این مطالعه، دو روش برای مقاوم‌سازی سازه‌ها با مصالح بنایی آجری با استفاده از بتن مسلح از طریق پوشش‌دهی سطح بیرونی دیوار آجری با لایه‌ای از بتن مسلح (RC coating) و تقویت دیوار آجری با افزودن ستون‌های بتنی مسلح (RC Columns) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد نسبت به نمونه‌ی بدون تقویت، مقاومت خمشی نمونه‌ی دارای پوشش بتن مسلح ۳۱۴٪ افزایش یافته است و این در حالی هست که نمونه‌ای که با ستون‌های بتن مسلح اضافه شده مقاوم‌سازی شده ۱۳۴٪ بهبود ظرفیت خمشی داشته است.

به علت استفاده فراوان از دیوارهای مصالح بنایی به عنوان میان‌قاب در ساختمان‌های رایج کشور، مطالعه‌ی رفتار میان‌قاب‌های بنایی تحت نیروی‌های اینرسی خارج از صفحه در هنگام وقوع زلزله کاربردی و مهم می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به آسیب‌پذیری میان‌قاب‌های مصالح بنایی تحت بارهای خارج از صفحه، روش‌های کاربردی و موثر برای پایداری آنها از اهمیت فراوانی برخوردار است. به همین دلیل در این مطالعه، در یک روند آزمایشگاهی، رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌های آجری بازشودار در قاب فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تقویت میان‌قاب نیز از نوارهای بتن الیافی فولادی به عنوان مصالح نوین با رفتار و مقاومت کششی مطلوب استفاده شده است. در این همین راستا سه نمونه‌ی آزمایشگاهی بزرگ مقیاس قاب فولادی با میان‌قاب‌های بنایی بازشودار ساخته شده از بلوک‌های سفالی سبک تقویت نشده و تقویت شده با شیوه‌های مختلف اجرا، ساخته شده و تحت بارگذاری خارج از صفحه قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که تقویت میان‌قاب‌ها توسط نوارهای بتن الیافی به میزان قابل توجهی مقاومت دیوارهای میان‌قاب را در برابر نیروهای خارج از صفحه بهبود می‌بخشد. از سوی دیگر، نمونه‌های تقویت شده در حالت اجرایی با اتصال کامل میان‌قاب به قاب پیرامونی و جدا از قاب پیرامونی تفاوت چندانی در رفتار خارج از صفحه از خود نشان نمی‌دهند. این امر می‌تواند به دلیل وجود بازشو در بخش مرکزی میان‌قاب و عرض نسبتاً کم بال تیر و ستون فولادی باشد که تاثیر کنش قوسی در ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب را محدود می‌سازد. ضمناً نتایج

نشان داد که تقویت میان قاب‌ها سبب تاخیر در ترک خوردگی، تغییر حالات شکست و الگوی ترک خوردگی، کاهش میزان آسیب دیدگی و افزایش پایداری دیوار در تغییر مکان خارج از صفحه، سختی، مقاومت و شکل پذیری آنها گردیده است.

۲- شرح مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به ارائه جزئیات انجام آزمایش‌ها شامل نمونه‌های آزمایشگاهی، سیستم انجام آزمایش و نحوه انجام آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

۱-۲ نمونه‌های آزمایش

نمونه‌های آزمایشگاهی در این تحقیق شامل سه میان قاب بنایی قرار گرفته در یک قاب خمشی فولادی یک طبقه‌ای یک دهانه می‌باشند. ابعاد نمونه‌ها یکسان بوده و دارای دهانه‌ای به طول ۲۷۲۰ و ارتفاع ۲۷۰۰ میلی‌متر می‌باشند. دیوار میان قاب‌ها از بلوک‌های سفالی توخالی سبک به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر ساخته شده است. ستون‌های قاب از مقطع IPB140 و تیرهای آن نیز از مقطع IPE160 ساخته شده است. اتصال تیر به ستون به صورت صلب و از نوع اتصالات پیچی بوده که از طریق ورق انتهایی به ابعاد ۱۵×۱۴۰×۲۶۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند. از سخت کننده‌هایی به ابعاد ۱۲×۶۷×۱۳۴ میلی‌متر برای تقویت جان ستون‌ها در امتداد بال تیرها (ورق پیوستگی) در هر دو طرف ستون‌ها و از ورق‌های تقویتی به ابعاد ۱۵×۱۵×۱۶۰ میلی‌متر برای افزایش ظرفیت برشی جان در هر دو طرف جان تیر جهت جلوگیری از خرابی موضعی سازه استفاده شده است. علاوه بر این، از دو کف ستون به ابعاد ۱۵×۲۵۰×۲۵۰ میلی‌متر جهت اتصال ستون به کف صلب از طریق اتصال پیچی استفاده شده است. طرح پیشنهادی بتن تقویتی به صورت نواری به عرض ۲۰۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر بوده که در امتداد بازشوها در هر دو راستا و در هر دو طرف دیوار به صورت چسبیده به بازشو در منطقه‌ای آجری به طور کامل اجرا گردیده است. میان قاب بنایی بر روی تیر زیرین قاب فولادی قرار گرفت. فاصله‌ی بال پایین تیر زیرین قاب تا کف ستون ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نمونه‌های آزمایشگاهی شامل یک نمونه قاب با میان قاب آجری بازشودار غیر مسلح در حالت میان قاب چسبیده به قاب، نمونه‌ی دیگر قاب با میان قاب آجری بازشودار و تقویت شده با بتن الیافی فولادی که در این حالت نیز میان قاب چسبیده به قاب بوده و در نمونه‌ی آخر، قاب دارای میان قاب آجری بازشودار تقویت شده با بتن الیافی فولادی و به صورت میان قاب اجرا شده با فاصله از قاب در نظر گرفته شده است. در جدول شماره (۱) مشخصات و جزئیات نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده‌اند. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است در نمونه‌های D2 میان قاب توسط بتن الیافی تقویت شده و حرکت خارج از صفحه‌ی آن نیز از طریق نبشی‌هایی به طولی مشابه عرض نوار بتن تقویتی بر روی وجهی که بارگذاری در آن صورت نگرفته است در محل انتهایی نوارهای بتنی اجرا و مهار شده‌اند. در نمونه‌ی D3 نیز میان قاب مشابه نمونه‌ی D2 اجرا شده ولی از هر سه طرف آزاد می‌باشد. مراحل ساخت نمونه‌ها بدین صورت بوده است که ابتدا نمونه‌ی میان قاب غیر مسلح با دنبال کردن شرایط تکیه‌گاهی مورد نیاز اجرا شد. پس از یک دوره مراقبت رطوبتی، نمونه توسط بتن الیافی تقویت شد و پس از تقویت نیز نمونه‌ها تحت مراقبت رطوبتی به مدت ۲۸ روز قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از جداشدگی زود هنگام رویه‌ی بتنی از دیوار زیرین، از مهارهای مناسب (انکر) در فواصل ۲۰۰ میلی‌متری به صورت زیگزاگی استفاده گردید. در تمامی نمونه‌ها، آجرها به صورت کامل زنجاب و درزهای قائم و افقی به نحوی مناسب از طریق ملات پر شده است.

جدول ۱: مشخصات کلی نمونه‌های مورد آزمایش

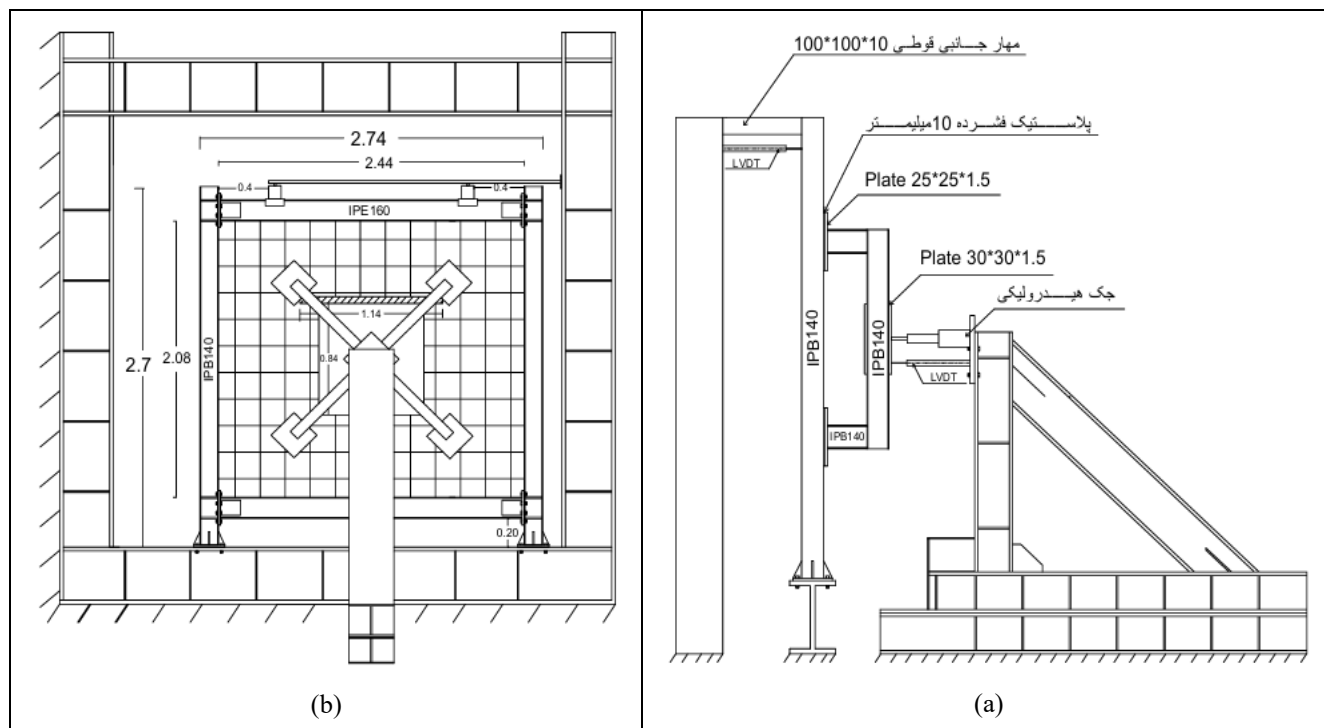
شماره‌ی نمونه	نام نمونه	میان قاب	شرایط تکیه‌گاهی میان قاب	نحوه‌ی اعمال بار
۱	D1	آجر سفالی	میان قاب چسبیده به قاب	خارج از صفحه
۲	D2	آجر سفالی تقویت شده	میان قاب چسبیده به قاب	خارج از صفحه
۳	D3	آجر سفالی تقویت شده	میان قاب جدا از قاب	خارج از صفحه



شکل ۱: (a) نمونه‌ی D2 میان قاب تقویت شده متکی به قاب. (b) نمونه‌ی D3 میان قاب تقویت شده جدا از قاب.

۲-۲ سیستم انجام آزمایش

آزمایش‌های مربوط به این تحقیق در آزمایشگاه سازه در پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ایران انجام شد. جزئیات اجرای انجام آزمایش شامل مکانسیم بارگذاری، نحوه‌ی مهار جانبی قاب، سیستم اندازه‌گیری تغییر مکان‌های قاب و میان قاب در شکل (۲) نشان داده شده است. جهت جلوگیری از حرکت جانبی تمامی نمونه‌ها، قاب توسط دو عدد قوطی به نمره‌ی ۱۰ و دو عدد نبشی در دو طرف تیر که به تکیه‌گاهی مناسب نصب شده بودند، مهار شدند. تکیه‌گاه پایین سازه تیری کاملاً صلب بوده و از طریق بولت‌هایی به فونداسیون متصل و مهار شده‌اند. نیروی خارج از صفحه نیز توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن به نمونه اعمال می‌شد. جک هیدرولیکی از یک طرف بر روی یک تکیه‌گاه قوی نصب شده بود و از طرف دیگر بار را به نمونه اعمال می‌کرد. به منظور پخش نیروی خارج از صفحه، نیروی جک توسط یک رابط در ۴ نقطه از دیوار در گوشه‌های باز شو در نزدیکی ۱/۴ قطری باز شو تا اتصال تیر به ستون اعمال شد. هر چند که برای توزیع یکنواخت بار خارج از صفحه بر روی سطح دیوار بارگذاری با کیسه هوا نیز رایج است، اما نظر به تشابه نمونه‌های آزمایشگاهی و هدف از انجام این تحقیق که مقایسه نتایج بوده است، روش بارگذاری پیشنهادی نیز قابل استفاده است. طول آزمایش با یک سیستم خودکار نیرو سنج (Loadcell) به صورت مداوم نیروها اندازه‌گیری گردید و به صورت همزمان نیز تغییر مکان خارج از صفحه‌ی میان قاب توسط جابجایی سنج‌های مبدل تشخیص دهنده‌ی متغیر خطی (LVDT) در حین انجام آزمایش ثبت شده است. بارگذاری به صورت نیرو-کنترل و استاتیکی فزاینده با گام‌های حدوداً ۱ کیلونیوتن بود. در نهایت نمودارهای نیرو-تغییر مکان برای تمامی نمونه‌ها بدست آمده و مورد تحلیل قرار گرفته است.

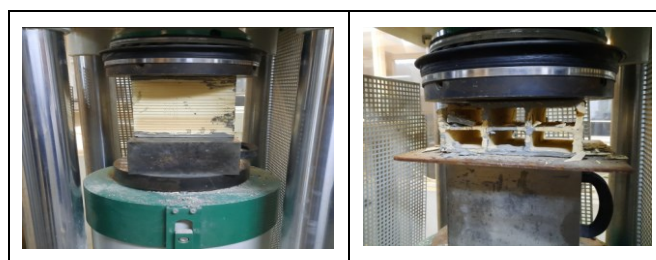


شکل ۲: پیکربندی آزمایش.

۳-۲ مشخصات مصالح نمونه‌ها

در حین ساخت نمونه‌ها مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی نظیر فولاد استفاده شده در ساخت قاب، مصالح بنایی دیوار و بتن یافی مورد بررسی قرار گرفت و مشخصات آنها مطابق جدول شماره ۲ (۲) ارائه گردید.

آجر مورد استفاده از نوع آجر سفالی سبک رایج ایران با وزن مخصوص ۶۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود. میانگین مقاومت فشاری در دو راستای آجر مطابق شکل (۳) برای ۱۰ نمونه به میزان ۱/۵۹ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.



شکل ۳: آزمایش مقاومت فشاری آجر سفالی.

ملات مورد استفاده برای اجرای دیوارها از نسبت حجمی یک به سه (یک حجم سیمان و سه حجم ماسه) در نظر گرفته شد. سیمان مورد استفاده از پرتلند نوع II بود. میانگین مقاومت فشاری ۳ نمونه‌ی مکعبی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C-109-16 [۳۲] به میزان ۱۴/۸۳ مگاپاسکال و برای ۴ نمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر به میزان ۹/۹۸۵ مگاپاسکال بدست آمد.

بر اساس استاندارد ASTM C39/C39M-21 [۳۳] میانگین مقاومت فشاری بتن یافی فولادی، با یافی به طول ۲۵ میلی‌متر و به میزان ۰/۴ درصد وزن حجمی بتن تقویتی، برای ۴ نمونه‌ی استوانه‌ای به ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر به میزان ۱۹/۱۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

میزان میانگین مقاومت کششی ملات برای ۴ نمونه به ابعاد $40 \times 40 \times 160$ بر اساس استاندارد ASTM 348_21 [۳۴] به میزان $4/22$ مگاپاسکال و برای ۲ نمونه بتن الیافی به ابعاد $100 \times 100 \times 400$ میلی متر بر اساس استاندارد ASTM C1609/C1609M-12 [۳۵] به میزان $3/33$ مگاپاسکال اندازه گیری گردید. در مطالعات تحلیلی می توان به طور حدودی میزان مقاومت کششی آجر نیز ۱۰ درصد مقاومت فشاری آن در نظر گرفت [۳۶].

بر اساس آزمایش کشش انجام شده بر روی فولادهای مصرفی، فولاد مقطع IPE دارای تنش تسلیم به میزان $332/64$ مگاپاسکال، تنش نهایی $481/5$ مگاپاسکال، کرنش تسلیم $0/00166$ و کرنش نهایی $0/154$ و برای فولاد با مقطع IPB دارای تنش تسلیم به میزان $310/4$ مگاپاسکال، تنش نهایی $408/899$ مگاپاسکال، کرنش تسلیم $0/00155$ و کرنش نهایی $0/16$ محاسبه گردید.

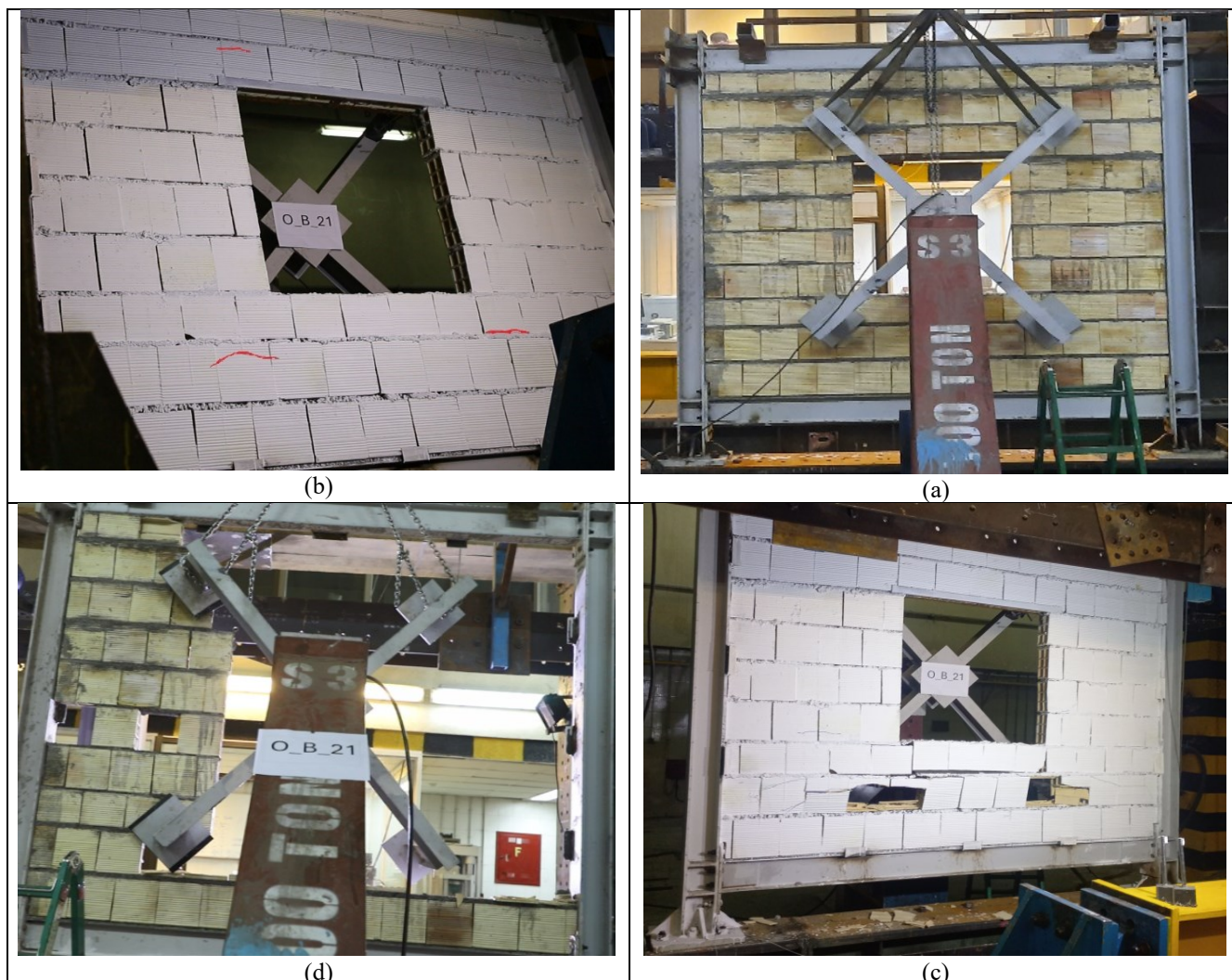
جدول ۲: مشخصات مصالح میان قاب

مصالح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
آجر	۱/۵۹	-
ملات	۱۴/۸۳	۴/۲۲
بتن الیافی	۱۹/۱۵	۳/۳۳

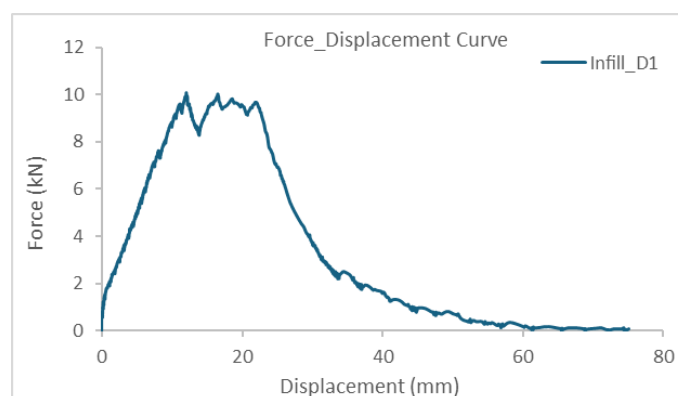
۳- نتایج آزمایش

۳-۱ عملکرد نمونه D1

نمونه ی اول (D1)، میان قاب غیر مسلح بازشودار بوده که به طور کامل به قاب فولادی متصل بود. نتایج این نمونه به عنوان نمونه ی مرجع در نظر گرفته شد. برای بررسی بهتر رفتار میان قاب ها در حین بارگذاری، وجه مقابل بارگذاری با رنگ سفید پوشانده شد تا شروع ترک ها و گسترش آنها به وضوح قابل رویت باشد. شکل (۴) نمونه ی D1، نحوه ی بارگذاری، شروع و گسترش ترک ها و خرابی میان قاب در حین انجام آزمایش را نشان می دهد. همان گونه که قبلاً نیز شرح داده شد بارگذاری به صورت افزایشی با گام حدود یک کیلونیوتن بوده و تغییر مکان ها نیز از طریق جابجایی سنج ها اندازه گیری و به صورت لحظه ای ثبت گردید. نمودار نیرو-تغییر مکان مطابق شکل (۵) برای میان قاب ترسیم گردید. بر این اساس حداکثر مقاومت میان قاب مصالح بنایی قبل از تقویت $10/1$ کیلونیوتن می باشد. طبق مشاهدات انجام شده در حین انجام آزمایش، شروع اولین ترک در نیروی خارج از صفحه به میزان $9/5$ کیلونیوتن و بر روی قطر میان قاب در مجاورت باز شو (به ویژه در نیمه ی پایینی دیوار) پدیدار شد. پس از آن ضمن باربری میان قاب و افزایش نیروی خارج از صفحه، ترک مورد نظر گسترش یافته و در نیرویی معادل $9/62$ کیلونیوتن در تغییر مکانی به میزان 11 میلی متر میان قاب باربری خود را از دست داد. در ادامه نیز در نیرویی معادل $10/1$ کیلونیوتن خرابی میان قاب با خرد شدن موضعی آجرها در تغییر مکان خارج از صفحه به میزان $22/1$ میلی متر در میان قاب ضمن گسترش خرابی، افت محسوسی در ظرفیت باربری میان قاب رخ داده و همان طور که در شکل c-۴ نشان داده شده به دلیل افزایش خرابی در نقاط مختلف میان قاب، کاهش در مقاومت آن را به دنبال داشته و با سیر روندی نزولی در نیروی وارده، تغییر مکان خارج از صفحه ی قابل توجهی در میان قاب مشاهده گردیده و در نهایت با ریزش قسمتی از میان قاب آزمایش متوقف شد و این موضوع در نمودار نشان داده شده در شکل (۵) به وضوح قابل درک است. از موارد قابل تامل در این نمونه، خرابی موضعی بلوک های سفالی در برخی نقاط میان قاب بود. ترک خوردگی و خرابی ها بیشتر در نقاط اطراف باز شو و همچنین در محدوده ی اتصال میان قاب به تیر بالایی رخ داد. در این نمونه تغییر مکان متناظر با ایجاد اولین ترک بر روی آجر سفالی Δy برابر 11 میلی متر و حداکثر تغییر مکان Δu متناظر با 80 درصد مقاومت نهایی در شاخه نزولی منحنی ظرفیت برابر $23/6$ میلی متر بود.



شکل ۴: نمونه‌ی D1. (a) نمایی از بارگذاری. (b) شروع ترک در میان قاب. (c) شروع خرابی در میان قاب. (d) فروریزش میان قاب.

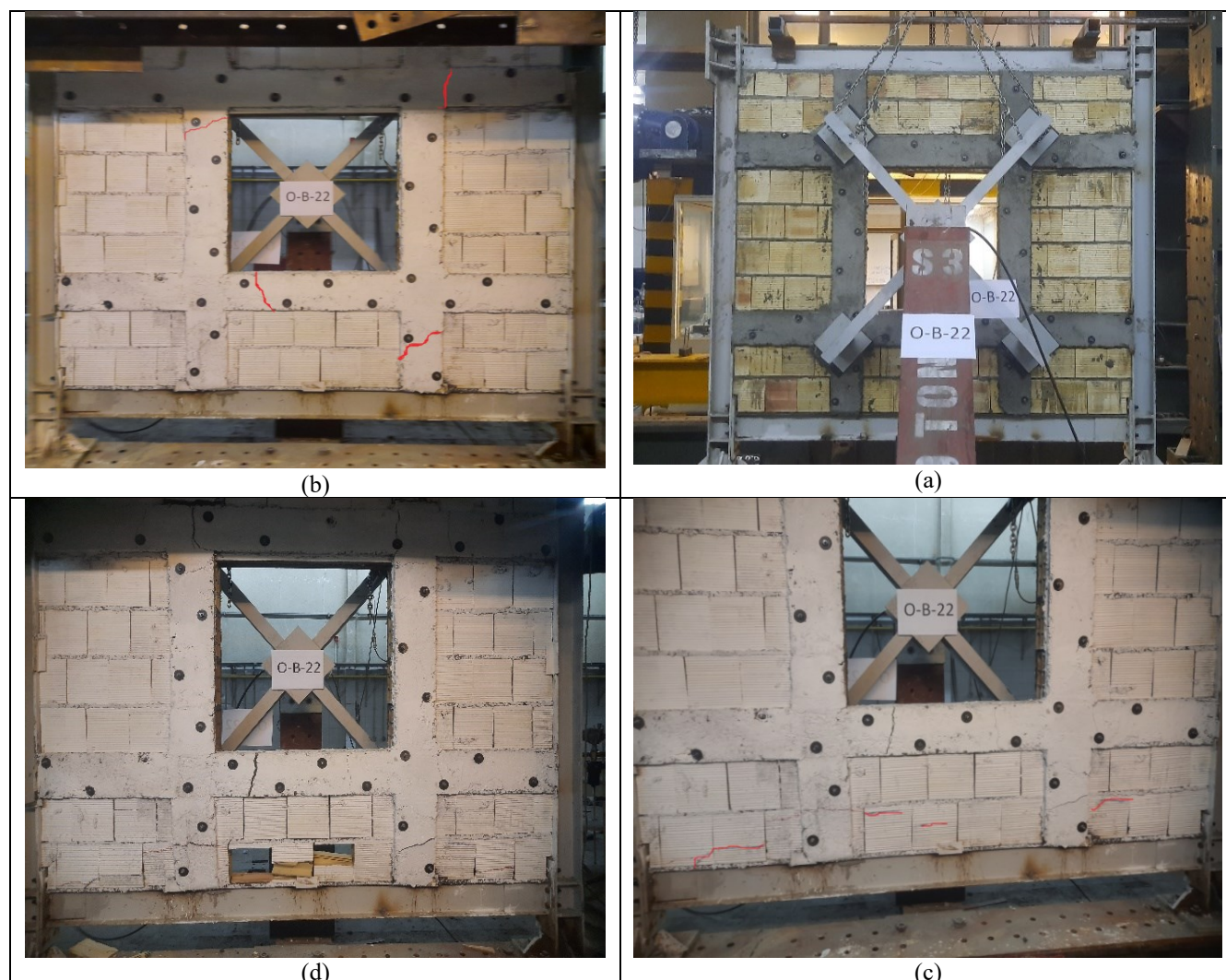


شکل ۵: نمودار نیرو-تغییر مکان میان قاب.

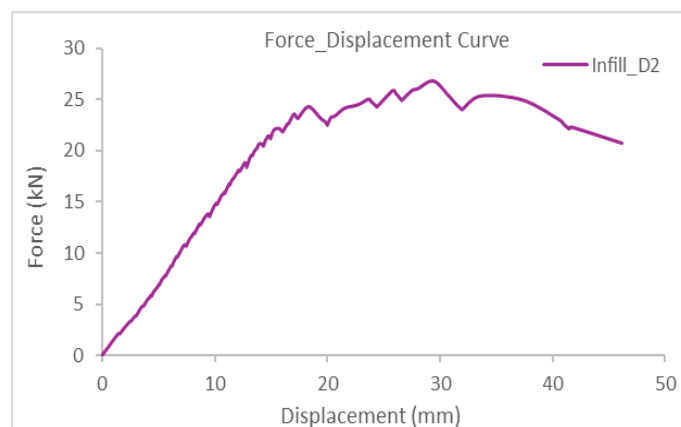
۲-۳ عملکرد نمونه‌ی D2

نمونه‌ی دوم (D2)، قاب فولادی دارای میان قاب آجری بازشودار تقویت شده با نوارهای بتن الیافی به عرض ۲۰۰ و به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در هر دو طرف میان قاب در نظر گرفته شد. در ساخت این نمونه نیز میان قاب و رویه‌ی تقویتی به طور کامل به قاب متصل شده

است. همچنین نحوه ی بارگذاری، شروع ترک ها و توسعه ی خرابی میان قاب در شکل (۶) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که ثبت نتایج در این نمونه نیز مانند نمونه ی قبل در نظر گرفته شد. نمودار نیرو-تغییر مکان میان قاب در شکل (۷) نمایش داده شده است. بر این اساس شروع خرابی و گسترش آن، ظرفیت باربری، میزان شکل پذیری و نحوه ی خرابی میان قاب در این نمونه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. طبق مشاهدات انجام شده، شروع اولین ترک در میان قاب بر روی نوار بتنی در باری معادل $18/83$ کیلونیوتن مطابق شکل ۶-b بود. تغییر مکان خارج از صفحه ی متناظر میان قاب با این نیرو به میزان $16/71$ میلی متر اندازه گیری شد. در باری معادل $23/55$ کیلونیوتن ترک ها مطابق شکل ۶-c در بخش بنایی و آجرها مشاهده شد و تغییر مکان میان قاب به میزان $18/8$ میلی متر افزایش پیدا کرد. این درحالی است که با افزایش نیرو، گسترش ترک ها در میان قاب اتفاق افتاد تا اینکه با اعمال باری به میزان $26/78$ کیلونیوتن مطابق شکل ۶-d خرد شدن آجرها شروع شد و تغییر مکان میان قاب در آن لحظه به میزان $33/4$ میلی متر اندازه گیری و ثبت گردید. از این نقطه به بعد، کاهش نیروی خارج از صفحه و افزایش تغییر مکان میان قاب اتفاق افتاد و در یک لحظه در باری معادل $20/72$ کیلونیوتن و با تغییر مکانی به میزان $46/11$ میلی متر ریزش میان قاب و افت شدید مقاومت مشاهده گردید. در مقایسه با نمونه ی مرجع، نتایج حاصل از آزمایش بهبود قابل توجه مقاومت خارج از صفحه را نشان می دهد. در این راستا ظرفیت باربری میان قاب تقویت شده توسط نوارهای بتن الیافی تا مقدار $26/78$ کیلونیوتن افزایش پیدا نمود. ضمناً در این نمونه خرابی کامل دیوار به طور ناگهانی و همزمان رخ داد. نقطه ی تغییر مکان متناظر با ایجاد اولین ترک بر روی آجر سفالی Δy برابر $18/8$ میلی متر و حداکثر تغییر مکان Δu متناظر با 80 درصد مقاومت نهایی نمونه در شاخه نزولی برابر $44/1$ میلی متر بود.



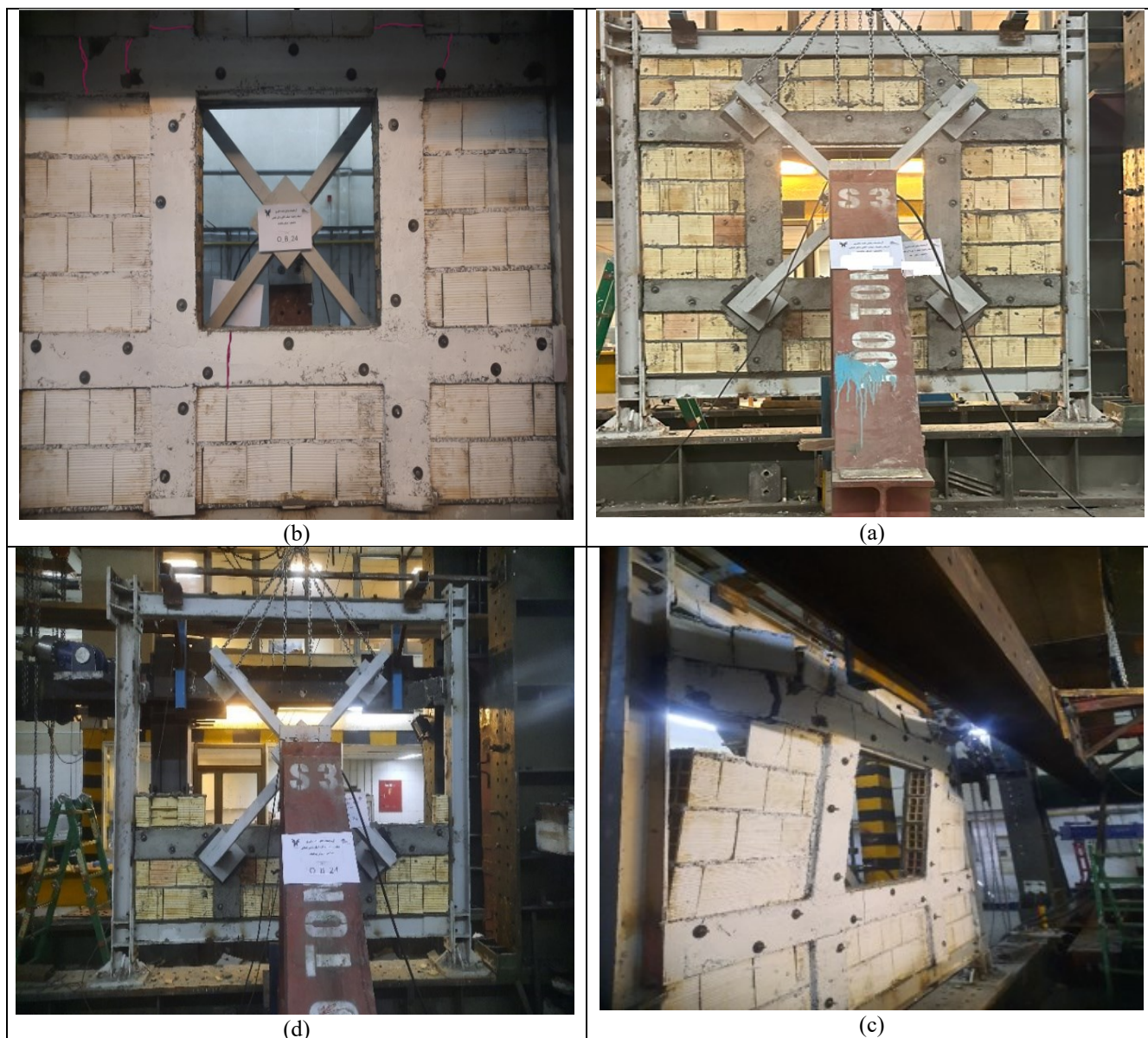
شکل ۶: نمونه ی D2. (a) نمایی از بارگذاری. (b) شروع ترک بر روی نوار بتنی. (c) شروع ترک بر روی آجرها. (d) خرد شدن آجرها.



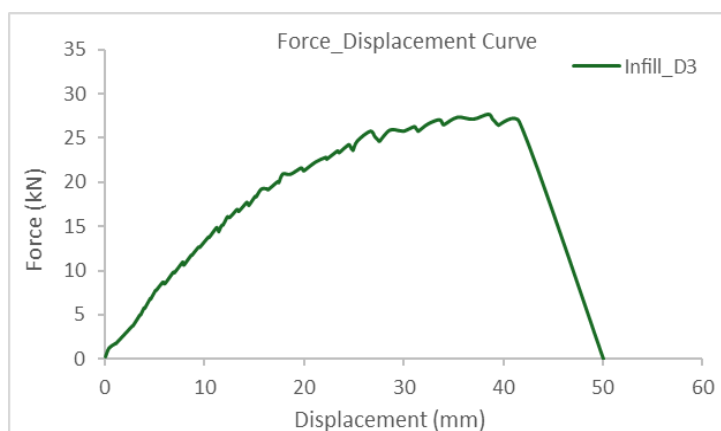
شکل ۷: نمودار نیرو-تغییر مکان میان قاب.

۳-۳ عملکرد نمونه‌ی D3

نمونه‌ی سوم (D3)، قاب فولادی دارای میان قاب آجری بازشودار تقویت شده با نوارهای بتن الیافی (مشابه نمونه‌ی قبلی) بود که در آن میان قاب همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است از سه طرف جدا از قاب و مهار خارج از صفحه‌ی آن نیز مشابه با نمونه‌ی قبلی انجام گردید و تحت آزمایش خارج از صفحه قرار گرفت. روند بارگذاری و ثبت نتایج در این نمونه نیز مانند نمونه‌های قبلی صورت گرفت و نمودار نیرو-تغییر مکان مطابق شکل (۹) ترسیم گردید. شروع و گسترش ترک‌ها، ظرفیت باربری، میزان شکل‌پذیری و نحوه‌ی خرابی میان قاب مورد بررسی قرار گرفت. مطابق شکل ۸-b شروع اولین ترک در بتن الیافی در باری معادل ۱۶/۹۶ کیلونیوتن رویت گردید که تغییر مکان خارج از صفحه‌ی میان قاب ۱۳/۲۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. با افزایش بار وارده به میزان ۱۷/۴۹ کیلونیوتن شروع ترک بر روی آجرها اتفاق افتاد و تغییر مکان خارج از صفحه‌ی آن نیز به میزان ۱۴/۳۹ میلی‌متر ثبت گردید. مطابق شکل ۸-c خرابی موضعی اتفاق افتاد و با کاهش نیرو، تغییر مکان‌ها و تغییر شکل‌ها افزایش پیدا نمود و در باری معادل ۲۶/۸۸ کیلونیوتن خرابی میان قاب در بالای نوار بتنی الیافی افقی پایین به طور کامل همان‌طور که در شکل ۸-d نمایش داده شده است اتفاق افتاد. در مقایسه‌ی این نمونه با نمونه‌های قبلی، نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری میان قاب تا مقدار ۲۷/۷۴ کیلونیوتن افزایش پیدا نمود است. ضمناً در این نمونه شاهد خرابی ناگهانی نیز بودیم. نقطه تغییر مکان متناظر با ایجاد اولین ترک بر روی آجر سفالی Δy برابر ۱۴/۳۹ میلی‌متر و حداکثر تغییر مکان Δu برابر ۴۱/۶۱ میلی‌متر بود.



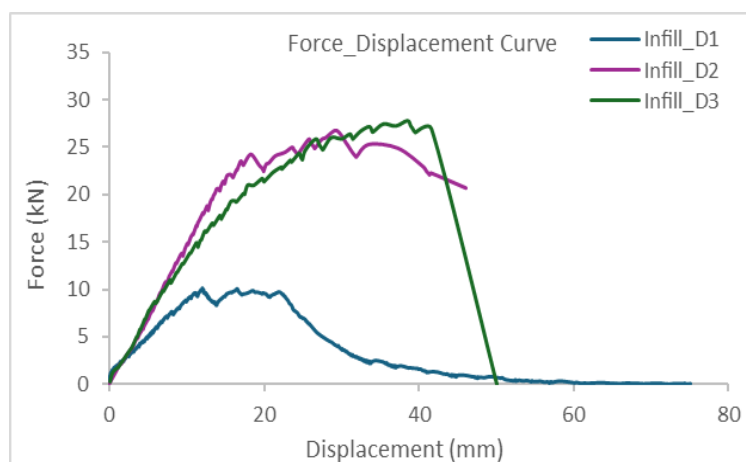
شکل ۸: نمونه‌ی D3. (a) نمایی از بارگذاری. (b) شروع ترک بر روی نوار بتنی. (c) خرابی موضعی میان قاب. (d) خرابی بالا نوار بتنی افقی پایین.



شکل ۹: نمودار نیرو-تغییر مکان میان قاب.

۴- تحلیل پاسخ و مقایسه‌ی نتایج

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است رفتارهای میان‌قاب در هر سه نمونه به خوبی قابل مقایسه می‌باشند. در مقایسه‌ی نمونه‌ی D1 با نمونه‌های D2 و D3 نتایج نشان می‌دهد که تقویت میان‌قاب‌ها با بتن الیافی فولادی، باعث افزایش سختی اولیه، مقاومت تسلیم، ظرفیت باربری نهایی و ظرفیت تغییرشکل‌های غیرخطی میان‌قاب‌ها شده است. این امر نشان می‌دهد که نوارهای بتن الیافی به خوبی توانسته‌اند نقش مسلح‌کننده برای میانقاب‌های غیرمسلح را ایفا کرده و باعث بهبود مقاومت و سختی خارج از صفحه آنها شوند. همچنین جدا نشدن رویه بتنی از دیوار تا مراحل انتهایی بارگذاری که ناشی از عملکرد مطلوب مهارهای مورد استفاده بود نیز در این بهبود موثر است. پایداری نسبی میانقاب تقویت شده تحت بار خارج از صفحه نشان می‌دهد که رویه بتنی مسلح شده با الیاف توانسته است پایداری در میانقاب با وجود گسترش ترک‌های کششی و فشاری در واحدهای بنایی را ایجاد کند. در مقایسه‌ی نمونه‌ی D2 با نمونه‌ی D1، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد سختی اولیه حدود ۲۴۹٪ و ظرفیت باربری نهایی حدود ۲۶۵٪ افزایش پیدا کرده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ی D3 با نمونه‌ی D1 نیز نشان می‌دهند که سختی اولیه حدود ۱۸۰٪ و ظرفیت باربری نهایی حدود ۲۷۵٪ در میانقاب افزایش پیدا کرده است. در مقایسه‌ی نمونه‌ی D3 با نمونه‌ی D2 بررسی‌ها نشان می‌دهد سختی اولیه به میزان ۲۵/۷۳٪ کاهش، ظرفیت باربری نهایی هر دو نمونه تقریباً مشابه است. این نتایج نشان می‌دهد که این شیوه تقویت نه تنها در بهبود رفتار خارج از صفحه میانقاب‌های موجود که به طور کامل به قاب پیرامونی متصل می‌باشند موثر است، بلکه می‌تواند به عنوان یک روش برای پایدارسازی میانقاب‌های سازه‌های جدید که بر اساس دستورالعمل‌های موجود با فاصله‌ای از قاب پیرامونی اجرای می‌شود قابل کاربرد است. پاسخ متناظر برای هر نمونه در جدول شماره‌ی (۳) ارائه گردیده است.



شکل ۱۰: نمودار نیرو-تغییر مکان میان‌قاب کل نمونه‌ها.

جدول شماره‌ی ۳: مقادیر کلیدی رفتار نمونه‌ها

نمونه	سختی اولیه (کیلو نیوتن بر میلی‌متر)	نیروی متناظر با ایجاد اولین ترک مشهود (کیلو نیوتن)	تغییر شکل خارج از صفحه متناظر با ایجاد اولین ترک مشهود (میلی‌متر)	بار نهایی (کیلو نیوتن)	تغییر مکان متناظر با بار نهایی (میلی‌متر)	ظرفیت تغییر شکل خارج از صفحه میان‌قاب
D1	۰/۰۱	۹/۵۰	۱۱/۰۰	۱۰/۱۰	۱۲/۰۶	۲۳/۶۰
D2	۰/۲۴	۲۳/۵۵	۱۸/۸۱	۲۶/۷۸	۳۳/۴۰	۴۴/۱۱
D3	۰/۱۸	۱۷/۴۹	۱۴/۴۱	۲۷/۷۴	۳۸/۴۶	۴۱/۶۱

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، در یک روند آزمایشگاهی بررسی رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌ها با قاب فولادی در حالت‌های مختلف چسبیده به قاب و جدا از آن با طرح تقویتی ارائه شده مورد آزمایش و مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های آزمایش شده شامل، میان‌قاب آجری متصل به قاب، میان‌قاب آجری تقویت شده با بتن الیافی فولادی متصل به قاب و میان‌قاب آجری تقویت شده با بتن الیافی فولادی ولی جدا از قاب بودند. نمونه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی فزاینده خارج از صفحه قرار گرفتند. مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح ذیل می‌باشند.

۱- تقویت میان‌قاب‌های بنایی با استفاده از نوارهای بتن مسلح الیافی فولادی به طور موثری باعث بهبود رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌ها شده است. این بهبود رفتار در ظرفیت باربری، سختی خارج از صفحه، و ظرفیت تغییرمکان خارج از صفحه مشهود است. از این رو روش مذکور می‌تواند، هم به عنوان یک روش تقویتی برای میان‌قاب‌های موجود و نیز یک روش پایداری برای میان‌قاب‌های جدید مطرح گردد.

۲- تقویت نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت تسلیم میان‌قاب به میزان $247/9\%$ برای نمونه D2 و $184/1\%$ برای نمونه D3 گردید.

۳- شرایط مرزی میان‌قاب در نمونه‌های مورد بررسی تاثیر چشم‌گیری بر رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌های تقویت شده نداشت.

۴- تقویت نمونه‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی میان‌قاب به میزان 265% برای نمونه D2 و $274/6\%$ برای نمونه D3 گردید.

۵- در نمونه‌های D2 و D3 به ترتیب شکل‌پذیری $22/1\%$ و $43/95\%$ در مقایسه با نمونه D1 افزایش پیدا نمود. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌ی D3 در مقایسه با بقیه‌ی نمونه‌ها شکل‌پذیری و ظرفیت باربری بیشتری داشته و می‌تواند انرژی بیشتری از نیروی خارج از صفحه‌ی وارده بر میان‌قاب را مستهلک نماید و همچنین دارای ایمنی جانی بالایی می‌باشد.

۶- هیچ‌گونه آسیب در قاب فولادی به دلیل اعمال نیروی خارج از صفحه مشاهده نگردید.

در نهایت پس از بررسی رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌ها، نتایج نشان می‌دهد که تقویت میان‌قاب می‌تواند موجب افزایش ظرفیت باربری، سختی خارج از صفحه‌ی میان‌قاب، مستهلک نمودن انرژی بیشتر و همچنین افزایش ایمنی جانی برای ساکنین گردد.

قدردانی

لازم است از پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و تمامی عزیزانی که در مسیر انجام پژوهش حمایت‌های خود را دریغ نمودند صمیمانه قدردانی شود.

مراجع

- [1] Noorifard, A. (2017). *Presenting a Model for positioning and Determining the Geometric Characteristics of Non-Structural Walls in the Final Stages of Basic Architectural Basic Design to Improve the Seismic Behavior of Building, a Study of Mid-Rise Housing in Tehran*. Phd Dissertation in Architecture, Faculty of Architectural and Urban Engineering, University of Science and Industry.
- [2] Noorifard, A. Tabeshpour, M. Mehdizadeh Saradj, F. (1394). Investigating the Seismic Performance of Infills Made of Common Materials Based on Seismic Test Results. *Research paper on seismology and earthquake engineering*, Vol. 18, No. 3. 13-32.
- [3] Veysi Nejad, A. Rasoulan, A. (2012). Investigating the Effective Parameters in the Behavior of Masonry Infill in Steel Buildings. In: *9th International Congress on Civil Engineering*. Isfahan: University of Isfahan Industrial 19-21.
- [4] Mohammadi, M. (2016). *Influences of Infills on Building Structures*. Tehran: University of Sharif Industrial, Scientific Publishing Institute, 183-208.
- [5] Kahrizi, M. Tahamoli Roudsari, M. (2020). An Experimental Study of Common Methods of Bracing Masonry Infill Walls to Steel Frames in Iran. *Journal of Earthquake Science and Engineering*, Vol 7 (Issue 1), 107-121.

- [6] Mander, J. Aycardi, L. E. Kim, D. K. (1994). Physical and Analytical Modeling of Brick Infilled Steel Frame. NCEER-94-0004.
- [7] Youssef, N. (1994). The Influence of Modeling Assumptions on The Predicted Behavior of Unreinforced Masonry Infill Structures. NCEER-94-0004, 1-39 to 1-44.
- [8] Angel, R. Abrams, D. P. (1994). Out of Plane Strength of URM Infill Panels. NCEER-94-0004, 1-9 to 1-14.
- [9] De Felice, G. Giannini, R. (2001). Out of Plane Seismic Resistance of Masonry Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5. No. 2.
- [10] Recep, K. Ergin, A. (2005). Experimental Assessment of the Siesmic Behavior of Load-Bearing Masonry Wall Loaded Out-of-Plane. *Turkish Journal of Engineering and Enviromental Science*.
- [11] Giriffth, M. C. Magenes, G. Melis, G. Picchi, L. (2003). Evaluation of Out-Of-Plane Stability of Unreinforced Masonry Walls Subjected to Siesmic Excitation. *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1080/13632460309350476.
- [12] Fardis, M. N. Bousiasl, S. N. Franchioni, G. Panagiotakos, T. B. (1999). Seismic Response and Design of RC Structures Wi th Plan-Eccentric Masonry Infills. *Earthquake engng and Struct.Dyn*, Vol. 28, 173-191.
- [13] Flanagan, R. D. Tenbus, M. A. Bennett, R. M. (1994). *Numerical Modelling of Clay Tile Infills*. NCEER-94-0004, 1-63 to 1-68.
- [14] Akhondi, F. Vasconcelos, G. Lourenco, p. Silva, L. (2016). Out-of-plane Response of Masonry Infilled RC Frames: Effect of Workmanship and Opening. *Brick and Block Masonry – Trends, Innovations and Challenges – Modena, da Porto & Valluzzi (Eds) © 2016 Taylor & Francis Group, London*, ISBN 978-1-138-02999-6.
- [15] Bangi, A. Ilker, K. Sabahattin, A. Meryam, B. (2016). The Out-of-Plane Bending Behavior of Brick Infill Walls Strengthened with Perforated Steel Plates. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII, 429-435.
- [16] Akhondi, A. Graca, V. Paulo, L. (2018). Experimental Out-Of-Plane Behavior of Brick Masonry Infilled Frames. *International Journal of Architectural Heritage*. Vol. 14, 221-237.
- [17] Keyvani Burojeni, A. Mahdi, T. (2018). In-Plane Effect on Out-of-Plane Capacity of Separated Infill Wall. *Numerical Methods in Civil Engineering*, Vol. 3, No. 1.
- [18] Mariano, D. D. Paolo, R. Gerardo, M. V. April (2019). Predicting the Out-Of-Plane Seismic Strength of Unreinforced Masonry Infill Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 25, Issue 10, pp. 1819–184.
- [19] Kahrizi, M. Tahamouli Roudsari, M. (2020). Experimental Investigation of Conventional Methods of Anchoring Masonry Infills to Steel Frames in Iran. *Journal of Earthquake Science and Engineering*, Vol 7 (Issue 1), 107-121.
- [20] Milanesi, R. R. Morandi, P. Manzini, C. F. Albanesi, L. Manges. G. (2020). Out-of-plane Response of an Innovative Masonry Infill with Sliding Joints from Shaking Table Tests. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 26, 1789-1823.
- [21] Mariano, D. D. Paolo, R. Gerardo, M. V. (2020). Experimental Assessment of the Influence of Boundary Conditions on the Out-of-Plane Response of Unreinforced Masonry Infill Walls. *Journal of Earthquake Engineering*, Volume 24.
- [22] Hejazi, M. Nazeri, S. (2021). Out-of-Plane Behaviour of Brick Masonry Infilled Walls with Openings Stiffened with FRP Strips in Reinforced Concrete Frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8 (Special Issue 2), 465-491.
- [23] Zhou, Y. Chen, Z. Zhong, G. Zhang, Y. C. Li, D. (2021). Experimental study on out-of-plane behaviour of an infilled masonry wall with damping layer joint. *Engineering Structures*. Volume 246, 112993.
- [24] Furtato, A. Arede, A. Rodrigues, H. Varum, H. (2021). The role of the openings in the out-of-plane behaviour of masonry infill walls. *Engineering Structures*. Volume 244. 112793.
- [25] Jin, W. Zhai, Ch. Zhang, M. Liu, W. Wei, Y. Xie, L. (2023). Experimental investigation on the in-plane and out-of-plane interaction of isolated infills in RC frames. *Engineering Structures*. Volume 293, 116569.
- [26] Chen, D. Wu, H. Fang, Q. Wei, J. S. Xu, S. L. (2023). Out-of-plane behaviors of unreinforced and spray polyurea retrofitted one-way masonry infilled walls. *Journal of Structural and Construction Engineering*. Volume 67, 106006.

- [27] Majdabadi Farahani, E. Yekrangnia, M. Liberatore, L. (2023). In-plane, out-of-plane, and in-plane/out-of-plane interactional behavior of masonry-infilled steel MRFs with different frame components flexibilities and considering openings. *Journal of Building Engineering*. Volume 74, 106899.
- [28] Gkourmelos, P. D. Triantafillou, T. C. (2023). Out-of-Plane Behavior of In-Plane Damaged Masonry Infills Retrofitted with TRM and Thermal Insulation. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 27, No. 6: 04023054.
- [29] Bayrami Azar, S. Emami Azadi, M. (2024). Experimental and numerical investigation of the out-of-plane reinforced masonry infill panels. In: *4th National Conference on Civil Engineering, Intelligent Development, and Sustainable Systems*. In University of Golestan. PP 312 – 319. CEIDSS04_137.
- [30] Morandi, P. Kurukulasuriya, M. Milanese, R. R. Bolognini, D. Grottoli, L. Dacarro, F. Magenes, G. (2025). Dynamic shaking table out-of-plane tests on weak masonry infills with and without previous in-plane loading. *Journal of Building Engineering*. Vol 297.
- [31] Ren, X. Lu, L. Yang, R. (2025). Full scale test study on out-of-plane flexural behavior of masonry wall retrofitted with reinforced concrete. *Structures*. Volume 80, 109789.
- [32] ASTM C109/C 109M – 07. (2007). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50-mm] Cube Specimens). American Society for Testing and Materials.
- [33] ASTM C39/C39M-21. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [34] ASTM C348-21. (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- [35] ASTM C1609/C1609M-12. (2012). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).
- [36] Combesure, D., and Pegon, P. (2000) Application of the local-to-global approach to the study of infilled frame structures under seismic loading. *Nuclear Engineering and Design*, 196(1), 17-40.