

Experimental Study on the Behavior and Retrofit of Clay Block Infill Frames under Out-of-Plane Loading Using Alkali-Resistant Glass Fiber

Mohammad Javad Zarei¹, Farnoosh Basaliqeh², Jalil Shafaei^{3*} 

1. M.Sc. Student, department of civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Assistant Professor, Department of civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
3. Corresponding Author, Associate Professor, Department of civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract

Performance assessment of reinforced concrete frames with clay block infills during recent earthquakes, particularly the devastating 2017 Kermanshah (Sarpol-e Zahab) earthquake, demonstrates the significant vulnerability of these common structural systems. Analysis of the resulting damage indicates that most failures stem from inadequate anchoring or complete lack of proper restraint in the infills. This structural weakness has led to extensive economic damage and in some cases, loss of life. Considering the widespread use of this structural system in existing buildings, developing efficient, economical, and implementable retrofitting solutions to enhance their seismic performance is of high importance. The present research aims to develop and evaluate a novel method for retrofitting clay block infills using alkali-resistant glass fiber technology. The effectiveness of this strengthening technique has been assessed through precise out-of-plane loading tests. The proposed retrofitting approach relies on alkali-resistant glass fibers, selected for their favorable durability characteristics in concrete's alkaline environment, appropriate mechanical properties, and optimal cost-to-performance ratio. In this experimental study, three 1:2 scale reinforced concrete frame specimens were designed, constructed, and subjected to standard loading protocols, consisting of: A concrete frame with clay block infill having a two-centimeter gap from columns on each side (representing typical construction practice), A concrete frame with separator wall posts and clay block infill placed two centimeters from columns (representing an improved conventional method), A concrete frame with wall posts where the infill section is strengthened with alkali-resistant glass fibers (representing the proposed method). For specimen construction, steel formwork with 2mm thick metal sheets was designed and fabricated in the structural laboratory. All construction phases including cutting, bending, and welding were performed with high precision at 1:2 scale proportional to actual specimens at the Shahrood University of Technology's structural laboratory. Importantly, the specimens were constructed according to common building practices, with concrete pouring sequenced from foundation to columns and finally beams to simulate real construction conditions. Standard perforated clay blocks measuring 25×20×10 centimeters were used without scaling to eliminate potential scale effects on mechanical behavior. All structural design and construction details for the reinforced concrete frame complied with Chapter 9 of the Iranian National Building Code. The main innovation of this study, beyond the strengthening method itself, lies in the approach to specimen construction following actual industry practices, making the results more applicable to real-world conditions. An advanced measurement system including high-precision linear variable displacement transducers (LVDTs) was employed to record the complete response of specimens throughout testing. Analysis of test results demonstrated that the specimen reinforced with alkali-resistant glass fibers showed significant improvement in seismic performance compared to the other two specimens. Specifically, this strengthening system provided: Increased lateral load-bearing capacity by up to 110% compared to specimens with infill with boundary conditions and infill with wall posts. Enhanced ductility (displacement capacity) by up to 150% compared to non-strengthened specimens. Transformation of failure behavior from brittle and sudden to soft and ductile failure. Progressive and gradual material deterioration instead of sudden collapse. The proposed strengthening method, given its ease of implementation, reasonable cost, and desirable performance, can serve as an effective solution for retrofitting existing buildings with reinforced concrete frame systems with clay block infills in seismic regions.

Review History

Received: May 3, 2025

Revised: Oct 8, 2025

Accepted: Jun 21, 2026

Keywords

Reinforced concrete frame

Clay block

Out-of-plane loading

Infill

Glass fiber

Clay block

* Corresponding Author Email: jshafaei@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7590-4042



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

مطالعه آزمایشگاهی بررسی رفتار و بهسازی میانقاب‌های بلوک سفال در بارگذاری خارج از صفحه با استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا

محمدجواد زارعی^۱، جلیل شفافی^{۲*}، فرنوش باسلیقه^۳

Comment [WU]: ترتیب اسم‌ها با انگلیسی یکی نیست کدام درست است؟

۱. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

عملکرد قاب‌های بتن مسلح با میانقاب بلوک سفال در زلزله‌های اخیر، به‌ویژه زلزله سال ۱۳۹۶ کرمانشاه (سرپل ذهاب)، نشان‌دهنده خسارات قابل توجهی بوده که بیشتر ناشی از مهار نامناسب یا فقدان مهار مناسب در میانقاب‌ها است. برای رفع این مشکل، بهسازی میانقاب‌ها با استفاده از مش ضروری می‌باشد. کارایی این روش تقویتی از طریق آزمایش‌های بارگذاری خارج از صفحه قابل ارزیابی است. مطالعه حاضر با هدف ارائه راهکاری برای بهسازی میانقاب‌های بلوک سفال با استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا انجام شده است. در این مطالعه، سه نمونه قاب بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ مورد آزمایش قرار گرفتند: سه نوع قاب بتنی بررسی شد: اول، قاب میان‌پر با بلوک سفال که دارای فاصله دو سانتی‌متری از ستون است؛ دوم، قاب بتنی مجهز به والپست جداکننده همراه با میانقاب بلوک سفال که همچنین دارای فاصله دو سانتی‌متری از ستون می‌باشد؛ و سوم، قاب بتنی با والپست که بخش میانقاب آن با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا تقویت شده است. بلوک‌های سفال سوراخ‌دار مورد استفاده در ابعاد استاندارد ۲۵×۲۰×۱۰ سانتی‌متر بوده. برای تقویت سازه، از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا استفاده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه تقویت‌شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا در مقایسه با نمونه‌های میانقاب با شرایط مرزی و میانقاب با والپست، مقاومت در برابر نیروهای خارج از صفحه را تا ۱۱۰ درصد و جابه‌جایی تا ۱۵۰٪ افزایش می‌دهد. این روش علاوه بر تغییر رفتار میانقاب از شکست ترد به شکست نرم باعث تخریب تدریجی مصالح خواهد شد.

کلمات کلیدی

قاب بتن مسلح
بلوک سفال
بارگذاری خارج از صفحه
میانقاب
الیاف شیشه

۱- مقدمه

راهکارهای مؤثری در برابر کنترل فروریزش و منهدم شدن میانقاب در سازه هستند. شبکه الیاف با حفظ یکپارچگی دیوار از ترک‌خوردگی ناگهانی جلوگیری می‌کند. درحالی‌که لایه شانکریت مقاومت فشاری و برشی را افزایش می‌دهد [1]. دستاورد اولیه تحقیقات در سال (۱۹۵۱) نشان داد که شکست دیوارهای بنایی به جای خمش، از نوع فشاری و

زلزله ۷/۳ ریشتری سرپل ذهاب (۱۳۹۶) نشان داد بیشتر خسارات و تلفات از فروریزش اجزای غیرسازه‌ای، به ویژه میانقاب‌های راه‌پله، رخ داده است. مسدود شدن راه‌های خروج اضطراری توسط آوار، اهمیت طراحی، اجرا و تقویت این بخش‌ها را آشکار می‌کند. روش‌های نوین تقویت مانند سیستم الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا،

* رایانامه نویسنده مسئول: jshafaei@shahroodut.ac.ir - ORCID: 0000-0002-7590-4042

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



ناشی از عملکرد قوسی است. پنج سال بعد، مک‌داول و همکاران^۱ بیان کردند که مقاومت بالای دیوارهای بنایی (شش برابر دال‌های ساده) ناشی از نیروهای فشاری عملکرد قوسی است و اولین معادله محاسبه مقاومت نهایی خارج از صفحه را با لحاظ این اثر ارائه دادند [2].

استاد و همکاران^۲ (۲۰۲۵) رفتار برشی قطری دیوارهای پرکننده ساخته شده از بلوک‌های سفالی توخالی با سوراخ‌های افقی، مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده روی ۲۱ نمونه نشان داد که پوشش‌های دوطرفه گچی تا ۵۳ درصد و پوشش‌های دوطرفه سیمانی تا ۴۲۴ درصد افزایش مقاومت برشی نسبت به نمونه‌های مرجع ایجاد می‌کنند [3]. استاد و همکاران (۲۰۲۵) در پژوهشی آزمایشگاهی شامل ۳۳ آزمایش کشش قطری مطابق استاندارد ASTM E519 رفتار برشی دیوارهای میان‌قاب بنایی ساخته شده از بلوک‌های سفالی توخالی در سه حالت شاهد، تقویت شده با پوشش سیمان و گچ، و تقویت شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا موجب بهبود قابل توجه ظرفیت باربری و خصوصیات تغییر شکل شده و افزایش تا ۵۱۲ درصدی مقاومت برشی را به همراه داشت. این نتایج اهمیت سیستم‌های تقویتی الیافی در ارتقای عملکرد سازه‌ای و کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای دیوارهای میان‌قاب بنایی را تأیید نمود [4].

استاد و شفافی (۲۰۲۴)، آثار اندرکنشی داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌های پر و دارای بازشو با روش دستک فشاری بررسی شد. نتایج نشان داد که لحاظ کردن این اندرکنش‌ها موجب کاهش ۳۰ درصدی سختی میان‌قاب می‌شود. پژوهشگران پس از اعتبارسنجی مدل‌های تحلیلی با داده‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار آباکوس، شرایط مختلف تماس بین میان‌قاب و قاب بتنی پیرامونی را ارزیابی کردند. این پژوهش ضریبی را برای مهندسان طراح ارائه می‌دهد تا آثار اندرکنشی را در مدل‌سازی خود منظور کنند [5]. رازقی و همکاران^۳ (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای با هدف تحلیل سازوکار تخریب سازه‌ای دیوارهای بنایی تحت اثر بارهای لرزه‌ای، گسیختگی اتصالات میان دیوار و اعضای قاب به‌عنوان عامل غالب ناپایداری خارج از صفحه شناسایی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اعمال سیستم تقویتی خارج از صفحه منجر به ارتقای قابل ملاحظه ظرفیت

باربری و مقاومت سازه‌ای دیوارها می‌شود. این پژوهش بر اهمیت تقویت پیوندهای سازه‌ای خارج از صفحه در سیستم‌های دیواری بنایی تأکید نموده است. نتایج مطالعه چارچوب نظری مناسبی برای توسعه رویکردهای نوآورانه بهسازی لرزه‌ای با بهره‌گیری از مصالح کامپوزیتی پیشرفته ارائه داده است [6]. هلیچی و همکاران^۴ (۲۰۲۳) با آزمایش چهار دیوار میانی^۵ (AAC) قاب‌های بتن مسلح، رفتار لرزه‌ای آنها را تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های تقویت مانند اتصالات سیمی، عملکرد لرزه‌ای دیوارها را بهبود می‌بخشد و منجر به کاهش پهنای ترک‌ها و افزایش ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود [7]. استاد و شفافی^۶ (۲۰۲۱) با مطالعات عددی نشان دادند افزایش نیروی محوری باعث بالا رفتن مقاومت نهایی سازه، افزایش سختی مؤثر و کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. همچنین نشان دادند ضخامت دیوار میان‌قاب باعث افزایش مقاومت نهایی و سختی مؤثر می‌شود [8].

کلاین و همکاران^۷ (۲۰۲۱) با آزمایش ۱۱ دیوار جداکننده غیرسازه‌ای، تکنیک‌های مختلف تقویت از جمله مش و الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج نشان داد سیستم‌های تقویت ساده و کم‌هزینه می‌توانند به عنوان اقدامات اصلاحی مؤثر عمل کرده و خطرات و خسارات را کاهش دهند [9].

دومنیکو و همکاران^۸ (۲۰۲۱) با آزمایش سه نمونه دیوار میان‌قاب مربعی، اثر آسیب داخل صفحه بر پاسخ خارج از صفحه را بررسی کردند. نتایج نشان داد آسیب داخل صفحه باعث کاهش قابل توجه مقاومت خارج از صفحه شده و دیوارهای مربعی کمتر تحت تاثیر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه قرار می‌گیرند [10].

مینوتو و همکاران^۹ (۲۰۲۰) با آزمایش هشت نمونه تمام مقیاس، رفتار داخل صفحه و خارج از صفحه دیوارهای میان‌قاب را با استفاده از راهکارهای تقویتی مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از ملات‌های تقویت شده با الیاف و توری بازالتی باعث بهبود قابل توجه رفتار سازه‌ای می‌شود [11]. حمودالوشالی و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۹) روی سه قاب بتنی یک طبقه آزمایشاتی را

⁴ Omer Faruk Halici, et.al

⁵ Autoclaved Aerated Concrete

⁶ Ostad & Shafaei

⁷ Martin Klun, et.al

⁸ Mariano Di Domenico, et.al

⁹ Massimiliano Minotto, et.al

¹⁰ Hamood Al Washali, et.al

¹ McDowell, et.al

² Ostad, et.al

³ Razzaqi, et.al

واقعی، کارایی سیستم‌های GFRP^۹ در بهبود مقاومت خارج از صفحه دیوارهای میان‌قاب را بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از نبشی‌های فولادی برای مهار FRP^{۱۰} بسیار موثر بوده و باعث افزایش مقاومت تا سه برابر فشار طراحی شد [18].

این مطالعه روش‌های بهسازی میان‌قاب در برابر نیروهای خارج از صفحه را بررسی می‌کند. سه نمونه قاب بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ (شامل میان‌قاب با (شرایط مرزی) دو سانتی‌متر فاصله از ستون، میان‌قاب با والپست جداکننده و میان‌قاب تقویت‌شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا) تحت آزمایش بارگذاری شبه استاتیکی خارج از صفحه قرار گرفتند، هدف از این مطالعه با توجه به ماهیت ترد میان‌قاب مصالح بنایی، رسیدن به رفتاری نرم و شکل‌پذیر خواهد بود.

۲- مشخصات و جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

در این مطالعه آزمایشگاهی، سه نمونه قاب بتن مسلح با مقیاس ۱:۲ مورد بررسی قرار گرفتند. این نمونه‌ها مطابق با ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برای قاب‌های با شکل‌پذیری زیاد (ویژه) طراحی و اجرا شدند. قاب آزمایشی دارای دهانه ۲۰۰۰ میلی‌متری و ارتفاع ۱۵۰۰ میلی‌متری از فونداسیون تا زیر تیر بود. در ساخت والپست‌ها از نبشی‌های شماره چهار استفاده شد، و برای نصب مناسب الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا، اتصالات مناسبی بین قاب و میان‌قاب ایجاد شد. پیکربندی و مشخصات میان‌قاب‌ها و نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است:

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

Table 1: Specifications and parameters of experimental specimen.

Specimen	Details	Configuration
^{۱۱} (IC-OOP)	First Specimen (Figure 2-a)	Infill frame with connections only at top and bottom and 2 cm gap from columns
^{۱۲} (IW-OOP)	Second Specimen (Figure 2-b)	Infill frame with lateral wallposts and connection details similar to existing buildings
^{۱۳} (IWR-OOP)	Third Specimen (Figure 2-c)	Infill frame with lateral wallposts where the infill section is reinforced with alkali-resistant glass fibers

^۹ Glass Fiber Reinforced Polymer

^{۱۰} Fiber Reinforced Polymer

^{۱۱} Infilled Control Out Of Plane

^{۱۲} Infilled Wallpost Out Of Plane

^{۱۳} Infilled Wallpost Out Of Plane

انجام دادند که نشان داد افزایش مقاومت قاب پیرامونی، مقاومت برشی دیوار میان‌قابی را افزایش می‌دهد. همچنین برتری مقاومت جانبی قاب نسبت به دیوار، موجب بهبود مقاومت کلی و شکل‌پذیری سیستم می‌شود [12].

نجیف و همکاران^۱ (۲۰۱۸) با آزمایش نه قاب و میان‌قاب، اثربخشی روش‌های مختلف FRCM را بررسی کردند. نتایج نشان داد FRCM^۲ باعث افزایش ۲۰ تا ۱۰۰ درصدی مقاومت نهایی شده و بازالت FRCM بهترین راه‌حل مقاوم‌سازی در مقایسه با کربن و شیشه بود [13]. کاریو و همکاران^۳ (۲۰۱۸) با انجام آزمایش روی ۱۸ نمونه دیوار، روش TRM^۴ را برای تقویت دیوارهای ساختمانی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که این روش به طور قابل توجهی ظرفیت باربری دیوارها را افزایش می‌دهد و میزان الیاف مصرفی تأثیر مستقیمی بر مقاومت، تغییر شکل و الگوی شکست دارد [14].

تریانتافیلو و همکاران^۵ (۲۰۱۷) با آزمایش ۱۷ دیوار بنایی، سیستم جدیدی متشکل از ملات مسلح شده با منسوجات TRM و مواد عایق حرارتی را برای مقاوم‌سازی سازه‌ای و بهسازی حرارتی دیوارها ارزیابی کردند. نتایج نشان داد این سیستم در بهبود عملکرد حرارتی و سازه‌ای دیوارها موثر است [15]. پاتریک بیشوف و رنه سوتر^۶ (۲۰۱۴) با آزمایش پنج نمونه دیوار بنایی، کارایی سیستم ملات تقویت شده با شبکه‌های مش (کربن، شیشه) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد این سیستم مقاومتی مشابه سیستم‌های متعارف و شکل‌پذیری بالاتری نسبت به ورق‌های CFRP دارد [16]. کوتاس و همکاران^۷ (۲۰۱۴) روشی نوآورانه برای مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی با استفاده از پوشش‌های مشی TRM ارائه دادند. نتایج نشان داد مهارهای مشی طراحی شده قابلیت انتقال نیروهای کششی قابل توجهی بین سطح مشترک دیوار آجری و بتن دارند [17].

لونا و همکاران^۸ (۲۰۱۱) با آزمایش ۱۴ نمونه در مقیاس

^۱ Najif, Ismail, et.al

^۲ Fiber Reinforced Cementitious Matrix

^۳ F. A. Kariou, et.al

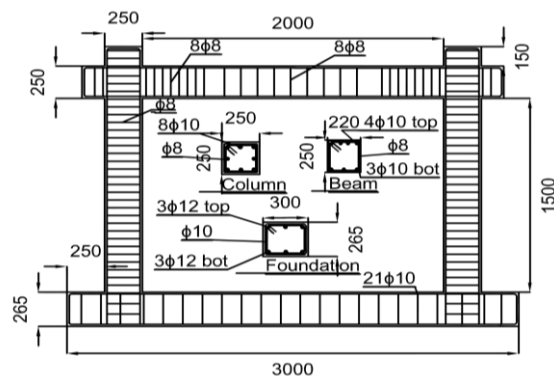
^۴ Textile Reinforced Mortar

^۵ Thanasis C. Triantafillou, et.al

^۶ Bischof, P. and R. Suter

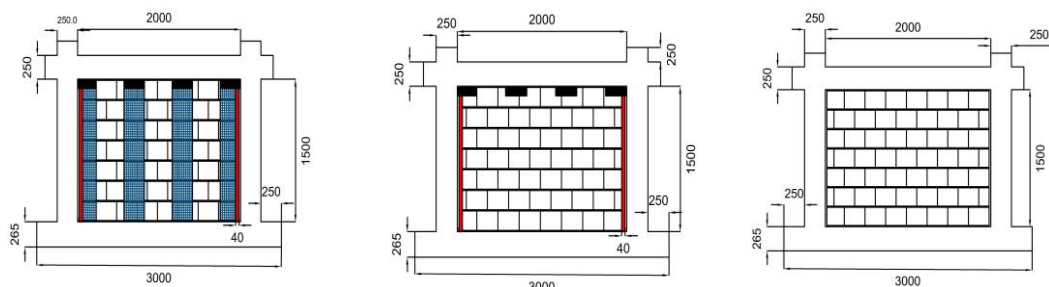
^۷ L. Koutas.et.al

^۸ Dillon S. Lunn, et.al



شکل ۱. جزئیات اجرایی قاب بتن مسلح، (اندازه برحسب میلی متر).

Fig. 1. Geometry and reinforcing details of reinforced concrete frame (dimensions in millimetre).



(ب) میان قاب جداسازی شده با والپست با فاصله ۲۰ میلی متر از قاب پیرامونی (IW_OOP).

(ب) میان قاب جداسازی شده با والپست با فاصله ۲۰ میلی متر از قاب پیرامونی (IW_OOP).

(الف) میان قاب جداسازی شده با فاصله ۲۰ میلی متر از قاب پیرامونی (IC_OOP).

شکل ۲. شمای جزئیات اتصال میان قاب به قاب بتن مسلح، (اندازه گیری برحسب میلی متر).

Fig. 2. Schematic of Connection Infilled Reinforced Concrete Frame and Intermediate Frame (Measurements in Millimeters).

که پس از انجام عملیات اندازه گیری، برش کاری، خم کاری و جوشکاری، اجزای مختلف قاب شامل فونداسیون، ستون ها و تیر به صورت مجزا ساخته شدند، که در شکل (۳) نشان داده شده است. اتصال قطعات مختلف هنگام بتن ریزی به یکدیگر با استفاده از سیستم پیچ و مهره تأمین شد.

به منظور جلوگیری از خیز تیر در حین بتن ریزی و عمل آوری، پایه های اطمینان تعبیه شد. همچنین برای اطمینان از شاقول بودن ستون ها، یک قوطی فلزی با مقطع ۲۰×۲۰ میلی متر و طول ۲۰۰۰ میلی متر در بین دو دهانه قالب ستون نصب شد. فرآیند ساخت قاب بتن مسلح به صورت مرحله ای و منطبق بر روش های متداول در ساخت سازه های واقعی انجام پذیرفت و در شکل (۳) قابل مشاهده است.

جزئیات سازه ای تمامی نمونه های قاب بتن مسلح یکسان و مطابق با شکل (۱) بود، همچنین شمای جزئیات اتصال میان قاب به قاب و شرایط مرزی در شکل (۲) نشان داده شده است. جابه جایی نمونه ها با استفاده از جرثقیل ۳/۳ تنی انجام گرفت. برای تأمین اتصال محکم نمونه ها به کف صلب آزمایشگاه و جلوگیری از بلند شدن آن ها هنگام بارگذاری، از ۲۰ عدد پیچ ۸/۸ فولادی با قطر ۱۶ میلی متر، طول ۳۳۰ میلی متر با مقاومت کششی ۸۰۰-۹۰۰ مگاپاسکال استفاده شد.

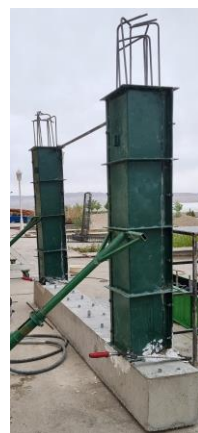
۲-۱- ساخت و آماده سازی نمونه های آزمایشگاهی

در این مطالعه، سه نمونه قاب بتن مسلح ویژه با استفاده از قالب های فلزی مقیاس شده در آزمایشگاه سازه و مصالح ساختمانی دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شد. قالب های مزبور از صفحات فلزی با ضخامت ۲ میلی متر تشکیل شده بودند

Comment [WU]: شبیه قسمت ب. با توجه به جدول حس میکنم اشتباه هستش.



(پ)



(ب)



(الف)

شکل ۳. شمای نهایی نمونه‌های ساخته شده: (الف، ب، پ) مراحل قالب بندی و بتن‌ریزی قالب بتن مسلح.

Fig. 3. Final Configuration of Constructed Specimens: (a, b, c) Formwork and Concrete Casting Stages of Reinforced Concrete Frame.

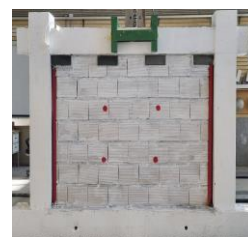
کمک رول‌بوت شماره ۸ کاشته شده در قالب، محکم شد. جزئیات مربوط به چگونگی اجرای نبشی و تسمه در شکل (۴) نشان داده شده است. الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا در میانقاب نیازمند مهارکردن مناسب از بالا و پایین بود، پس برای مهار بالایی از نبشی‌های مقطع با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد $250 \times 100 \times 40$ میلی‌متر (طول $\times$ ارتفاع $\times$ عرض) و برای مهار پایینی از تسمه با ضخامت ۳ میلی‌متر و ابعاد 250×20 میلی‌متر (طول $\times$ عرض) استفاده شد که این نبشی‌ها توسط پیچ و پلاک به قالب بتنی متصل شده و در نهایت عملیات شاتکریت به ضخامت ۱۰ میلی‌متر روی الیاف اجرا شد. از کاربرد دیگه نبشی منطقه در زیر تیر همپوشانی تا ۱۰۰ میلی‌متر روی بلوک سفال در ردیف آخر می‌توان اشاره کرد. جزئیات کامل در شکل (۴) قابل مشاهده است.

۲-۲- مشخصات مصالح

جدول ۲. مشخصات مکانیکی مصالح.

Table 2. Mechanical properties of materials.

Material name	Average compressive strength (MPa)	Poisson's coefficient	Elasticity modulus (Mpa)
Concrete	27	0.2	25743
Reinforcements	420	0.3	200000
Clay Block	1	0.1	----



(ب) نمونه با والپست



(الف) نمونه کنترل



(پ) نمونه با والپست، تقویت شده با الیاف شیشه

شکل ۴. شمای نهایی نمونه‌های ساخته شده:

(الف) نمونه (IC-OOP)، (ب) نمونه (IW-OOP)، (پ) نمونه (IWR-OOP).

Fig. 4. Final Configuration of Constructed Specimens: (a) Specimen IC-OOP, (b) Specimen IW-OOP, (c) Specimen IWR-OOP.

میانقاب‌های مورد استفاده در این مطالعه از بلوک سفال سوراخ‌دار با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شده همچنین ارتفاع نهایی میانقاب ۱۵۰۰ میلی‌متر تعیین شد. برای مهار مناسب بلوک‌های ردیف آخر، از سیستم نبشی و تسمه استفاده شد که با

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بلوک سفال استفاده شده در ساخت میان‌قاب.

Table 3. Compressive Strength Test Results of Clay Hollow Blocks Used in Infill Construction.

Specimen	Number of samples					Average	Standard deviation	covariance
	S1	S2	S3	S4	S5			
Clay Brick-horizontal	0.682	0.876	0.803	0.846	0.807	0.802	0.065	8%
Clay Brick-vertical	2.9	3.42	5.9	5.42	4.3	4.38	3.30	11%

جدول ۴. طرح اختلاط قاب بتن مسلح (برحسب کیلو گرم بر متر مکعب).

Table 4. Mix Design of Reinforced Concrete Frame (kg/m³).

Materials	Foundation	Column& Beam
Portland Cement Type II (kg/m ³)	450	380
Coarse Aggregate (Medium) (kg/m ³)	340	350
Coarse Aggregate (Large) (kg/m ³)	340	350
Fine Aggregate (Sand) (kg/m ³)	1000	1040
Water (L/m ³)	210	200
Water to cement ratio	0.47	0.53

۲-۲-۱- بلوک سفال

نهایی، نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی بتن طبق استاندارد ASTM C39 در محل بتن‌ریزی تهیه شدند. این نمونه‌ها همزمان با انجام آزمایش قاب و میان‌قاب، مورد آزمایش قرار گرفتند، نتایج مربوط به انحراف معیار و کواریانس نمونه‌های استوانه‌ای محاسبه شد. این نتایج در جداول (۵ و ۶) ارائه شده‌اند [22].

۲-۲-۳- آرماتورهای قاب بتن مسلح

نتایج آزمایش کشش آرماتورهای فولادی در جدول (۷) انجام گرفته است. اتصال پیچ‌های ۸/۸ خشکه به کف صلب با رعایت الزامات استانداردهای ISO و ASTM انجام گرفته است. پیروی از این استانداردها اطمینان حاصل می‌کند که فرآیند آزمایش به شکلی اصولی و یکپارچه صورت پذیرفته است. در این میان، دستورالعمل ASTM A370 برای آزمایش کشش، به عنوان یکی از جامع‌ترین مراجع برای ارزیابی خواص کششی آرماتورها مورد استفاده قرار گرفته است [23].

بلوک‌های سفال سوراخ‌دار مورد استفاده در این مطالعه، دارای ابعاد استاندارد ۲۵۰×۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر (طول، عرض، ضخامت) بوده و از کارخانه شاهرود سفال تهیه گردیده است. آزمایش فشاری روی ۱۰ نمونه بلوک سفال انجام شد که شامل پنج عدد در جهت عمود بر سوراخ و پنج عدد در جهت افقی سوراخ‌ها بود. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ASTM C67 صورت گرفت و نتایج حاصل در جدول (۳) ارائه شده است [19].

۲-۲-۲- بتن

پس از انتخاب مصالح استاندارد از شرکت شن و ماسه سیدون شاهرود و سیمان پرتلند تیپ دو شاهرود، طرح اختلاط بتن مطابق با طرح اختلاط ملی جدول (۴) و با رعایت استانداردهای ASTM C136 و ASTM C33 تهیه شد [20, 21]. به منظور انجام ارزیابی

جدول ۵. نتایج آزمایش فشاری بتن.

Table 5. Concrete Compressive Test Results

specimen		Cubic: Test day (MPa)			Cylindrical: Test day (MPa)			Average		Standard deviation	covariance
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	Cubic	Cylindrical		
IC-OOP	Foundation	44.26	41.02	43.73	35.41	32.81	34.98	38.77	31.02	0.940	3%
	Column	37.35	37.50	33.63	29.88	30.00	26.90	43.00	34.40	0.655	1.9%
	Beam	49.55	53.20	46.88	39.64	42.56	37.51	36.16	28.93	0.827	2.8%
(IW-OOP) (IWR-OOP)	Foundation	44.75	36.42	41.31	35.80	29.14	33.04	49.88	39.90	1.19	3%
	Column	39.8	41.57	40.38	31.84	33.26	32.30	40.83	32.66	1.57	4.82%
	Beam	40.67	69.39	35.95	32.54	31.76	28.76	40.58	32.46	0.33	1%

جدول ۶. نتایج آزمایش فشاری درز ملات و شاتکریت.

Table 6. Compressive Test Results of Mortar Joints and Shotcrete

Specimen	Configuration	Cubic: Test day (MPa)			Average	Standard deviation	covariance
		S1	S2	S3			
IC-OOP	Specimen Mortar joint	25.30	22.63	20.22	22.71	1.2	5%
IW-OOP	Specimen Mortar joint	8.2	8.9	9.42	8.84	0.288	3%
IWR-OOP	Specimen Mortar joint	18.62	17.28	19.60	18.52	0.54	3%
	Shatcrte Specimen	11.87	12.26	9.08	11.07	0.81	7%

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت کششی آرماتور.

Table 7. Tensile Strength Test Results of Reinforcement Bars.

Material	Average Yield Stress (MPa)	Average Ultimate Stress (MPa)	Yield Strain (%)	Ultimate Strain (%)
Reinforcements No 12	494.38	614	0.0024	0.03
Reinforcements No 10	343	561	0.0016	0.05
Reinforcements No 8	355	514	0.0016	0.05

جدول ۸. نتایج و مشخصات هندسی الیاف شیشه.

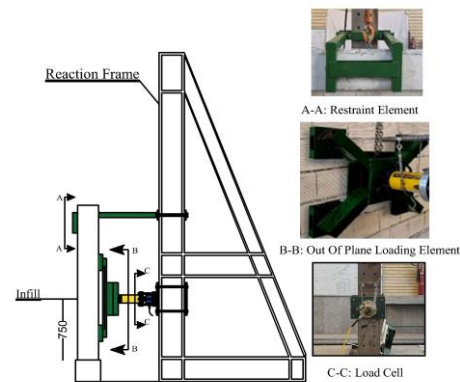
Table 8. Results and Geometric Specifications of Alkali-Resistant Glass Fibers.

Mean Tensile Strength (MPa)	Mesh Interval	Number of Fibers
918	5×5	9

سرتاسری ۵۰ گرم بر مترمربع (در هر دو سمت دیوار) لازم است، آزمایش کشش الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا نیز طبق ASTM E2098 انجام گرفت. نتایج به دست آمده از آزمایش، در جدول (۸) قابل مشاهده است [24, 25].

۳- برپایش آزمایشگاهی، شرایط بارگذاری و آماده سازی نمونه

برپایش آزمایشگاهی برای بارگذاری خارج از صفحه نمونه‌های IC-OOP، IW-OOP و IWR-OOP در شکل (۵) نشان داده شده است. در این آزمایش از یک جک استاتیکی هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن و حداکثر جابه‌جایی ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد که به خرابی متصل به کف صلب مهار شد. المان انتقال دهنده آزمایشگاهی خارج از صفحه توسط جرتقیل ۳/۵ تنی در ارتفاع مناسب معلق نگه داشته شد. سپس با اعمال بار خارج از صفحه، المان انتقال دهنده به میان‌قاب چسبیده و تراز شد. به منظور کاهش تنش و بهینه‌سازی توزیع نیرو در محل اتصال کفشک و میان‌قاب، از پدهای پلیمری با ضخامت ۱۰ میلی‌متر استفاده شد. کفشک‌ها با فواصل یکسان در چهار نقطه از طول و ارتفاع میان‌قاب نصب شده و المان در تمامی جهات تراز شد. آزمایش بارگذاری خارج از صفحه با روش کنترل تغییر مکان و به‌صورت چرخه‌ای اجرا شد. انتقال نیرو از جک به میان‌قاب، از طریق المان انتقال‌دهنده آزمایشگاهی و کفشک‌ها صورت پذیرفت. جابه‌جایی‌های نمونه توسط تغییر مکان‌سنج‌های خطی (LVDT) ثبت شد که موقعیت هرکدام در جدول (۹) و شکل (۶) به آن اشاره شده است. پروتکل



شکل ۵. برپایش آزمایشگاهی برای بارگذاری خارج از صفحه.

Fig. 5. Laboratory Setup for Out-of-Plane Loading.

۲-۲-۴- الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا

به دلیل اینکه خمش دیوار یک طرفه و در راستای قائم است، نیازی به والپست نیست و محدودیتی در طول دیوار وجود ندارد. اگر حداقل ۵۰ میلی‌متر کف‌سازی در پایین دیوار ایجاد شود، که دیوار درون آن قرار گیرد، دیگر نیازی به اجرای نبشی پایینی نیست. در حالت نواری حداقل ۱۰۰ گرم بر مترمربع و در حالت

می‌شود. این آسیب‌های داخل صفحه‌ای، احتمال فروریزش خارج از صفحه در زلزله‌های بعدی را افزایش می‌دهد. با این وجود، میان‌قاب‌های با نسبت ابعادی مناسب و محصورشده در قاب‌های سخت می‌توانند ظرفیت قابل توجهی در برابر نیروهای داخل صفحه از خود نشان دهند. سازوکار قوسی در دیوارهای محصورشده، ظرفیت جانبی فراتر از نقطه اولین ترک‌خوردگی ایجاد می‌کند. آسیب‌های قبلی موجب کاهش تماس بین میان‌قاب و قاب پیرامونی شده و باعث تأخیر در فعال‌سازی سازوکار قوسی می‌شود که در شکل (۷) به آن اشاره شده است. الگوی فروریزش میان‌قاب متناسب با شرایط اتصال به قاب پیرامونی به دو صورت سازوکار قوسی دوطرفه یا یک‌طرفه تغییر می‌کند؛ اتصال مناسب در بالای قاب منجر به سازوکار دوطرفه می‌شود، در غیر این صورت سازوکار یک‌طرفه با مقاومت کمتر شکل می‌گیرد.

و روش بارگذاری به صورت شبه استاتیکی و پیشنهادی بود، یعنی در هر دامنه دوسیکل انجام گرفت، در هر سیکل با اعمال بار توسط جک هیدرولیکی پس از رسیدن به جابه‌جایی مدنظر نیرو خالی شده و سپس اعمال بار صورت می‌گیرد و این چرخه تا جایی که میان‌قاب به حد گسیختگی برسد ادامه خواهد یافت. عملکرد نمونه‌ها با تحلیل پارامترهای متعدد شامل سختی، الگوهای ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی ارزیابی شد. این مطالعه، امکان بررسی جامع کارایی روش‌های مقاوم‌سازی پیشنهادی را تحت شرایط مختلف بارگذاری فراهم آورد.

۴- نتایج و بررسی داده‌ها و مشاهده آزمایشگاهی

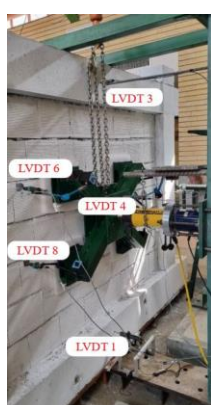
۴-۱- عملکرد قوسی

میان‌قاب‌های ساختمانی پس از زلزله‌های متوسط دچار ترک‌خوردگی متقاطع می‌شوند که منجر به کاهش مقاومت آنها

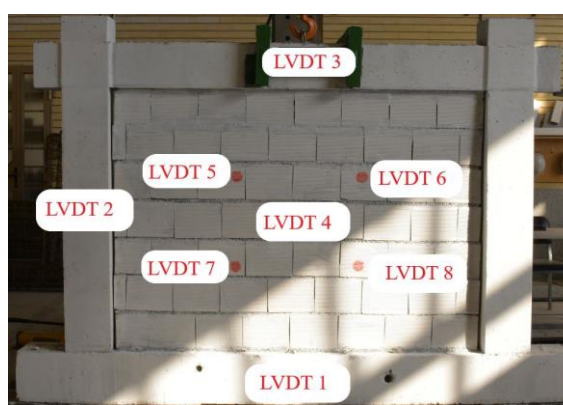
جدول ۹. مشخصات و جزئیات قرارگیری جابه‌جایی سنج‌ها.

Table 9. LVDT Specifications and Installation Details.

Sensor Number	Installation Details	Measurement Purpose	Measurement Range (mm)
LVDT1	Foundation	Out-of-plane displacement of foundation	50
LVDT2	Column	Out-of-plane displacement of column	50
LVDT3	Center of beam	Out-of-plane displacement of beam	10
LVDT4	End of jack	Jack displacement	100
LVDT5	Upper right support	Out-of-plane displacement of infill	50
LVDT6	Upper left support	Out-of-plane displacement of infill	50
LVDT7	Lower right support	Out-of-plane displacement of infill	25
LVDT8	Lower left support	Out-of-plane displacement of infill	25



(پ)



(ب)



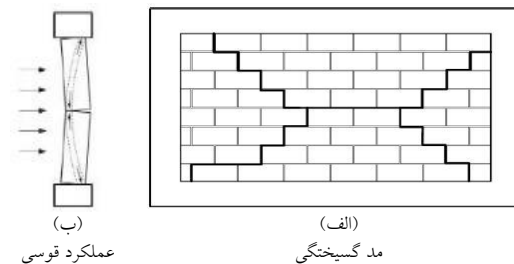
(الف)

شکل ۶. نصب المان خارج از صفحه و جایگذاری تغییر مکان سنج‌ها (LVDTs).

Fig. 6. Installation of Out-of-Plane Setup and Positioning of Displacement Transducers (LVDTs).

گسترش یافت و نیرو به ۱۱/۲ کیلونیوتن رسید. در جابه‌جایی ۱۸/۸۹ میلی‌متر، یک ترک افقی سرتاسری در رج دوم نمونه شکل گرفت که نیروی متناظر با آن ۱۵/۳۳ کیلونیوتن ثبت شد، که در شکل (۸-الف) مشاهده می‌کنید. با افزایش جابه‌جایی به ۲۰/۲۵ میلی‌متر، بلوک سفال در قسمت پایین نمونه جدا شد و نیرو به ۸/۲۴ کیلونیوتن کاهش یافت، که مطابق شکل (۸-ب) قابل مشاهده است. نهایتاً، تخریب کامل در جابه‌جایی ۲۱/۲۹ میلی‌متر اتفاق افتاد که منجر به ریزش کامل میانقاب شد، در شکل (۸-پ) به آن اشاره شده است.

بیشترین نیروی ثبت شده در طول آزمایش ۱۵/۶۵ کیلونیوتن بود که در جابه‌جایی ۱۸/۸۱ میلی‌متر رخ داد. رفتار نمونه پس از ایجاد اولین ترک در حدود جابه‌جایی ۱۵/۵ میلی‌متر از حالت الاستیک خارج شد و وارد مرحله پلاستیک شد. سازوکار خرابی نهایی از طریق گسترش ترک‌های افقی در پایین نمونه شکل گرفت که در نهایت به ریزش بخش بالایی میانقاب منجر شد. همان‌گونه که در شکل (۸) و جدول (۱۰) نمایش داده شده است، الگوی گسیختگی مشاهده شده بیانگر تأثیر بحرانی محل اتصال تیر به میانقاب و همچنین درزهای افقی بستر ملات بر رفتار لرزه‌ای کلی سیستم قاب‌های میان‌پر با فاصله می‌باشد. این نتایج نواحی با پتانسیل بالا برای مداخلات تقویتی در پیکربندی‌های سازه‌ای مشابه را مشخص می‌نماید. برای تحلیل جامع‌تر و بررسی دقیق‌تر داده‌های آزمایشگاهی، از نمودارهای موجود در شکل (۹) استفاده شد که اطلاعات تکمیلی مورد نیاز را ارائه می‌دهد.



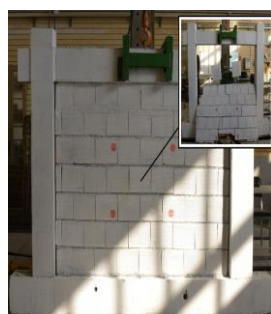
شکل ۷. سازوکار میانقاب در خارج از صفحه [26].

Fig. 7. Out-of-Plane Mechanism of Infill [26].

خمش دوطرفه خارج از صفحه و قید مرزی ناشی از قاب، ظرفیت باربری میانقاب‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به خمش یک‌طرفه عمودی بهبود می‌بخشد. با توجه به محدودیت داده‌های موجود، بررسی اندرکنش رفتار داخل‌صفحه و خارج از صفحه میانقاب‌ها همچنان موضوعی باز در تحقیقات مهندسی زلزله است [26, 27].

۴-۲- آزمایش نمونه قاب بتنی میان‌پر لرزه‌ای با شرایط مرزی (IC-OOP)

نمونه میانقاب با فاصله ۲۰ میلی‌متری از ستون‌ها، مراحل مشخصی از خرابی پیش‌رونده را در طول آزمایش نشان داد. در ابتدا، نمونه تا جابه‌جایی ۱۲ میلی‌متر رفتاری کاملاً الاستیک و بدون آسیب از خود نشان داد. اولین نشانه‌های آسیب در جابه‌جایی ۱۵/۵۰ میلی‌متر (با نیروی اعمالی ۱۱/۰۲ کیلونیوتن) به صورت ترک افقی در محل اتصال تیر و میانقاب مشاهده شد. با افزایش جابه‌جایی به ۱۵/۵۹ میلی‌متر، این ترک در زیر تیر و در درز ملات



(پ) فروریزش میانقاب بصورت لغزشی (جابه‌جایی ۲۱،۲۹ میلی‌متر)



(ب) ترک ایجاد شده در پشت نمونه (جابه‌جایی ۲۱،۲۵ میلی‌متر)



(الف) محل ترک ایجاد شده در پایین نمونه (جابه‌جایی ۱۸،۸۹ میلی‌متر)

شکل ۸. (الف، ب، پ) روند کلی آزمایش.

Fig. 8. (a, b, c) General Testing Procedure.

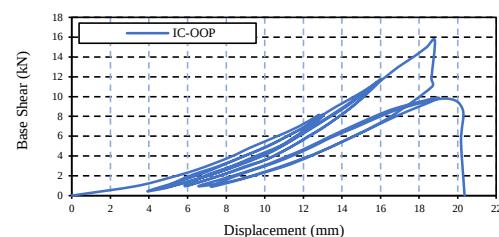
۳-۴- آزمایش نمونه قاب بتنی میان پر با والپست بدون تقویت (IW-OOP)

در آزمایش انجام شده، میان قاب مراحل مشخصی از تغییر رفتار را نشان داد. در مرحله اول، با اعمال جابه جایی پنج میلی متر طی دو سیکل، نمونه رفتاری کاملاً الاستیک از خود نشان داد و هیچ ترکی مشاهده نشد. در جابه جایی ۱۰ میلی متر نیز رفتار همچنان الاستیک باقی ماند، با حداکثر نیروی ۷/۴ کیلونیوتن در سیکل اول و ۷/۱ کیلونیوتن در سیکل دوم به ثبت رسید. اولین نشانه های آسیب در جابه جایی ۱۴ میلی متر با نیروی ۱۱/۶۷ کیلونیوتن ظاهر شد که شامل ترک افقی در وسط میان قاب و ترک در محل اتصال به فونداسیون بود همان طور که در شکل (۱۰-الف) مشاهده می کنید. در سیکل دوم این بازه، نیرو به ۱۲ کیلونیوتن افزایش یافت و رفتار نمونه از حالت الاستیک به پلاستیک تغییر پیدا کرد. حداکثر ظرفیت باربری میان قاب در جابه جایی ۱۶ میلی متر با نیروی ۱۳/۹۱ کیلونیوتن ثبت شد که با شکل گیری ترک های افقی، مورب و قطری گسترده همراه بود. پس از این نقطه، افت قابل توجهی در ظرفیت باربری مشاهده شد، به طوری که در جابه جایی ۱۷ میلی متر، نیرو به ۷/۴ کیلونیوتن کاهش یافت، که در (شکل ۱۰-ب) نشان داده شده است. در جابه جایی های بیشتر (۲۰ تا ۳۸ میلی متر)، زوال تدریجی مصالح، گسترش ترک ها و جدا شدن قطعات بلوک سفال رخ داد و نیرو به محدوده ۱/۲ تا ۱/۶ کیلونیوتن کاهش پیدا کرد. ویژگی قابل توجه در رفتار این میان قاب، تخریب تدریجی و شکل پذیر آن بود که به جای گسیختگی ناگهانی یا شکست ترد، با زوال تدریجی مصالح و تغییر شکل قوسی همراه بود، در (شکل ۱۰-ب) به آن اشاره شده است. شکل (۱۱) همراه با داده های ارائه شده در جدول (۱۱)، به طور مبسوط نمودار پوش آزمایشگاهی، منحنی های حاصل از بارگذاری چرخه ای و همچنین نمودار جابه جایی ثبت شده توسط تغییر مکان سنج ها را به نمایش می گذارد که مجموعه این اطلاعات در راستای تحلیل رفتار سازه ای نمونه های مورد مطالعه، قابل مشاهده و ارزیابی می باشد.

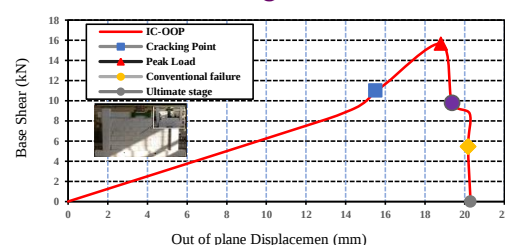
جدول ۱۰: نتایج آزمایش نمونه.

Table 10. Specimen Test Results.

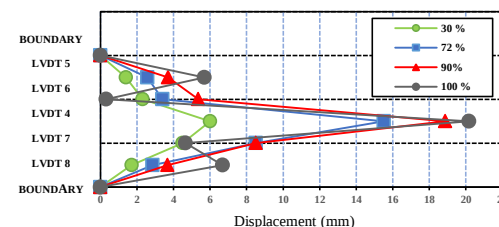
(IC-OOP)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak load	15.65	18.81
Minimum load	8.24	20.20



الف) نمودار چرخه ای آزمایش خارج از صفحه میان قاب با شرایط مرزی



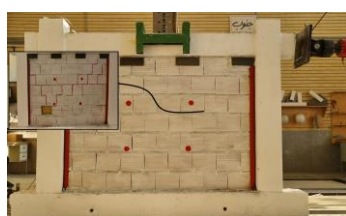
ب) نمودار بار تغییر مکان با شرایط مرزی



پ) نمودار جابه جایی آزمایش خارج از صفحه میان قاب با شرایط مرزی

شکل ۹. (الف، ب، پ) نمودارهای مربوط به آزمایش خارج از صفحه میان قاب نمونه (IC-OOP).

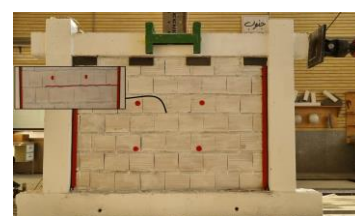
Fig. 9. (a, b, c) Out-of-Plane Test Diagrams for Infill Specimen IC-OOP.



(پ) ترک های مورب در میان قاب
(جابه جایی ۱۷ میلی متر)



(ب) عملکرد قوسی
(جابه جایی ۳۸ میلی متر)



(الف) ترک افقی در وسط میان قاب
(جابه جایی ۱۴ میلی متر)

شکل ۱۰. (الف، ب، پ) روند کلی آزمایش.

Fig. 10. (a, b, c, d) General Testing Procedure.

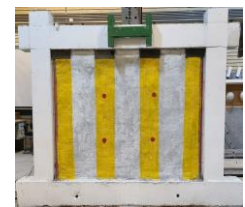
آزمایش میانقاب بلوک سفال بهسازی شده با الیاف شیشه و شاتکریت تحت بارگذاری خارج از صفحه نتایج قابل توجهی را نشان داد. در مراحل اولیه بارگذاری تا جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر، نمونه رفتاری کاملاً الاستیک و خطی بدون هیچگونه آسیب یا ترک از خود نشان داد. نقطه عطف آزمایش در بازه ۲۰ میلی‌متر رخ داد، جایی که اولین علائم خرابی با صدای شکستن مصالح در جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متر و نیروی ۲۱ کیلونیوتن آغاز شد. در این مرحله، رفتار سازه از حالت الاستیک به پلاستیک تغییر کرد و اولین ترک افقی در وسط میانقاب شکل گرفت که در شکل (۱۲-ب) نشان داده شده است. نتایج برجسته این آزمایش، عملکرد مؤثر سیستم تقویتی (الیاف شیشه و شاتکریت) در جلوگیری از فروپاشی کامل میانقاب و تغییر رفتار سازه از شکست ترد به شکست نرم بود. حتی در جابه‌جایی‌های بزرگ، این سیستم تقویتی از ریزش مصالح جلوگیری کرده و یکپارچگی کلی سازه را حفظ نمود. الگوی ترک‌خوردگی در میانقاب نشان‌دهنده عملکرد چهار طرفه آن بود، با ترک‌های افقی در میانه ارتفاع و ترک‌های مورب که از گوشه‌ها به سمت مرکز گسترش یافتند. همچنین، یک الگوی بیضی‌شکل از ترک‌ها در اطراف محل بارگذاری در پشت نمونه شکل گرفت که در شکل (۱۲-پ) قابل مشاهده است. مقاومت سازه به تدریج از حداکثر ۳۲/۹۸ کیلونیوتن در جابه‌جایی ۲۱/۱۹ میلی‌متر به حدود ۳/۳ کیلونیوتن در انتهای آزمایش (۵۰ میلی‌متر) کاهش یافت. نکته قابل توجه این است که این کاهش مقاومت به صورت تدریجی و کنترل‌شده بود و سازه همچنان یکپارچگی خود را حفظ کرد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم تقویتی الیاف و شاتکریت می‌تواند به طور مؤثری رفتار میانقاب را بهبود بخشد، ظرفیت تغییرشکل آن را افزایش دهد و از فروپاشی ناگهانی جلوگیری کند. این نتایج می‌تواند در بهسازی ساختمان‌های موجود و طراحی سازه‌های جدید کاربرد داشته باشد. عملکرد دقیق و رفتار نمونه توسط جابه‌جایی سنج‌ها و تغییرات نیرو متناظر با جابه‌جایی به صورت جامع در نمودارهای شکل (۱۳) و داده‌های جدول (۱۲) ارائه شده است.



(پ) شمای نمونه تقویت شده پشت نمونه بعد از بارگذاری (جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر)



(ب) شمای نمونه بعد از بارگذاری (جابه‌جایی ۵۰ میلی‌متر)



(الف) شمای نمونه قبل بارگذاری

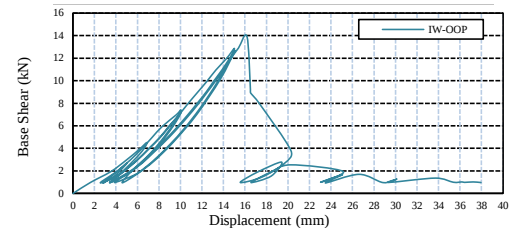
شکل ۱۲. نمای کلی از قبل و بعد از آزمایش میانقاب با والپست تقویت شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا.

Fig. 12. General View Before and After Testing of Infill with Wall post Reinforced with Alkali-Resistant Glass Fiber.

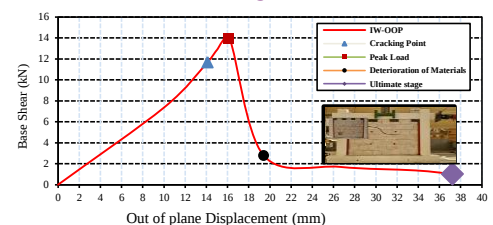
جدول ۱۱. نتایج آزمایش نمونه.

Table 11. Specimen Test Results.

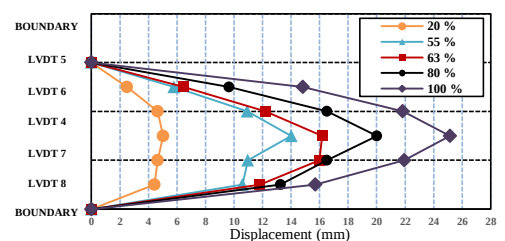
(IW-OOP)	Force(kN)	Displacement(mm)
Peak load	13.91	16
Minimum load	1.6	38



(الف) نمودار چرخه ای آزمایش خارج از صفحه میانقاب با شرایط مرزی



(ب) نمودار بار تغییر مکان با شرایط مرزی



(پ) نمودار جابه‌جایی خارج از صفحه میانقاب با شرایط مرزی

شکل ۱۱. نمودارهای مربوط به آزمایش خارج از صفحه میانقاب (IW-OOP).

Fig. 11. Diagrams Related to Out-of-Plane Testing of Infill Specimen IW-OOP.

۴-۴- آزمایش نمونه قاب بتنی میان‌پر با والپست تقویت شده با

الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (IWR-OOP)

۴-۵- مقایسه نمونه‌های خارج از صفحه

در این بخش، به مقایسه جامع رفتار نمونه‌های آزمایش شده می‌پردازیم. نمودارهای ارائه شده در شکل (۱۴ و ۱۵)، امکان تحلیل مقایسه‌ای دقیق را فراهم می‌سازد. شکل (۱۴) نمودار پوش نمونه‌ها را نمایش می‌دهد که به وضوح تفاوت‌های رفتاری آن‌ها را آشکار می‌سازد. در شکل (۱۵)، مقایسه نیرو و جابه‌جایی متناظر با آن در دو وضعیت کلیدی ارائه شده است: وضعیت اول مربوط به بیشینه نیرو در هر نمونه، و وضعیت دوم مربوط به کمترین نیرو یا حد نهایی نمونه‌ها است. این مقایسه دوگانه، امکان ارزیابی عملکرد نمونه‌ها را هم در نقطه اوج مقاومت و هم در مرحله نهایی تخریب فراهم می‌کند.

با توجه به نمودارهای اشاره شده در شکل (۱۴) می‌توان عملکرد نمونه‌ها را بررسی کرد، در مقایسه نمونه (IWR-OOP) با نمونه (IC-OOP)، کاهش مقاومت به میزان ۱۱٪ و کاهش جابه‌جایی متناظر به میزان ۱۵٪ مشاهده می‌شود. تا نقطه پیک نیرو، نمونه (IC-OOP) عملکرد مطلوبی از خود نشان داده است. پس از نقطه پیک، نمونه (IWR-OOP) در مقایسه با نمونه (IC-OOP)، کاهش ۸٪ در نیرو و افزایش ۸٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که نمونه (IWR-OOP) در نهایت عملکرد بهتری داشته است، در حالی که نمونه (IC-OOP) در جابه‌جایی نهایی دچار تخریب و فروریزش شد.

نمونه تقویت شده (IWR-OOP) در مقایسه با نمونه (IWR-OOP)، افزایش ۱۳٪ در مقاومت و ۳۲٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. پس از نقطه پیک، نمونه (IWR-OOP) نسبت به نمونه (IWR-OOP)، افزایش ۱۰۶٪ در نیرو و ۳۱٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. همچنین در مقایسه با نمونه (IC-OOP)، نمونه تقویت شده (IWR-OOP) افزایش ۱۱۰٪ در نیرو و ۱۲٪ در جابه‌جایی را نشان می‌دهد. پس از نقطه پیک، کاهش ۶۰٪ در نیرو و افزایش ۱۵۰٪ در جابه‌جایی مشاهده می‌شود، در حالی که در نمونه (IC-OOP) پس از جابه‌جایی نهایی دچار فروریزش شده و شکست تردی را تجربه کرد.

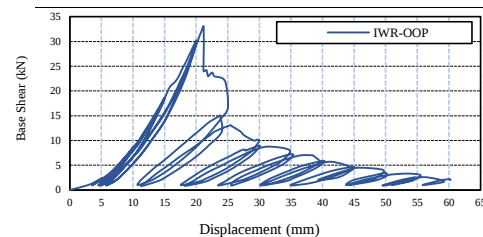
۵- نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی و مقایسه رفتار سه نوع میان‌قاب بلوک سفال تحت بارگذاری خارج از صفحه می‌پردازد. نمونه‌های مورد مطالعه شامل میان‌قاب معمولی با شرایط مرزی (IC-OOP)، میان‌قاب با والپست (IWR-OOP) در ساختمان‌های موجود و بهسازی میان‌قاب با والپست تقویت شده با الیاف شیشه (IWR-OOP) است. تمامی نمونه‌ها در مراحل اولیه بارگذاری رفتاری الاستیک از خود نشان دادند.

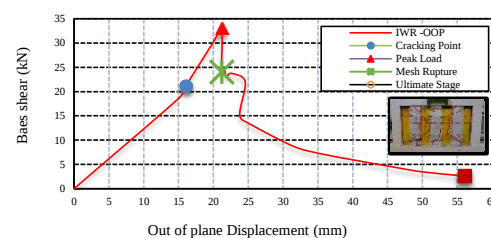
جدول ۱۲. نتایج آزمایش نمونه

Table 12. Specimen Test Results.

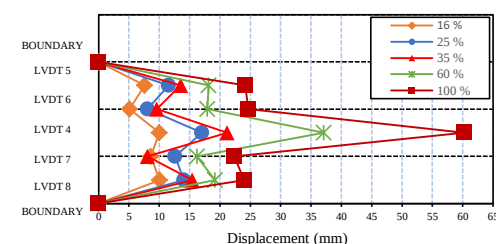
(IWR-OOP)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak Load	32.98	21.19
Minimum Load	3.30	50



(الف) نمودار چرخه‌ای میان‌قاب با الیاف شیشه



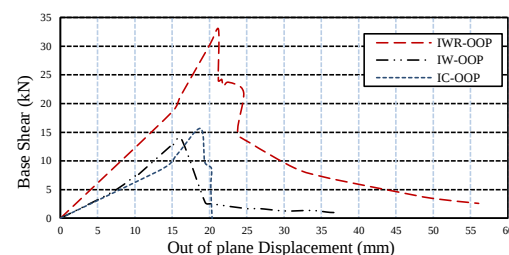
(ب) نمودار بار تغییر مکان میان‌قاب با الیاف شیشه



(پ) نمودار تغییر مکان سنج (LVDT) در طول بارگذاری

شکل ۱۳. (الف، ب، پ) نمودارهای خارج از صفحه میان‌قاب نمونه (IWR-OOP).

Fig. 13. (a, b, c) Out-of-Plane Diagrams of Infill Specimen IWR-OOP.



شکل ۱۴. مقایسه نمودار پوش رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های نمونه‌های آزمایشگاهی

Fig. 14. Comparison of Out-of-Plane Behavior Pushover Curves of Laboratory Infill Specimens.

جدول ۱۳. نتایج و مقایسه نیرو، جابه‌جایی نمونه‌های آزمایشگاهی.

Table 13. Results and Comparison of Force and Displacement for Laboratory Specimens.

Properties	Control Infill Frame with 2 cm Gap from Columns, Under Out-of-Plane Loading (IC-OOP)		Infill Frame with Wallpost, with 2 cm Gap from Columns, Under Out-of-Plane Loading (IW-OOP)		Glass Fiber Reinforced Infill Frame with Wallpost, with 2 cm Gap from Columns, Under Out-of-Plane Loading (IWR-OOP)	
	Force (kN)	Displacement (mm)	Force (kN)	Displacement (mm)	Force (kN)	Displacement (mm)
Peak Load	15.65	18.81	13.91	16	32.98	21.19
Minimum Load	8.24	20.20	1.6	38	3.31	50

از خود نشان داد، وجود ترکیب الیاف شیشه و شاتکریت باعث بالا بردن مقاومت برشی و کششی در میان‌قاب شد. زیرا مقاومت نسبت به سایر نمونه‌ها تا ۱۰۰٪ و جابه‌جایی تا ۱۵۰٪ افزایش داشت، حتی در جابه‌جایی‌های بزرگ، این سیستم تقویتی از ریزش مصالح جلوگیری کرد و یکپارچگی کلی سازه را حفظ نمود که باعث تغییر در رفتار میان‌قاب از حالت شکست ترد به شکست نرم شد.

قدردانی نویسندگان

از مسئولین آزمایشگاه سازه و تکنولوژی بتن، جناب آقای ابوالفضل محمدی، سیداحمد نظامی، خانوم دکتر دلارام استاد، آقای محمدجواد اسماعیلی، آقای میلاد فرجی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

تعارض منافع

برای نویسندگان این مقاله جهت انتشار آن تعارض منافی وجود ندارد.

نقش نویسندگان

جلیل شفائی: نظارت، گردآوری داده‌ها، مفهوم‌سازی. فرنوش باسلیقه: نظارت، مدیریت پروژه، روش‌شناسی، مفهوم‌سازی.

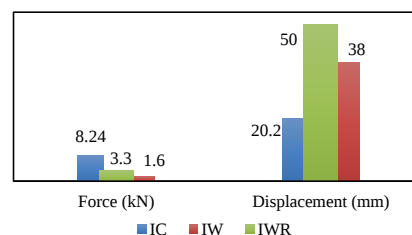
محمدجواد زارعی: نگارش - بازبینی و ویرایش، نگارش - پیش‌نویس اصلی، تصویرسازی، اعتبارسنجی، نرم‌افزار، روش‌شناسی، پژوهش، تحلیل رسمی، مفهوم‌سازی.

منابع مالی

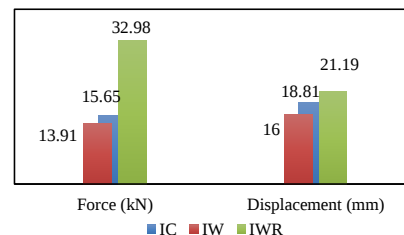
نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه منافع مالی رقابتی یا روابط شخصی شناخته‌شده‌ای که می‌توانسته بر کار گزارش شده در این مقاله تأثیرگذار باشد، ندارند.

هوش مصنوعی

در این مقاله از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.



(الف) نمودار کمترین نیرو و متناظر با جابه‌جایی در سه نمونه



(ب) نمودار بیشترین نیرو و متناظر با جابه‌جایی در سه نمونه

شکل ۱۴. نمودار میله‌ای مقایسه نمونه‌ها در نیرو و جابه‌جایی‌های متناظر باهم.

Fig. 15. Bar Chart Comparison of Specimens at Corresponding Force and Displacement Values.

۱- نمونه (IC-OOP) که با شرایط مرزی ساخته شد عملکردی قوسی را از خود نشان داد، که قبل از اینکه به مقاومت نهایی خود برسد یک ظرفیت مضاعف تحت اثر عملکرد قوسی نیز به وجود آمد نیرو افزایش شد، ولی در نهایت رفتار میان‌قاب رفتاری نامطلوب و شکستی ترد و فروریزش صورت گرفت.

۲- نمونه (IW-OOP) با والپست طبق ساختمان‌های موجود ساخته شد، عملکرد این نمونه عملکردی مطلوب ارائه داد، زیرا نه تنها اثر عملکرد قوسی دوجته را از خود نشان داد بلکه باعث شکست تدریجی مصالح و زوال در میان‌قاب و شکل‌پذیری میان‌قاب بودیم.

۳- نمونه (IWR-OOP) که با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا و شاتکریت تقویت شده بود عملکردی بسیار عالی و کارآمد را

References

- [1] Khanmohammadi, M., Eshraghi, M., Sayadi, S. and Mashhadinezhad, M.G., 2023. Post-earthquake seismic assessment of residential buildings following Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake (Mw7.3) part 1: Damage types and damage states. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173, p.108121. doi: [10.1016/j.soildyn.2023.108121](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108121).
- [2] McDowell, E.L., McKee, K.E. and Sevin, E., 1956. Arching action theory of masonry walls. *Journal of the Structural Division*, 82(2), pp.915-1-915-18. doi: [10.1061/JSDEAG.0000019](https://doi.org/10.1061/JSDEAG.0000019).
- [3] Ostad, D., Shafaei, J. and Alaei, F.J., 2025. Experimental evaluation of diagonal tension test on hollow clay block wallettes with different configurations of non-structural materials (cement and plaster). *Structures*, 79, p.109418. doi: [10.1016/j.istruc.2025.109418](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109418).
- [4] Ostad, D., Shafaei, J. and Alaei, F.J., 2025. Experimental evaluation of the diagonal tension test of hollow clay blocks strengthening with (AR) glass fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 23, p.e05151. doi: [10.1016/j.cscm.2025.e05151](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05151).
- [5] Ostad, D. and Shafaei, J., 2024. Investigating the seismic performance of masonry infills with opening and non-opening by considering the interaction of in-plane and out-of-plane behavior and providing the reduction factor of effective stiffness and ultimate strength. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54(114), pp.56-83.
- [6] Razeghi, V., Zargarani, M., Nikhoo, A., Attari Kha, A. et al., 2024. Experimental investigation of the cyclic behavior of non-load-bearing masonry walls strengthened using bed-joint reinforcement and fiber mesh. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 39(4), pp.89-99.
- [7] Halici, O.F., Demir, U., Zabbar, Y. and Ilki, A., 2023. Out-of-plane seismic performance of bed-joint reinforced autoclaved aerated concrete (AAC) infill walls damaged under cyclic in-plane displacement reversals. *Engineering Structures*, 286, p.116077. doi: [10.1016/j.engstruct.2023.116077](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116077).
- [8] Ostad, D. and Shafaei, J., 2021. Analytical investigation of the seismic performance of unreinforced masonry walls strengthened using steel strips. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12), pp.3161-3182.
- [9] Klun, M., Antolinc, D. and Bosiljkov, V., 2021. Out-of-plane experimental study of strengthening slender non-structural masonry walls. *Applied Sciences*, 11(19), p.9098. doi: [10.3390/app11199098](https://doi.org/10.3390/app11199098).
- [10] Di Domenico, M., De Risi, M.T., Ricci, P., Verderame, G.M. and Manfredi, G., 2021. Empirical prediction of the in-plane/out-of-plane interaction effects in clay brick unreinforced masonry infill walls. *Engineering Structures*, 227, p.111438. doi: [10.1016/j.engstruct.2020.111438](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111438).
- [11] Minotto, M., Verlato, N., Donà, M. and da Porto, F., 2020. Strengthening of in-plane and out-of-plane capacity of thin clay masonry infills using textile- and fiber-reinforced mortar. *Journal of Composites for Construction*, 24(6), p.04020059. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001067](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001067).
- [12] Alwashali, H., Sen, D., Jin, K. and Maeda, M., 2019. Experimental investigation of influences of several parameters on seismic capacity of masonry infilled reinforced concrete frame. *Engineering Structures*, 189, pp.11-24. doi: [10.1016/j.engstruct.2019.03.020](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.020).
- [13] Ismail, N., El-Maaddawy, T. and Khattak, N., 2018. Quasi-static in-plane testing of FRCM strengthened non-ductile reinforced concrete frames with masonry infills. *Construction and Building Materials*, 186, pp.1286-1298. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.07.230](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.230).
- [14] Kariou, F., Triantafyllou, S.P., Bournas, D. and Koutas, L., 2018. Out-of-plane response of masonry walls strengthened using textile-mortar system. *Construction and Building Materials*, 165, pp.769-781. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.01.026](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.026).
- [15] Triantafyllou, T.C., Karlos, K., Kefalou, K. and Argyropoulou, E., 2017. An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior. *Construction and Building Materials*, 133, pp.1-13. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.12.032](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.032).
- [16] Bischof, P. and Suter, R., 2014. Retrofitting masonry walls with carbon mesh. *Polymers*, 6(2), pp.280-299. doi: [10.3390/polym6020280](https://doi.org/10.3390/polym6020280).
- [17] Koutas, L., Pitytzogia, A., Triantafyllou, T.C. and Bousias, S.N., 2014. Strengthening of infilled reinforced concrete frames with TRM: Study on the development and testing of textile-based anchors. *Journal of Composites for Construction*, 18(3), p.A4013015. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000390](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000390).
- [18] Lunn, D.S. and Rizkalla, S.H., 2011. Strengthening of infill masonry walls with FRP materials. *Journal of Composites for Construction*, 15(2), pp.206-214. doi: [10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000088](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000088).
- [19] ASTM, 2021. *Standard test methods for sampling and testing brick and structural clay tile*.
- [20] ASTM, 2023. *ASTM C33/C33M-23: Standard specification for concrete aggregates*.
- [21] ASTM, 2019. *ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*.
- [22] ASTM, 2021. *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
- [23] ASTM, 2016. *ASTM A370: Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products*.

- [24] BHRC, 2013. *Standard No. 2800: Seismic design of buildings*, 4th ed. Appendix 6: Seismic design and construction of architectural nonstructural components.
- [25] ASTM, 2018. *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*.
- [26] Ostad, D. and Shafaei, J., 2024. Investigating the seismic performance of masonry infills with opening and non-opening by considering the interaction of in-plane and out-of-plane behavior and providing the reduction factor of effective stiffness and ultimate strength.
- [27] Asteris, P., Cavaleri, L., Di Trapani, F. and Tsaris, A., 2017. Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels. *Engineering Structures*, 132, pp.110–122. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.10.012.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟	
Reference	