ارزیابی آزمایشگاهی رفتار برون‌صفحه‌ای میان‌قاب بنایی سفالی جداشده از قاب بتن‌آرمه و تقویت‌شده با الیاف شیشه و نبشی فولادی

میلاد فرجی [۱]، جلیل شفائی [*۲]، فرنوش باسلیقه [۳]، محمدجواد زارعی [۴]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، Miladfaraji@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران،jshafaei@shahroodut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، f_basaligheh@yahoo.com

۴- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، mohammadjavadzarei@shahroodut.ac.ir

چکیده

عملکرد لرزه‌ای میان‌قاب‌های بنایی، به‌ویژه در برابر بارهای برون‌صفحه‌ای، نقش مهمی در ایمنی ساختمان‌های بتن‌آرمه دارد. آسیب‌های مشاهده‌شده در زلزله‌های اخیر، از جمله زلزله کرمانشاه، ضرورت بهبود جزئیات اتصال و مهار میان‌قاب‌ها را نشان داده است. در این پژوهش، رفتار برون‌صفحه‌ای میان‌قاب‌های ساخته‌شده از بلوک سفالی سوراخ‌دار با تمرکز بر اثر جداسازی از قاب پیرامونی و تقویت هم‌زمان آن بررسی شد. بدین منظور، سه نمونه قاب بتن‌آرمه در مقیاس ۱:۲ شامل میان‌قاب متصل به قاب، میان‌قاب جداسازی‌شده از ستون‌های پیرامونی و میان‌قاب جداسازی‌شده از ستون‌های پیرامونی و تقویت‌شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا و نبشی‌های فولادی منقطع، تحت بارگذاری چرخه‌ای برون‌صفحه‌ای آزمایش شدند. نتایج نشان داد که جداسازی میان‌قاب از ستون‌های پیرامونی، در نمونه بدون تقویت و بدون مهار موضعی، منجر به کاهش ظرفیت باربری شد؛ به‌طوری‌که بار اوج نمونه متصل به قاب برابر با ۱۶.۶۷کیلونیوتن بود، درحالی‌که این مقدار برای نمونه جداسازی‌شده به ۱۵.۶۵کیلونیوتن کاهش یافت .در مقابل، ترکیب جداسازی و تقویت میان‌قاب با الیاف شیشه و نبشی‌های فولادی منقطع، بار اوج را به ۲۵,۳۰ کیلونیوتن افزایش داد و ظرفیت تغییرشکل نهایی را ۶,۱۱ درصد بهبود بخشید. تقویت پیشنهادی با کنترل گسترش ترک‌ها و توزیع یکنواخت‌تر آسیب، موجب بهبود رفتار پس از ترک‌خوردگی و حفظ یکپارچگی میان‌قاب شد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب جداسازی و تقویت موضعی می‌تواند راهکاری مؤثر برای بهبود رفتار برون‌صفحه‌ای و کاهش خطر فروریزش ناگهانی میان‌قاب‌های بنایی در ساختمان‌های بتن‌آرمه باشد.

کلید واژه: میان‌قاب بنایی؛ رفتار برون‌صفحه‌ای؛ جداسازی میان‌قاب؛ الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا؛ نبشی فولادی.

۱- مقدمه

میان‌قاب‌های مصالح بنایی از اجزای متداول در ساختمان‌های بتن مسلح هستند که عملکرد آن‌ها، به‌ویژه تحت بارهای برون‌صفحه‌ای، نقش مهمی در ایمنی سازه دارد. تجربه زلزله‌های اخیر نشان داده است که مهاربندی ناکافی این دیوارها می‌تواند منجر به خسارات گسترده شود [۱]. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر تأثیر استفاده از نبشی‌های منقطع و الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (AR-Glass)[1] بر رفتار برون‌صفحه میان‌قاب‌های سفالی به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

داو و سیه[2] (۱۹۸۹) با انجام آزمایش بر روی نه پانل بنایی محصور در قاب‌های فولادی و تحت بارگذاری برون‌صفحه به‌وسیله کیسه هوا، نقش سختی قاب پیرامونی را در رفتار دیوار بررسی کردند. نتایج نشان داد که سختی قاب یکی از عوامل اصلی در شکل‌گیری مکانیزم قوسی است؛ به‌گونه‌ای که در قاب‌های انعطاف‌پذیر، جدایی زودهنگام دیوار از مرزهای اطراف رخ داده و شکل‌پذیری سیستم

[1] Alkali Resistant Glass
[2] J. L. Dawe & C. K. Seah

ACCEPTED MANUSCRIPT

پس از ترک‌خوردگی، به‌ویژه در حضور بازشوها، کاهش می‌یابد [۲]. گریفیت و واکولیک[1] (۲۰۰۷) با آزمایش هشت دیوار بنایی در مقیاس کامل، تأثیر بارهای ثقلی بر رفتار برون‌صفحه را ارزیابی کردند. بارگذاری به‌صورت کنترل تغییرمکان انجام شد و نتایج نشان داد که پیش‌فشار عمودی ناشی از بارهای ثقلی همانند یک نیروی پیش‌تنیدگی عمل کرده و موجب افزایش سختی خمشی و ظرفیت باربری دیوار می‌شود [۳]. آخوندی و همکاران[2] (۲۰۱۶) رفتار برون‌صفحه دیوارهای پرکننده بنایی دارای بازشو را در سه نمونه با مقیاس کاهش‌یافته مورد مطالعه قرار دادند. نمونه‌ها تحت بارگذاری یکنواخت برون‌صفحه قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن بود که کیفیت اجرای درزهای تماس میان دیوار و قاب پیرامونی تأثیر مستقیمی بر تشکیل مکانیزم قوسی دارد. همچنین با وجود کاهش سختی اولیه ناشی از بازشوها، در صورت تأمین مهار مناسب لبه‌ها، ظرفیت باربری دیوار تا حد زیادی حفظ می‌شود [۴].

دومنیکو و همکاران[3] (۲۰۱۸) اثر شرایط مختلف تکیه‌گاهی را بر رفتار برون‌صفحه دیوارهای بنایی غیرمسلح بررسی کردند. در این مطالعه، دیوارهایی با دو، سه و چهار لبه مهارشده تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مهار جانبی دیوار نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری مکانیزم قوسی افقی دارد و دیوارهای مهارشده در چهار طرف از مقاومت و پایداری بسیار بیشتری نسبت به دیوارهای دارای مهار محدود برخوردار هستند [۵]. رایسی و همکاران[4] (۲۰۱۸) بیان کردند که آسیب‌های درون‌صفحه می‌توانند مکانیزم انتقال بار قوسی را مختل کرده و مقاومت برون‌صفحه را به شدت کاهش دهند [۶]. وردرامه و همکاران[5] (۲۰۱۹) کارایی سیستم‌های[6](FRCM) و [7](FRP) را در بهبود برون‌صفحه بررسی کرده و نشان دادند که تقویت (FRCM) موجب افزایش چشمگیر مقاومت برون‌صفحه می‌شود. همچنین ترکیب عملکرد خمشی الیاف و مکانیزم قوسی داخلی پس از ترک‌خوردگی، موجب حفظ ظرفیت باربری دیوار در مراحل پیشرفته آسیب می‌شود [۷]. کوتاس و همکاران[8] (۲۰۱۹) رفتار شش قاب بتنی پرشده مقاوم‌سازی‌شده با پوشش‌های را تحت بارگذاری برون‌صفحه ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که اتصال مناسب لایه‌های تقویتی به قاب پیرامونی موجب افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری و جلوگیری از وقوع شکست برشی در دیوار می‌شود [۸]. دومنیکو و همکاران (۲۰۲۰) رفتار لرزه‌ای برون‌صفحه چهار تیغه بنایی نازک را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح به الیاف (FRCM) در مقایسه با روش‌های مبتنی بر رزین اپوکسی، موجب افزایش شکل‌پذیری، ظرفیت تغییرشکل و کاهش احتمال جداشدگی قطعات بنایی در هنگام زلزله می‌شود [۹].

پردهان و همکاران[9] (۲۰۲۱) در یک مطالعه مروری جامع، نتایج ۵۸ برنامه آزمایشگاهی شامل حدود ۱۲۰ نمونه دیوار بنایی را بررسی کردند. این پژوهش انواع بارگذاری‌های خارج‌ازصفحه و ترکیبی درون‌صفحه و برون‌صفحه را مورد ارزیابی قرار داد و نشان داد که مقاومت خارج‌ازصفحه دیوارهای بنایی عمدتاً از طریق مکانیزم قوسی ناشی از محصورشدگی قاب تأمین می‌شود. همچنین عواملی نظیر نسبت لاغری، شرایط مرزی، وجود شکاف در لبه‌ها و آسیب‌های پیشین درون‌صفحه، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش ظرفیت باربری خارج‌ازصفحه دارند [۱۰]. رایسی و همکاران (۲۰۲۲) چهار دیوار بنایی در مقیاس کامل را تحت بارگذاری‌های متوالی درون‌صفحه و برون‌صفحه مورد آزمایش قرار دادند تا اثر آسیب‌های متقابل بررسی شود. نتایج نشان داد که مقاوم‌سازی با TRM موجب افزایش سختی دینامیکی و فرکانس طبیعی دیوار شده و اثرات منفی آسیب‌های ناشی از بارگذاری درون‌صفحه را بر عملکرد برون‌صفحه تا حد زیادی جبران می‌کند [۱۱]. استاد و همکاران[10] (۲۰۲۵) با بررسی آزمایشگاهی ۲۱ دیوار پرکننده سفالی نشان دادند که پوشش‌های گچی و سیمانی دوطرفه به‌ترتیب مقاومت برشی را ۵۳ و ۴۲۴ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش می‌دهند که بیانگر تأثیر قابل توجه پوشش‌های سطحی بر بهبود عملکرد برشی دیوارهای بنایی است [۱۲]. استاد و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که تقویت پانل‌های سفالی با شبکه‌های الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (AR Glass) و ملات سیمانی دوطرفه، مقاومت برشی را تا ۵۱۲ درصد افزایش داده

[1] M.C. Griffith1 and J. Vaculik
[2] F. Akhoundi et al.
[3] Mariano Di Domenico et al.
[4] Paolo Ricci et al.
[5] Verderame, Gerardo M et al.
[6] Fabric reinforced cementitious matrix
[7] Fiber reinforced polymer
[8] N.Lampros Koutas et al.
[9] Bharat Pradhan et al.
[10] Ostad et al.

ACCEPTED MANUSCRIPT

و مکانیزم گسیختگی را از رفتار ترد به رفتار شکل‌پذیر تغییر می‌دهد[۱۳]. استاد و همکاران (۲۰۲۶) با بررسی ۵ نمونه قاب بتن‌آرمه در مقیاس ۱:۲ (شامل قاب تنها و قاب با میان‌قاب تحت بارگذاری درون‌صفحه و برون‌صفحه ، با و بدون تقویت)، نشان دادند که نوارهای الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (AR Glass) با تقویت مکانیزم قوس دوطرفه، موجب افزایش ظرفیت باربری، جذب انرژی و جلوگیری از جداشدگی و ریزش قطعات بنایی می‌شوند [۱].

زارعی و همکاران[1] (۲۰۲۶) در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۶ نمونه قاب بتن‌مسلح ویژه دارای میانقاب در مقیاس ۱:۲ تحت بارگذاری داخل و خارج از صفحه نشان دادند که استفاده از سیستم ترکیبی وال‌پست و الیاف شیشه مقاوم به قلیا موجب بهبود مقاومت، شکل‌پذیری و رفتار لرزه‌ای شده [۱۴, ۱۵].

چن و همکاران[2] (۲۰۲۵) رفتار خارج از صفحه میانقاب‌های آجری با شرایط مهاری مختلف را بررسی کردند. ۴ نمونه در مقیاس کامل تحت بارگذاری یکنواخت خارج از صفحه آزمایش شدند. نتایج نشان داد استفاده از مهار کوتاه‌شده و سراسری، ظرفیت باربری را به‌ترتیب حدود ۱/۹ و ۲/۴ برابر نمونه بدون مهار افزایش داد. در نهایت، نقش تعیین‌کننده شرایط اتصال و مهار دیوار در مقاومت و پایداری خارج از صفحه تأیید شد[۱۶]. شیه و همکاران[3] (۲۰۲۳) اثر نسبت لاغری، ضخامت و الگوی چیدمان آجرها را بر رفتار خارج از صفحه بررسی کردند. ۴ نمونه در مقیاس کامل تحت بارگذاری افزایشی خارج از صفحه قرار گرفتند. دیوار با نسبت لاغری کمتر (۱۳/۴) در مقایسه با دیوار با لاغری ۲۸/۸، حدود ۳/۷ برابر مقاومت و بیش از ۳/۵ برابر ظرفیت استهلاک انرژی بیشتری داشت. نتایج نشان داد نسبت لاغری و آرایش آجرها از عوامل اصلی مؤثر بر عملکرد خارج از صفحه هستند[۱۷].

کریمی و میرجلیلی[4] (۲۰۲۵) عملکرد خارج از صفحه میانقاب‌های بنایی جداشده و روش‌های مختلف تقویت را بررسی کردند. ۲۶ نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه قرار گرفتند. استفاده از اندود سیمانی و گچ-پرلیت مقاومت خمشی را به‌ترتیب ۵۲۱ و ۳۷۹ درصد افزایش داد و شبکه سیمی جوش‌داده‌شده نیز موجب افزایش ۲۵۸ درصدی مقاومت و ۲۶۵ درصدی شکل‌پذیری شد. نتایج بر اثربخشی تقویت سطحی، به‌ویژه شبکه سیمی و GFRP[5] در بهبود عملکرد لرزه‌ای تأکید داشت[۱۸]. ژانگ و همکاران[6] (۲۰۲۳) رفتار میانقاب‌های AAC[7] را تحت بارگذاری درون‌صفحه، خارج از صفحه و اندرکنشی بررسی کردند. ۴ نمونه در مقیاس ۱:۲ تحت بارگذاری مونوکلونیک خارج از صفحه و بارگذاری چرخه‌ای درون‌صفحه–خارج از صفحه قرار گرفتند. استفاده از ملات نانوسیلیس موجب افزایش ۲۳/۵۷ درصدی مقاومت و ۶۵/۸۸ درصدی سختی اولیه شد، درحالی‌که آسیب درون‌صفحه‌ای ظرفیت خارج از صفحه را کاهش داد. نتایج اهمیت اثر اندرکنش بارگذاری‌ها و بهبود خواص ملات را نشان داد[۱۹].

با وجود مطالعات گسترده درباره رفتار برون‌صفحه‌ای دیوارهای بنایی و روش‌های مختلف مقاوم‌سازی، بیشتر پژوهش‌های پیشین بر اثر شرایط مرزی، مکانیزم قوسی، آسیب‌های درون‌صفحه‌ای با روش‌های تقویتی نظیر FRP، FRCM و TRM[8] متمرکز بوده‌اند [۲۰, ۲۱]. اگرچه رفتار درون‌صفحه‌ای و اندرکنش قاب و میانقاب از جنبه‌های مهم عملکرد لرزه‌ای میانقاب‌های بنایی به شمار می‌روند، پیامدهای ایمنی ناشی از گسیختگی و ریزش برون‌صفحه‌ای، ضرورت توجه ویژه به این مؤلفه را نشان می‌دهد. با این حال، اثر همزمان جداسازی میانقاب از قاب بتن‌آرمه، مهار موضعی با استفاده از نبشی‌های فولادی منقطع و تقویت سطحی با مش الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا (AR-Glass) بر رفتار برون‌صفحه‌ای میانقاب‌های سفالی، تاکنون کمتر به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در ارزیابی تجربی عملکرد ترکیبی این سه راهکار و بررسی نقش مکمل آن‌ها در بهبود رفتار برون‌صفحه‌ای میانقاب‌های سفالی است. در این راستا، تأثیر این ترکیب بر ظرفیت باربری و تغییرشکل‌پذیری، کنترل و گسترش ترک‌ها، و کاهش احتمال گسیختگی و ریزش ناگهانی میانقاب تحت بارگذاری برون‌صفحه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، سه نمونه قاب بتن‌آرمه در مقیاس ۱:۲ شامل میان‌قاب متصل، میان‌قاب جداسازی‌شده و میان‌قاب جداسازی‌شده و تقویت‌شده

[1] Zarei et al.
[2] Chen et al.
[3] Xie et al.
[4] Karimi & Mirjalili
[5] Glass Fiber-Reinforced Polymer
[6] Zhang et al.
[7] Autoclaved Aerated Concrete
[8] Textile-Reinforced Mortar

ACCEPTED MANUSCRIPT

با AR-Glass و نبشی‌های فولادی منقطع تحت بارگذاری برون‌صفحه‌ای آزمایش و از نظر ظرفیت باربری، سختی، تغییرشکل و مکانیزم گسیختگی مقایسه شده‌اند. همچنین در «جدول ۱» مقایسه پژوهش حاضر با سایر روش‌های تقویت شده در مطالعات پیشین صورت گرفت که ارتباط و وجه تمایز این روش با روش‌های دیگر کاملا مشخص شد.

جدول ۱: مقایسه پژوهش حاضر با مطالعات پیشین و مرتبط از نظر روش‌های تقویت و مهار میانقاب

Table 1. Comparison of the current study with previous related research in terms of infill strengthening and restraining methods.

مطالعه	نوع میانقاب	بارگذاری	روش تقویت	مهار موضعی	هدف اصلی	نوآوری / سهم پژوهش
دومنیکو و همکاران (۲۰۲۰)	بلوک سفالی	خارج از صفحه	AR Glass Fiber	خیر	بررسی عملکرد تقویت سطحی	ارزیابی اثربخشی AR Glass Fiber
کوتاس و همکاران (۲۰۱۹)	بلوک سفالی توخالی	خارج از صفحه	AR Glass Fiber	خیر	بهسازی لرزه‌ای میانقاب	بررسی عملکرد AR Glass Fiber تحت بارگذاری ترکیبی
استاد و همکاران (۲۰۲۶)	بلوک سفالی توخالی	خارج از صفحه	AR Glass Fiber	خیر	بهسازی میانقاب	توسعه روش‌های مختلف تقویت
زارعی و همکاران (۲۰۲۶)	بلوک سفالی توخالی	خارج از صفحه	AR Glass Fiber	بله	کنترل خرابی	ترکیب تقویت سطحی و مهار با وال‌پست
پژوهش حاضر	بلوک سفالی توخالی	خارج از صفحه	AR Glass Fiber	بله؛ نبشی‌های موضعی	کنترل خرابی و بهبود پاسخ لرزه‌ای	ترکیب تقویت سطحی و مهار موضعی در یک سیستم یکپارچه

۲- برنامه آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی تأثیر روش تقویت با استفاده از الیاف شیشه و نبشی‌های فولادی منقطع بر رفتار برون‌صفحه‌ای میان‌قاب‌های ساخته‌شده با بلوک سفالی در قاب‌های بتن‌آرمه، سه نمونه قاب بتن‌آرمه با پیکربندی‌های مختلف در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته و آزمایش شدند. نمای کلی ساخت نمونه‌ها در «شکل ۴» ارائه شده است. با توجه به نیم مقیاس بودن نمونه‌ها، ابعاد و وزن قاب–میانقاب، پیچیدگی ساخت و اجرای آزمایش‌های چرخه‌ای و محدودیت‌های اجرایی و منابع پژوهش، برای هر پیکربندی یک نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به ماهیت ناهمگن مصالح بنایی، این تعداد نمونه امکان ارزیابی آماری تکرارپذیری نتایج را محدود می‌کند؛ ازاین‌رو، نتایج این پژوهش با رویکرد مقایسه‌ای و بر مبنای رفتار مشاهده‌شده نمونه‌ها تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان تفسیر شده‌اند. در این راستا، مقایسه عملکرد نمونه‌ها بر اساس شاخص‌های مختلف رفتاری شامل ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری، جابه‌جایی و اتلاف انرژی انجام شده است.

۲-۱- مشخصات و ویژگی‌های نمونه‌های آزمایشگاهی

پژوهش حاضر بر بررسی آزمایشگاهی سه نمونه در مقیاس ۱:۲ متمرکز است: الف) میان‌قاب چهارطرف مقیدشده، ب) قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب جداسازی‌شده، و پ) میان‌قاب جداسازی‌شده و تقویت‌شده با الیاف شیشه، با فاصله ۲۰ میلی‌متر از طرفین میان‌قاب تا قاب و مهارشده با نبشی‌های فولادی منقطع. مراحل ساخت نمونه‌ها در «شکل ۳» نشان داده شده است. با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی از جمله ظرفیت جک، دامنه جابه‌جایی، ظرفیت کف صلب و ظرفیت قاب آزمایشگاهی، قاب مورد مطالعه از یک ساختمان مرجع استخراج و با مقیاس ۱:۲ ساخته و آزمایش شد. لازم به ذکر است که مقیاس‌سازی صرفاً برای قاب بتن‌آرمه اعمال شده و بلوک‌های سفالی میانقاب با ابعاد و مشخصات واقعی و بدون مقیاس‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند؛ زیرا با توجه به ماهیت تولید

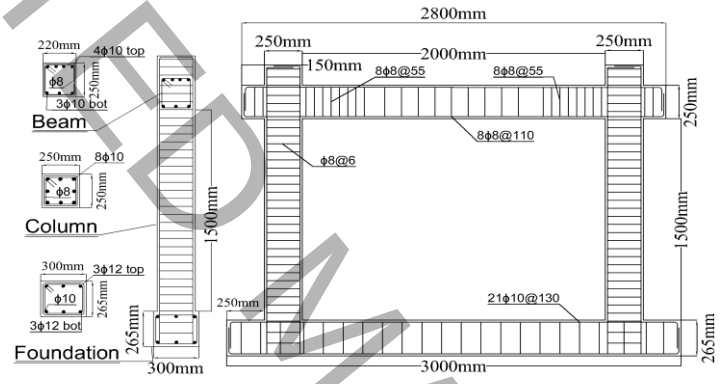
ACCEPTED MANUSCRIPT

صنعتی و ابعاد استاندارد بلوک‌های سفالی، تغییر ابعاد آن‌ها می‌توانست ویژگی‌های واقعی مصالح میانقاب را تحت تأثیر قرار دهد. طراحی و اجرای این نمونه‌ها بر اساس الزامات مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و با در نظر گرفتن ضوابط قاب‌های خمشی ویژه انجام شد. هر قاب دارای دهانه‌ای به طول ۲۰۰۰ میلی‌متر و ارتفاعی برابر با ۱۵۰۰ میلی‌متر از روی فونداسیون تا زیر تیر است. برای تأمین مهار جانبی میان‌قاب‌ها از نبشی‌های فولادی منقطع استفاده شد که جزئیات آن در «شکل ۲-پ» نشان داده شده است. همچنین، به‌منظور استقرار و عملکرد مناسب الیاف شیشه مقاوم در برابر محیط‌های قلیایی (AR-Glass)، جزئیات اجرایی لازم برای برقراری اتصال مؤثر میان‌قاب به تیر و فونداسیون در نظر گرفته و اجرا شد که در «شکل ۵» نشان داده شده است. معرفی نمونه‌ها و نقشه اجرایی آن‌ها در «شکل ۱» و «جدول ۲» ارائه شده است.

جدول ۲ : مشخصات و نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشگاهی.

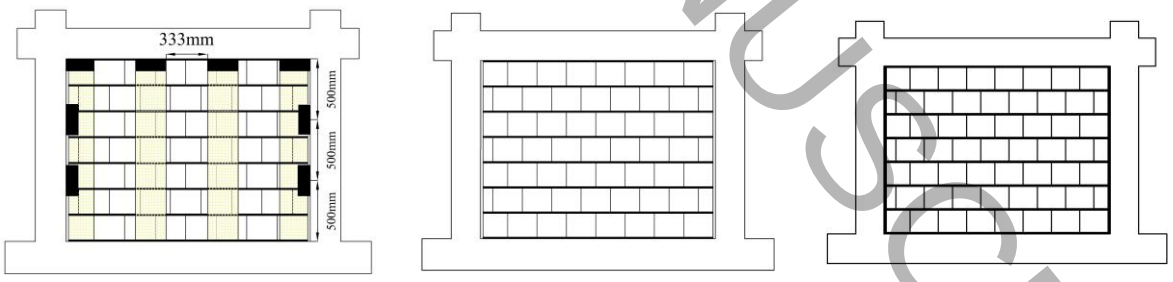
Table 2. Specifications and designation of the laboratory specimens.

نمونه	اشکال	مشخصات
(FI-NI-OOP)[1]	(شکل ۲-الف)	نمونه قاب بتن‌آرمه ویژه با میان‌قاب ۴ طرف بسته
(FI-I-OOP)[2]	(شکل ۲-ب)	نمونه قاب بتن‌آرمه ویژه با میان‌قاب جداسازی شده
(RFI-I-OOP)[3]	(شکل ۲-پ)	نمونه قاب بتن آرمه ویژه با میان‌قاب تقویت شده با الیاف شیشه مقاوم به قلیا و جداسازی شده



شکل ۱ : نمای شماتیک جزئیات اجرایی نمونه قاب بتن‌آرمه (اندازه‌ها بر حسب میلیمتر).

Fig. 1. Schematic view of the construction details of the reinforced concrete frame specimen (dimensions in mm).



RFI-I-OOP (پ) FI-I-OOP (ب) FI-NI-OOP (الف)

شکل ۲ : شمای کلی و جزئیات اجرایی نمونه‌های آزمایشگاهی.

Fig. 2. Schematic view of the construction details of the reinforced concrete frame specimen (dimensions in mm).

[1] Frame infill not izolated out-of-plane
[2] Frame infill izolated out-of-plane
[3] Retrofit Frame infill izolated out-of-plane

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۲- ساخت و آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی

نحوه ساخت نمونه‌ها بدین صورت بود که ابتدا قالب‌های فلزی مقیاس‌شده از ورق‌های فولادی با ضخامت ۲ میلی‌متر تهیه شدند. فرآیند ساخت قالب‌ها شامل اندازه‌گیری، برش، خم‌کاری و جوشکاری اجزای مختلف بود و در نهایت، قالب یکپارچه فونداسیون، ستون‌ها و تیر مونتاژ شد. به‌منظور ایجاد اتصال مناسب بین بخش‌های مختلف قالب در زمان بتن‌ریزی، از اتصالات پیچ‌ومهره‌ای استفاده شد. همچنین، برای جلوگیری از تغییرشکل و خیز احتمالی تیر در طول عملیات بتن‌ریزی و دوره عمل‌آوری، تکیه‌گاه‌های موقت در زیر تیر تعبیه شدند؛ محل این تکیه‌گاه‌ها در «شکل ۳-ث» نشان داده شده است. به‌منظور کنترل راستای قائم ستون‌ها و حفظ شاقولی قاب، یک پروفیل قوطی فولادی با ابعاد ۲۰×۲۰ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر در داخل دهانه نصب شد. مراحل ساخت و اجرای نمونه‌ها به‌صورت گام‌به‌گام و مشابه روند اجرایی سازه‌های واقعی انجام شد که تصاویر آن در «شکل ۳-پ» ارائه شده است. پس از آماده‌سازی قالب، قاب‌های بتن‌آرمه با شکل‌پذیری ویژه مطابق جزئیات طراحی و اجرایی موردنظر ساخته شدند. استفاده از قاب بتن‌آرمه در پیکربندی آزمایشگاهی، علاوه بر فراهم‌کردن بستر سازه‌ای مناسب برای میانقاب، امکان بازنمایی واقع‌بینانه‌تر شرایط مصالح، شرایط مرزی و نحوه اتصال میانقاب به اعضای پیرامونی را فراهم می‌کند. بنابراین، میانقاب‌ها در شرایطی نزدیک‌تر به وضعیت واقعی خود در ساختمان‌های جدیدالاحداث مورد آزمایش قرار گرفتند.

پس از آماده‌سازی قاب، دیوارهای میان‌قاب با استفاده از بلوک‌های سفالی سوراخ‌دار به ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر اجرا شدند و ارتفاع نهایی آن‌ها برابر با ۱۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. برای تثبیت و مهار ردیف انتهایی بلوک‌ها، از ترکیب نبشی و تسمه فولادی استفاده شد که به‌وسیله پیچ رول‌پلاک شماره ۸ به قاب متصل گردید. شمای کلی و جزئیات نمونه‌ها در «شکل ۴» نشان داده شده است. در بخش فوقانی میانقاب، به‌منظور تأمین هم‌پوشانی مناسب آخرین ردیف بلوک‌ها و ایجاد بستر مناسب برای مهار مش الیاف شیشه، از نبشی‌های فولادی نصب‌شده در زیر تیر استفاده شد. این نبشی‌ها به‌وسیله پیچ رول‌پلاک به تیر متصل گردیدند. همچنین، در بخش پایینی میانقاب، به‌منظور تأمین مهار مش و انتقال مناسب نیرو به فونداسیون، از تسمه‌های فولادی استفاده شد. پس از نصب و تثبیت مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا (AR-Glass Fiber) بر روی سطح میانقاب و مهار انتهای آن به‌وسیله نبشی‌ها و تسمه‌های فولادی، ملات ماسه–سیمان با ضخامت ۱۰ میلی‌متر بر روی مش اجرا شد؛ به‌گونه‌ای که مش به‌طور کامل درون لایه ملات قرار گرفته و پوشش یکنواختی ایجاد شود.

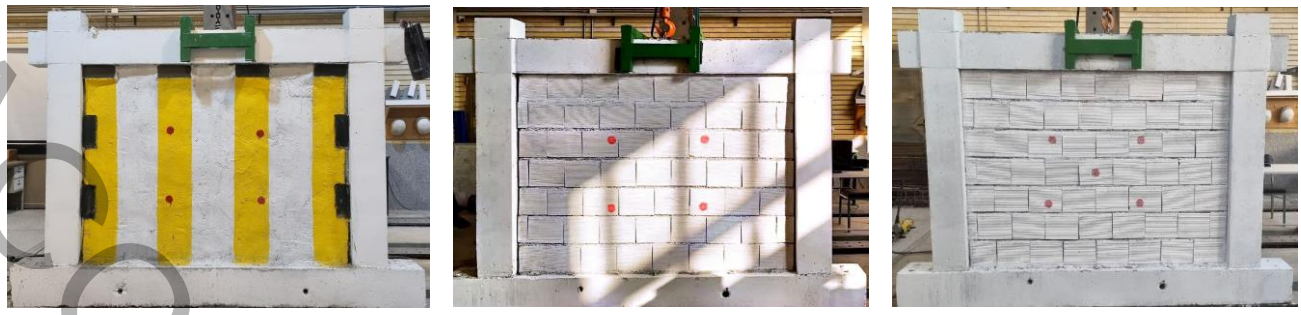


(الف) (ب) (پ) (ت) (ث)

شکل ۳ : مراحل ساخت قاب بتن مسلح، (الف) قالب بندی فونداسیون، (ب) بتن‌ریزی فونداسیون، (پ) قالب‌بندی و بتن‌ریزی ستون‌ها، (ت) قالب‌بندی و بتن‌ریزی تیر.

Fig. 3. Construction stages of the reinforced concrete frame: (a) foundation formwork, (b) foundation concrete pouring, © column formwork and concreting, (d) beam formwork and concreting.

ACCEPTED MANUSCRIPT



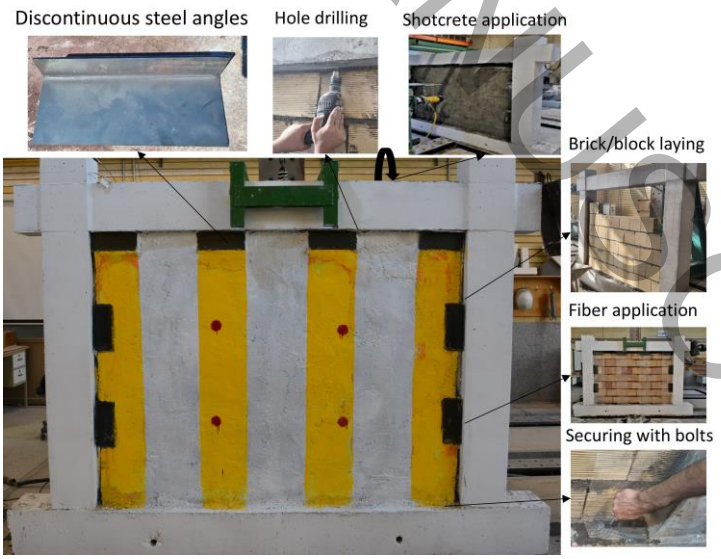
(الف) نمونه (FI-NI-OOP)　(ب) نمونه (FI-I-OOP)　(پ) نمونه (RFI-I-OOP)

شکل ۴ : شمای کلی از نمونه‌های ساخته شده بعد از عمل‌آوری و آماده برای آزمایش برون صفحه.

Fig. 4. General view of the fabricated specimens after curing, ready for out-of-plane testing.

۳-۲- ملاحظات اجرایی و کاربرد عملی

سیستم تقویتی پیشنهادی متشکل از الیاف شیشه مقاوم به قلیا (AR-Glass Fiber) و اجزای فولادی منقطع، از نظر اجرایی روشی نسبتاً ساده و قابل‌اجرا است و همان‌گونه که در بخش ۲-۲ و «شکل۵» قابل مشاهده و تشریح شد، مهار آن با استفاده از نبشی‌ها و تسمه‌های فولادی و اتصالات مکانیکی انجام می‌شود. استفاده از اجزای فولادی منقطع و لایه الیاف شیشه می‌تواند ضمن کاهش حجم عملیات اجرایی، امکان تقویت موضعی نواحی بحرانی میانقاب را فراهم کند؛ بااین‌حال، مقایسه اقتصادی دقیق آن با روش‌های FRP و FRCM به قیمت مصالح و شرایط اجرایی پروژه وابسته است. این سیستم از نظر مفهومی قابلیت استفاده در میانقاب‌های دارای بازشو را نیز دارد، اما به دلیل تغییر مسیر انتقال نیرو و تمرکز تنش در اطراف بازشو، آرایش اجزای تقویتی باید متناسب با هندسه بازشو اصلاح شود و تعمیم نتایج حاضر به این نوع میانقاب‌ها نیازمند بررسی آزمایشگاهی بیشتر است. همچنین، اگرچه استفاده از الیاف مقاوم به قلیا موجب افزایش مقاومت آن‌ها در محیط سیمانی می‌شود، ارزیابی عملکرد بلندمدت سیستم مستلزم انجام آزمون‌های دوام است. در نهایت، ابعاد و فاصله بهینه نبشی‌ها و میزان الیاف به عواملی نظیر ارتفاع، ضخامت و ابعاد میانقاب و شرایط اتصال آن به قاب وابسته بوده و تعیین روابط طراحی عمومی برای این پارامترها نیازمند مطالعات پارامتریک و آزمایش‌های تکمیلی است.



شکل ۵ : مراحل اجرای سیستم تقویت شده میانقاب بنایی.

Fig. 5. Construction stages of the strengthened masonry infill system.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳- آزمایش مصالح

۳-۱- بلوک سفال

خواص فشاری بلوک‌های سفالی از طریق انجام آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C67 مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۲]. نتایج حاصل، میانگین مقاومت فشاری در جهت عمود بر سوراخ‌های بلوک ۴/۳۸ مگاپاسکال و در جهت موازی با سوراخ‌ها ۰/۸۰۲ مگاپاسکال تعیین شد. نتایج کامل آزمایش‌ها در «جدول۳» ارائه شده است. اختلاف قابل توجه بین مقادیر مقاومت در دو راستا، تأثیر آرایش هندسی حفره‌ها بر رفتار مکانیکی بلوک‌های سفالی را نشان می‌دهد.

جدول ۳ : نتایج آزمایش فشاری بلوک سفال.

Table 3. Compressive test results of the clay blocks.

نمونه	تعداد نمونه‌ها (MPa)					میانگین	انحراف معیار	کواریانس[1] (٪)
	S۱	S۲	S۳	S۴	S۵			
بلوک سفال- حفره‌ها افقی	۰/۶۸۲	۰/۸۷۶	۰/۸۰۳	۰/۸۴۶	۰/۸۰۷	۰/۸۰۲	۰/۰۶۵	٪۸
بلوک سفال- حفره‌ها عمودی	۲/۹۲	۳/۴۲	۵/۹	۵/۴۲	۳/۴۷	۴/۳۸	۳/۳۰	٪۱۱

۳-۲-آرماتور

به‌منظور ارزیابی مشخصات مقاومتی آرماتورهای مورد استفاده، آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM A370 انجام گرفت [۲۳]. نتایج آزمون‌ها نشان داد که میانگین مقاومت تسلیم آرماتورهای شماره ۸، ۱۰ و ۱۲ به‌ترتیب ۳۵۵، ۳۴۳ و ۴۹۴ مگاپاسکال است. مقادیر حاصل مبنای تعیین خواص مکانیکی فولاد در تحلیل و تفسیر نتایج آزمایشگاهی قرار گرفت نتایج آزمایشگاهی را در «جدول۴» نمایش داده شده است.

جدول ۴ : مشخصات رفتاری آرماتورها.

Table 4. Mechanical properties of the reinforcing bars.

مصالح	میانگین تنش تسلیم[4] (MPa)	میانگین تنش گسیختگی[3] (MPa)	کرنش گسیختگی[2] (٪)
آرماتور نمره ۱۲	۴۹۴	۶۱۴	۰/۱۶۵
آرماتور نمره ۱۰	۳۴۳	۵۶۱	۰/۱۸
آرماتور نمره ۸	۳۵۵	۵۱۴	۰/۲۱۳

۳-۳- الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا

برای تأمین شرایط مهاری مناسب، نوارهای شبکه الیاف شیشه در امتداد لبه‌های فوقانی و تحتانی به‌ترتیب توسط نبشی‌های فولادی متصل به زیر تیر و فونداسیون مهار شدند. آرایش نبشی‌ها با فواصل یکسان در طول نمونه‌ها در نظر گرفته شد تا توزیع یکنواخت نیرو در شبکه الیاف فراهم شود. ارزیابی مشخصات مکانیکی الیاف بر اساس دستورالعمل ASTM E2098 انجام گرفت [۲۴]، نتایج نشان داد که میانگین مقاومت کششی الیاف شیشه برابر با ۹۱۸ مگاپاسکال است. آزمایش نمونه‌های الیاف شیشه در «شکل۶-پ» قابل مشاهده است.

[1] Covariance
[2] Ultimate Strain
[3] Ultimate Stress
[4] Yield Stress

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-۳- مشخصات مکانیکی بتن و ملات

ویژگی‌های مقاومتی بتن و ملات مورد استفاده از طریق انجام آزمایش‌های استاندارد تعیین شد. برای این منظور، هم‌زمان با عملیات بتن‌ریزی، شش نمونه مکعبی بتن ساخته شد که سه نمونه در سن ۲۸ روزگی و سه نمونه دیگر در زمان اجرای بارگذاری اصلی تحت آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C39 قرار گرفتند [۲۵]. به‌منظور ارزیابی قابلیت اطمینان نتایج، پارامترهای آماری شامل انحراف معیار و ضریب تغییرات نیز محاسبه شد. همچنین مقاومت فشاری ملات سیمانی با استفاده از نمونه‌های مکعبی و بر اساس استاندارد ASTM C109 اندازه‌گیری گردید. خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برای بتن و ملات در «جدول۶ و۵» و «شکل۶» ارائه شده است [۲۶].

جدول ۵ : نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن (فونداسیون، ستون و تیر).

Table 5. Compressive strength test results of concrete (foundation, column, and beam).

نمونه	مشخصات	مکعبی روز آزمایش (MPa)			استوانه‌ای روز آزمایش (MPa)			میانگین		انحراف معیار	کواریانس
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	مکعبی	استوانه‌ای		
FI-NI-OOP	فونداسیون	۴۰/۶۷	۳۹/۶۹	۳۵/۹۵	۳۲/۵۴	۳۱/۷۶	۲۸/۷۶	۳۸/۷۸	۳۱/۰۲	۰/۹۴	۳٪
	ستون	۴۴/۲۶	۴۱/۰۲	۴۳/۷۳	۳۵/۴۱	۳۲/۸۱	۳۴/۹۸	۴۳	۳۴/۴۰	۰/۶۵	٪ ۱/۹
	تیر	۳۷/۳۵	۳۷/۵۰	۳۳/۶۳	۲۹/۸۸	۳۰	۲۶/۹۰	۳۶/۱۶	۲۸/۹۳	۰/۸۲	٪ ۲/۸
FI-I-OOP	فونداسیون	۳۶/۶۱	۴۰/۴۲	۳۷/۰۵	۴۵/۷۶	۵۰/۵۲	۴۶/۳۳	۴۷/۵۳	۳۸/۰۳	۰/۴۰	٪ ۰/۸
	ستون	۳۷/۹۲	۳۹/۲۳	۴۲/۴۴	۴۷/۴۰	۴۹/۰۴	۵۳/۰۵	۴۹/۸۳	۳۹/۸۶	۱/۰۳	۲٪
	تیر	۳۰/۲۵	۳۳/۷۵	۳۷/۹۸	۲۵/۶۷	۲۶/۴۱	۲۸/۲۵	۳۳/۵۵	۲۶/۶۶	۰/۶۲	٪ ۲/۳۳
RFI-I-OOP	فونداسیون	۴۹/۵۵	۵۳/۲۱	۴۶/۸۸	۳۹/۶۴	۴۲/۵۶	۳۷/۵۷	۴۹/۸۸	۳۹/۹۰	۱/۱۹	٪۳
	ستون	۴۴/۷۵	۳۶/۴۲	۴۱/۳۱	۳۵/۸۰	۲۹/۱۴	۳۳/۰۴	۴۰/۸۳	۳۲/۲۶	۱/۵۷	٪ ۴/۸
	تیر	۳۹/۸۶	۴۱/۵۷	۴۰/۳۸	۳۱/۸۴	۳۳/۲۶	۳۲/۳۰	۴۰/۵۸	۳۲/۴۶	۰/۳۳	٪۱

جدول ۶ : نتایج آزمون نمونه‌های مکعبی شاتکریت و درز ملات.

Table 6. Test results of the shotcrete cube specimens and mortar joints.

نمونه	مشخصات	نمونه مکعبی روز آزمایش (MPa)			میانگین	انحراف معیار	کواریانس
		S۱	S۲	S۳			
FI-I-OOP, FI-NI-OOP	ملات درز اتصال	۲۵/۳۰	۲۲/۶۳	۲۰/۲۲	۲۲/۷۱	۲	٪۸/۸
RFI-I-OOP	ملات درز اتصال	۱۸/۶۲	۱۷/۲۸	۱۹/۶۰	۱۸/۵۲	۰/۵۴	٪۳
	ملات ماسه-سیمان شاتکریت	۱۱/۸۷	۱۲/۲۶	۹/۰۸	۱۱/۰۷	۰/۸۱۰	٪۷



(الف) (ب) (پ) (ت)

شکل ۶ : نمای کلی آزمون‌های مکانیکی؛ الف) آزمون کشش آرماتور، ب) آزمون مقاومت فشاری نمونه مکعبی بتن، پ) آزمون کشش الیاف شیشه مقاوم به قلیا (AR-Glass)، ت) آزمون مقاومت فشاری بلوک سفالی.

Fig. 6. General view of the mechanical tests: (a) rebar tensile test, (b) concrete cube compressive strength test, © alkali-resistant glass fiber (AR-Glass) tensile test, (d) clay block compressive strength test.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵-۳- نبشی‌های منقطع و تسمه

در این پژوهش، به‌منظور بهبود رفتار سازه‌ای میان‌قاب و افزایش یکپارچگی سیستم، از نبشی‌های منقطع فولادی به ضخامت ۳ میلی‌متر در بخش‌های قائم و فوقانی استفاده شد. نبشی‌های قائم نقش مهاربندی جانبی میان‌قاب را ایفا کرده و موجب افزایش پایداری آن در برابر تغییرمکان‌های خارج از صفحه می‌شوند. از سوی دیگر، نبشی‌های فوقانی به‌عنوان عناصر مهاری شبکه الیاف شیشه عمل کرده و از جداشدگی یا گسیختگی موضعی الیاف در ناحیه اتصال جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، تسمه‌های فولادی با ابعاد ۳×۴۰×۲۵۰ میلی‌متر در بخش تحتانی میان‌قاب نصب شدند تا شرایط انتقال نیرو بهبود یافته و ظرفیت سیستم در تحمل تنش‌های کششی و فشاری افزایش یابد، در «شکل۷» نمای مختلف از نبشی منقطع و تسمه به نمایش گذاشته شده است.



ب) الف)

شکل ۷ : نمای کلی اجزای فولادی مورد استفاده در روش تقویتی در ناحیه همپوشانی با بلوک سفالی و الیاف شیشه مقاوم به قلیا؛ الف) تسمه فولادی با ابعاد۳ ×۴۰×۲۵۰ میلی‌متر، ب) نبشی L شکل با ابعاد ۴۰×۱۰۰×۲۵۰ ، مورد استفاده در بالای تیر و دو طرف ستون.

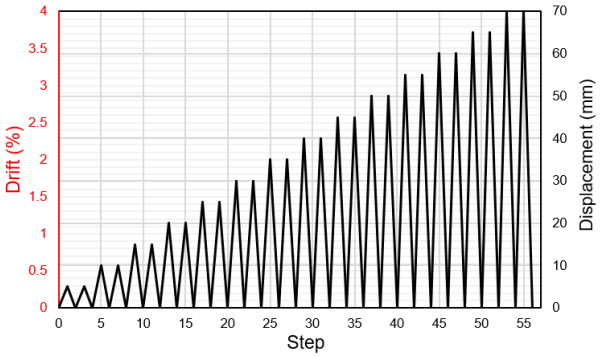
Fig. 7. Overview of the steel components used in the retrofitting method at the overlap region with the clay blocks and alkali-resistant glass (AR-Glass) fiber: (a) steel plate ($250 \times 40 \times 3$ mm), (b) L-shaped steel angle ($250 \times 100 \times 40$ mm) used at the top of the beam and on both sides of the columns.

۴- برپایش آزمایشگاهی و پروتکل‌بارگذاری

چیدمان تجهیزات آزمایش و نحوه اعمال بار برون‌صفحه بر روی نمونه‌های (FI-NI-OOP), (FI-I-OOP), (RFI-I-OOP) در «شکل ۹» نشان داده شده است. بارگذاری توسط یک جک هیدرولیکی استاتیکی با ظرفیت ۵۰ تن و کورس حرکتی ۱۵۰ میلی‌متر انجام شد. این جک به یک خرپای فولادی متصل به کف صلب آزمایشگاه مهار شده بود تا پایداری لازم در حین بارگذاری تأمین شود. به‌منظور توزیع مناسب نیرو بر سطح میان‌قاب، یک سیستم انتقال بار با استفاده از جرثقیل سقفی با ظرفیت ۳/۵ تن در محل مورد نظر مستقر گردید. پس از استقرار، تماس کامل المان انتقال بار با سطح دیوار برقرار شده و تنظیمات لازم برای حصول هم‌راستایی و تراز مناسب انجام شده. به منظور جلوگیری از تمرکز تنش در نواحی تماس و ایجاد توزیع یکنواخت‌تر بار، لایه‌های پلیمری به ضخامت ۱۰ میلی‌متر بین کفشک‌های بارگذاری و سطح میان‌قاب قرار داده شد. همچنین کفشک‌های انتقال نیرو در چهار نقطه و با فواصل یکنواخت در امتداد ابعاد دیوار نصب شدند و پیش از آغاز آزمایش، هم‌محوری و تراز بودن اجزای سیستم کنترل گردید. بارگذاری خارج از صفحه به روش کنترل جابه‌جایی و به‌صورت چرخه‌ای اعمال شد، به‌طوری‌که نیروی تولیدشده توسط جک از طریق المان بارگذاری انتقال بار به میان‌قاب منتقل می‌شد. برای ثبت پاسخ نمونه‌ها، از چندین حسگر جابه‌جایی خطی(LVDT)[1] استفاده شد که محل نصب آن‌ها در «شکل ۹» ارائه شده است. پروتکل بارگذاری برون‌صفحه‌ای طبق «شکل۸» و با توجه به مطالعات پیشین، از جمله Koutas و Bournas ، و متناسب با اهداف پژوهش حاضر تدوین شد. بارگذاری به‌صورت چرخه‌ای و کنترل‌شده بر اساس جابه‌جایی، از ۵ تا ۷۰ میلی‌متر با گام‌های ۵ میلی‌متری انجام شد و در هر سطح دو چرخه کامل اعمال گردید. این پروتکل امکان ارزیابی کاهش سختی، تغییرشکل ماندگار، روند آسیب و ظرفیت نهایی تغییرشکل برون‌صفحه‌ای را فراهم کرد[۸].

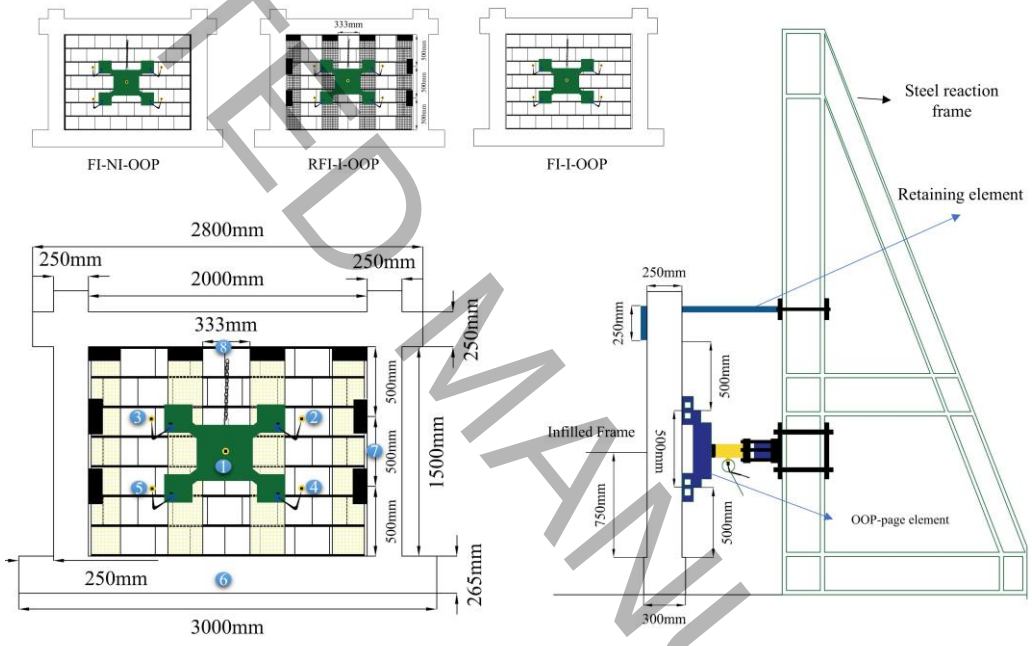
[1] Linear Variable Differential Transformer

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۸ : پروتکل بارگذاری چرخه‌ای کنترل‌شده بر اساس جابه‌جایی در آزمایش‌های برون‌صفحه‌ای.

Fig. 8. Displacement-controlled cyclic loading protocol for the out-of-plane tests.



شکل ۹ : چیدمان آزمایشگاهی آزمون بارگذاری برون‌صفحه‌ای.

Fig. 9. Laboratory setup for the out-of-plane loading test.

۱-۴- عملکرد قوسی

میان‌قاب‌های بنایی پس از تجربه زلزله‌های با شدت متوسط معمولاً دچار ترک‌های قطری شده و در نتیجه بخشی از ظرفیت باربری خود را از دست می‌دهند. با این حال، در دیوارهای محصورشده با نسبت ابعادی مناسب و قاب پیرامونی صلب، مکانیسم قوسی قادر است پس از آغاز ترک‌خوردگی نیز سهم مؤثری در تأمین مقاومت جانبی ایفا کند. میزان اثربخشی این مکانیسم به کیفیت تماس میان دیوار و قاب وابسته است؛ به‌گونه‌ای که کاهش سطح تماس ناشی از آسیب‌های پیشین، فعال‌شدن آن را به تأخیر انداخته و می‌تواند الگوی رفتار خارج از صفحه را از حالت دوطرفه به یک‌طرفه با ظرفیت کمتر تغییر دهد، در حالی‌که نقش اندرکنش رفتار درون و برون‌صفحه همچنان از موضوعات نیازمند پژوهش در مهندسی زلزله محسوب می‌شود [۲۷, ۲۸].

ACCEPTED MANUSCRIPT

۵- نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی

۵-۱-آزمایش نمونه (FI-NI-OOP)

مطابق مشاهدات آزمایشگاهی، نخستین ترک در میان‌قاب تحت بارگذاری برون‌صفحه‌ای، در جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر و تحت نیروی ۶/۹۹ کیلونیوتن، در درز ملات بین بلوک‌های سفالی ایجاد شد. این ترک، نشان‌دهنده آغاز تمرکز تنش و خروج تدریجی سیستم از محدوده الاستیک بود. با افزایش بار، تمرکز تنش در رج دوم موجب خردشدگی موضعی بلوک‌ها و تغییر مکانیزم باربری از رفتار کششی-برشی به رفتار فشاری-خمشی شد. در نخستین سیکل با دامنه جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر، نیروی مقاوم به ۱۳ کیلونیوتن کاهش یافت. هم‌زمان، تشکیل مکانیسم قوسی در ناحیه میانی و بخش تحتانی دیوار مشاهده شد که بیانگر آغاز رفتار غیرخطی و کاهش سختی مؤثر سیستم بود؛ این روند در «شکل ۱۰-ب» قابل مشاهده است.

با ادامه بارگذاری، گسترش تغییرشکل‌های غیرالاستیک موجب توسعه آسیب‌ها و خردشدگی گسترده بلوک‌های سفالی در بخش فوقانی میان‌قاب شد. با وجود این، مکانیسم قوسی ایجادشده از فروپاشی ناگهانی دیوار جلوگیری کرد. به‌طور کلی، رفتار برون‌صفحه‌ای نمونه تحت تأثیر شکل‌گیری و تضعیف تدریجی مکانیسم قوسی و نیز کاهش یکپارچگی مصالح بنایی قرار داشت که در نهایت به افت سختی و ظرفیت باربری منجر شد.

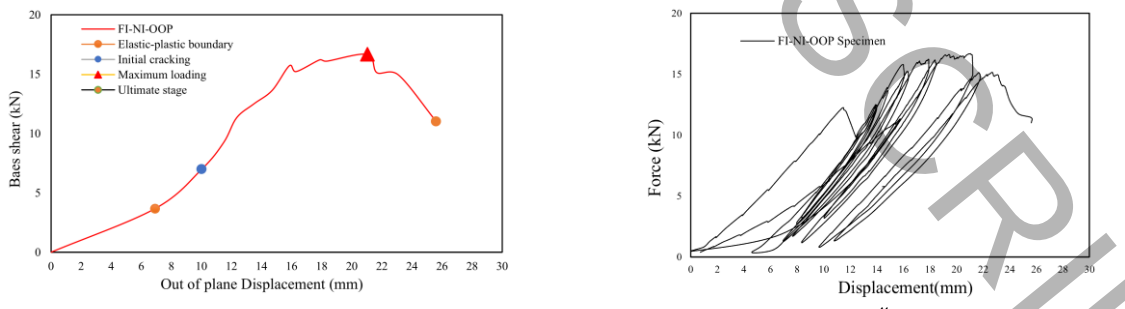
برای درک بهتر روند رفتار و زوال تدریجی نمونه در مراحل مختلف بارگذاری، منحنی‌های حاصل از آزمایش برون‌صفحه‌ای در «شکل ۱۱» و داده‌های استخراج‌شده از نتایج آزمایش در «جدول ۷» ارائه شده‌اند. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش جابه‌جایی، مقاومت و سختی نمونه به‌تدریج کاهش یافته و روند تخریب میان‌قاب به‌صورت پیوسته تا مراحل نهایی خرابی ادامه پیدا کرده است.



(الف) جابه‌جایی ۸ میلیمتر (ب) جابه‌جایی ۱۰ میلیمتر (پ) جابه‌جایی ۲۰ میلیمتر (ت) جابه‌جایی ۲۵ میلیمتر

شکل ۱۰ : روند گسترش آسیب در نمونه FI-NI-OOP طی مراحل آزمایش در نسبت‌های مختلف جابه‌جایی نسبی.

Fig. 10. Damage progression process in the FI-NI-OOP specimen during the test stages at various drift ratios.



(ب) (الف)

شکل ۱۱ : پاسخ برون‌صفحه‌ای نمونه FI-NI-OOP الف) نمودار چرخه‌ای؛ ب) منحنی پوش و نقاط شاخص آسیب.

Fig. 11. Out-of-plane response of the FI-NI-OOP specimen: (a) cyclic response; (b) envelope curve and damage indicator points.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۷ : نتایج کلیدی آزمون بارگذاری برون‌صفحه‌ای نمونه FI-NI-OOP .

Table 7. Key test results of the out-of-plane loading for the FI-NI-OOP specimen.

جابه‌جایی (mm)	نیرو (kN)	(FI-NI-OOP)
۲۱/۰۱	۱۶/۶۷	حداکثرنیرو
۲۵/۶۲	۱۱/۰۲	حداقل نیرو

۲-۵- آزمایش نمونه (FI-I-OOP)

نمونه میان‌قاب دارای فاصله جداسازی ۲۰ میلی‌متری از ستون‌ها، رفتار خرابی تدریجی و مرحله‌ای از خود نشان داد. تا جابه‌جایی حدود ۱۲ میلی‌متر، پاسخ نمونه در محدوده الاستیک قرار داشت و هیچ‌گونه آسیب قابل‌توجهی مشاهده نشد. نخستین نشانه‌های خرابی در جابه‌جایی ۱۵/۵۰ میلی‌متر و تحت نیروی ۱۱/۰۲ کیلونیوتن، به‌صورت ترک افقی در ناحیه اتصال تیر به میان‌قاب ظاهر شد. با افزایش جابه‌جایی به ۱۵/۵۹ میلی‌متر، این ترک در امتداد زیر تیر و در طول درز ملات گسترش یافت و نیروی متناظر به ۱۱/۲۰ کیلونیوتن رسید.

در ادامه، در جابه‌جایی ۱۸/۸۹ میلی‌متر و تحت نیروی ۱۵/۳۳ کیلونیوتن، ترک افقی ممتدی در رج دوم دیوار ایجاد شد که بیانگر تمرکز آسیب در درزهای افقی ملات بود. با افزایش جابه‌جایی به ۲۰/۲۵ میلی‌متر، جدایش بلوک‌های سفالی در بخش تحتانی میان‌قاب رخ داد و ظرفیت باربری نمونه به ۸/۲۴ کیلونیوتن کاهش یافت. در نهایت، در جابه‌جایی ۲۱/۲۹ میلی‌متر، فروپاشی کامل میان‌قاب مشاهده شد. بیشینه نیروی ثبت‌شده در طول آزمایش برابر با ۱۵/۶۵ کیلونیوتن و در جابه‌جایی ۱۸/۸۱ میلی‌متر بود.

پس از تشکیل نخستین ترک، نمونه از محدوده رفتار الاستیک خارج شد و وارد ناحیه غیرالاستیک گردید؛ این مرحله با گسترش تدریجی ترک‌های افقی و کاهش ظرفیت باربری همراه بود. الگوی خرابی نهایی عمدتاً ناشی از توسعه ترک‌های افقی در بخش تحتانی دیوار و ضعف در ناحیه اتصال تیر به میان‌قاب بود که در نهایت به ناپایداری و ریزش بخش فوقانی میان‌قاب منجر شد. این رفتار نشان می‌دهد که در میان‌قاب‌های دارای فاصله جداسازی، نواحی اتصال تیر به دیوار و درزهای افقی ملات به‌عنوان نقاط بحرانی عملکرد شناخته می‌شوند و نقش تعیین‌کننده‌ای در ظرفیت و مکانیزم گسیختگی سیستم ایفا می‌کنند. روند کلی آزمایش و مراحل مختلف توسعه خرابی در «شکل ۱۲» ارائه شده است. همچنین، نتایج حاصل از آزمایش برون‌صفحه‌ای، شامل منحنی‌های هیسترزیس و نمودار پوش به‌همراه پارامترهای استخراج‌شده از آن‌ها، در «شکل ۱۳» و «جدول ۸» قابل مشاهده است.

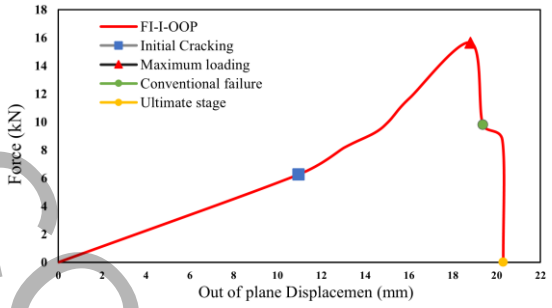


(الف) جابه‌جایی ۸ میلیمتر (ب) جابه‌جایی ۱۲ میلیمتر (پ) جابه‌جایی ۱۸ میلیمتر (ت) جابه‌جایی ۲۰ میلیمتر

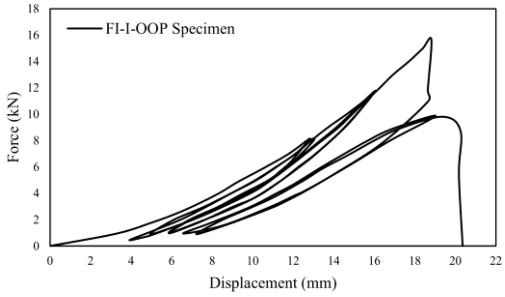
شکل ۱۲ : روند گسترش آسیب در نمونه FI-I-OOP طی مراحل آزمایش در سطوح مختلف نسبت جابه‌جایی نسبی.

Fig. 12. Damage progression process in the FI-I-OOP specimen during the test at various relative drift ratio levels.

ACCEPTED MANUSCRIPT



(ب)



(الف)

شکل ۱۳ : پاسخ برون‌صفحه‌ای نمونه تقویت‌شده FI-I-OOP الف) نمودار چرخه‌ای؛ ب) منحنی پوش و نقاط متناظر با سطوح آسیب.

Fig. 13. Damage progression process in the FI-I-OOP specimen during the test at various relative drift ratio levels.

جدول ۸ : نتایج کلیدی آزمون بارگذاری برون‌صفحه‌ای نمونه FI-I-OOP .

Table 8. Key test results of the out-of-plane loading for the FI-I-OOP specimen.

(FI-I-OOP)	نیرو (kN)	جابه‌جایی (mm)
حداکثرنیرو	۱۵/۶۵	۱۸/۸۱
حداقل نیرو	۸/۲۴	۲۰/۲۰

۳-۵-آزمایش نمونه (RFI-I-OOP)

نخستین نشانه‌های آسیب در نمونه تحت بارگذاری برون‌صفحه‌ای، در سیکل دوم با دامنه جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر و نیروی حدود ۲۰ کیلونیوتن مشاهده شد. تشکیل ترک اولیه بیانگر آغاز تمرکز تنش‌های کششی و خمشی و کاهش تدریجی سختی مؤثر سیستم بود. با افزایش سطح بارگذاری، ترک‌ها در سطح میان‌قاب توسعه یافتند و در سیکل نخست با دامنه جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر و نیروی حدود ۲۴ کیلونیوتن، نمونه وارد مرحله آسیب پیشرونده شد.

در ادامه، توسعه ترک‌های خمشی در بخش پایینی دیوار مشاهده شد که می‌توان آن را ناشی از تمرکز تنش‌های کششی و لنگرهای خمشی حاصل از بارگذاری برون‌صفحه‌ای دانست. با افزایش جابه‌جایی، بازشدگی ترک‌ها تشدید شد و مکانیسم قوسی در میان‌قاب شکل گرفت؛ روند مذکور در «شکل ۱۴-ب» ارائه شده است.

از نکات قابل‌توجه در رفتار این نمونه، افزایش مجدد مقاومت پس از دستیابی به نقطه اوج بود. این پدیده در چرخه دوم با دامنه جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر و در حدود جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر در پاسخ بار-جابه‌جایی مشاهده شد. چنین رفتاری نشان‌دهنده فعال شدن مکانیزم کششی الیاف شیشه و مشارکت آن‌ها در تحمل بار پس از ترک‌خوردگی گسترده مصالح بنایی است. در این مرحله، الیاف با ایجاد اثر پل‌زنی در نواحی ترک‌خورده، از افت ناگهانی ظرفیت باربری جلوگیری کردند. در جابه‌جایی‌های نهایی تا ۷۰ میلی‌متر، با وجود گسترش ترک‌ها و کاهش تدریجی مقاومت، شاتکریت الیافی و نبشی‌های مهاری مانع از جدایش کامل میان‌قاب از قاب پیرامونی شدند و انسجام کلی سیستم را حفظ کردند. نمودارهای چرخه‌ای و منحنی پوش، به‌همراه نقاط کلیدی رفتار سازه‌ای نمونه، در «شکل ۱۵» و داده‌های استخراج‌شده از نتایج آزمایش در «جدول ۹» ارائه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که سیستم تقویتی پیشنهادی توانسته است عملکرد برون‌صفحه‌ای میان‌قاب را از طریق افزایش ظرفیت تغییرشکل‌پذیری، بهبود رفتار پس از اوج مقاومت، کنترل گسترش ترک‌ها و جلوگیری از فروپاشی زودهنگام، به‌طور محسوسی ارتقا دهد.

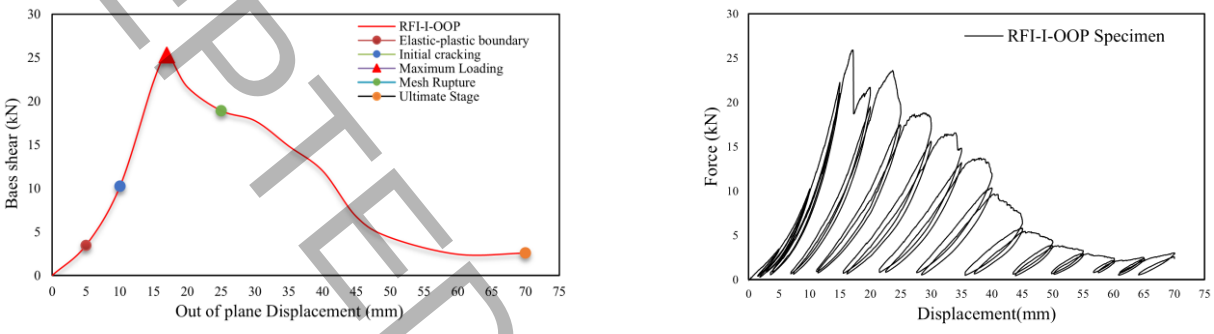
ACCEPTED MANUSCRIPT



(الف) جابه‌جایی ۱۰ میلیمتر (ب) جابه‌جایی ۲۵ میلیمتر (پ) جابه‌جایی ۴۰ میلیمتر (ت) جابه‌جایی ۷۰ میلیمتر

شکل ۱۴ : روند گسترش آسیب در نمونه RFI-I-OOP طی مراحل آزمایش در نسبت‌های مختلف جابه‌جایی.

Fig. 14. Damage progression in the RFI-I-OOP specimen during the test at different displacement ratios.



(ب) (الف)

شکل ۱۵ : پاسخ برون‌صفحه‌ای نمونه RFI-I-OOP الف) نمودار چرخه‌ای؛ ب) منحنی پوش و نقاط متناظر با سطوح آسیب.

Fig. 15. Out-of-plane response of the RFI-I-OOP specimen: (a) Cyclic hysteresis loop; (b) Backbone curve and points corresponding to damage states.

جدول ۹ : نتایج کلیدی آزمون بارگذاری برون‌صفحه‌ای نمونه RFI-I-OO .

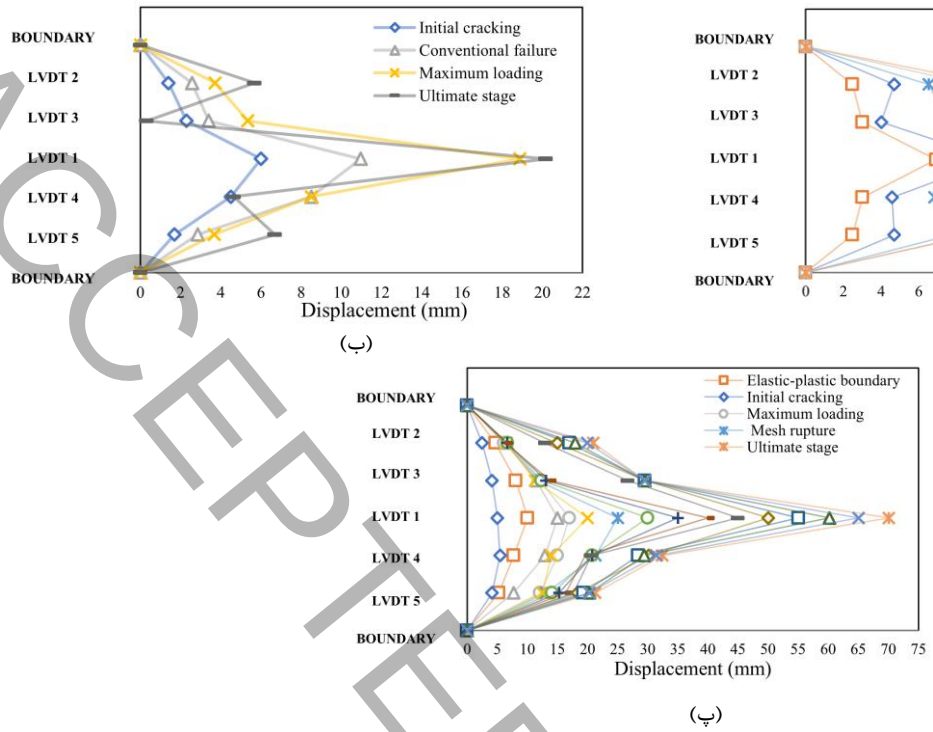
Table 9. Key test results of the out-of-plane loading test for specimen RFI-I-OOP.

جابه‌جایی (mm)	نیرو (kN)	(RFI-I-OOP)
۱۶/۹۷	۲۵/۳۰	حداکثرنیرو
۷۰	۲/۵۶	حداقل نیرو

۴-۵- نمودار تغییرمکان سنج‌ها

در «شکل ۱۶»، توزیع جابه‌جایی‌های برون‌صفحه‌ای ثبت‌شده توسط حسگرهای LVDT در مراحل مختلف بارگذاری ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح بارگذاری، جابه‌جایی در نقاط مختلف میان‌قاب به‌تدریج افزایش یافته و بیشینه جابه‌جایی در نواحی میانی دیوار رخ داده است. همچنین، تغییرات جابه‌جایی در مراحل مختلف بارگذاری، شامل محدوده الاستیک، آغاز ترک‌خوردگی، بارگذاری بیشینه و مرحله نهایی، بیانگر تحول تدریجی رفتار سازه‌ای و گسترش آسیب در میان‌قاب است. به‌طور کلی، داده‌های ثبت‌شده توسط حسگرهای LVDT تصویر مناسبی از توزیع تغییرشکل برون‌صفحه‌ای و روند تکامل رفتار میان‌قاب تا مرحله نهایی بارگذاری فراهم می‌کند

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۱۶ : جابه‌جایی برون‌صفحه‌ای ثبت‌شده با LVDT: الف) نمونهFC-IN-OOP ؛ ب) نمونهFI-I-OOP ؛ پ) نمونهRFI-I-OOP .

Fig. 16. Out-of-plane displacement recorded by LVDTs: (a) specimen FC-IN-OOP; (b) specimen FI-I-OOP; © specimen RFI-I-OOP.

۵-۵- مقایسه نمودار بار تغییر مکان نمونه‌ها

نتایج آزمایش‌های برون‌صفحه‌ای نشان داد که نوع جداسازی و تقویت، تأثیر قابل‌توجهی بر پاسخ مکانیکی و ظرفیت تغییرشکل میان‌قاب دارد. مطابق نتایج ارائه‌شده در «جدول ۱۰»، نمونه مرجع FI-NI-OOP، به‌عنوان نمونه بدون جداسازی و بدون تقویت، بار اوج ۱۶/۶۷ کیلونیوتن را در جابه‌جایی ۲۱/۰۱ میلی‌متر ثبت کرد. در نمونه FI-I-OOP، به‌عنوان نمونه جداسازی‌شده و بدون تقویت، بار اوج برابر با ۱۵/۶۵ کیلونیوتن در جابه‌جایی ۱۸/۸۱ میلی‌متر به‌دست آمد که نسبت به نمونه مرجع، کاهش حدود ۶/۱۱ درصدی در ظرفیت باربری اوج را نشان می‌دهد. این موضوع بیانگر آن است که جداسازی میان‌قاب از قاب پیرامونی، در این نمونه، موجب افزایش مقاومت اوج نشده و عمدتاً بر نحوه انتقال نیرو و الگوی پاسخ برون‌صفحه‌ای اثرگذار بوده است.

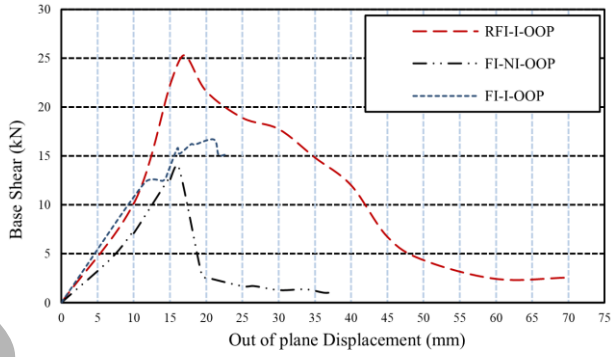
در مقابل، نمونه RFI-I-OOP، به‌عنوان نمونه جداسازی‌شده و تقویت‌شده با الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا و نبشی‌های فولادی منقطع، بیشترین ظرفیت باربری را در میان نمونه‌ها نشان داد. بار اوج این نمونه برابر با ۲۵/۳۰ کیلونیوتن در جابه‌جایی ۱۶/۹۷میلی‌متر ثبت شد. این مقدار نسبت به نمونه مرجع FI-NI-OOP حدود ۵۱/۷۷ درصد و نسبت به نمونه جداسازی‌شده بدون تقویت FI-I-OOP حدود ۶۱/۶۶ درصد افزایش نشان می‌دهد. بنابراین، برخلاف نمونه جداسازی‌شده بدون تقویت، استفاده از سیستم تقویتی ترکیبی موجب افزایش محسوس مقاومت برون‌صفحه‌ای میان‌قاب شده است.

از نظر ظرفیت جابه‌جایی در مرحله نهایی نیز رفتار نمونه تقویت‌شده کاملاً متمایز بود. جابه‌جایی ثبت‌شده برای نمونه RFI-I-OOP در مرحله نهایی به ۷۰ میلی‌متر رسید؛ درحالی‌که مقادیر متناظر برای نمونه‌های FI-NI-OOP و FI-I-OOP به‌ترتیب ۲۲/۶۱ و ۲۰/۲۰ میلی‌متر گزارش شده است. بر این اساس، جابه‌جایی نهایی نمونه تقویت‌شده نسبت به نمونه مرجع حدود ۲۰۹/۶ درصد و نسبت به نمونه جداسازی‌شده بدون تقویت حدود ۲۴۶/۵ درصد افزایش داشته است. این افزایش قابل‌توجه نشان می‌دهد که سیستم تقویتی پیشنهادی، با کنترل گسترش ترک‌ها، تأمین پیوستگی موضعی و جلوگیری از جدایش ناگهانی اجزای میان‌قاب، موجب بهبود شکل‌پذیری و پایداری برون‌صفحه‌ای پس از ترک‌خوردگی شده است.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که جداسازی به‌تنهایی الزاماً موجب افزایش مقاومت اوج میان‌قاب نشده است؛ بااین‌حال، ترکیب جداسازی با تقویت سطحی توسط الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا و مهار موضعی با نبشی‌های فولادی منقطع، عملکرد برون‌صفحه‌ای

ACCEPTED MANUSCRIPT

میان‌قاب را به‌طور محسوسی ارتقا داده است. این بهبود هم در افزایش ظرفیت باربری اوج و هم در افزایش چشمگیر ظرفیت جابه‌جایی نهایی مشاهده می‌شود. نتایج مقایسه‌ای مربوط به نیرو و جابه‌جایی نمونه‌ها در «شکل ۱۷» و «جدول ۱۰» ارائه شده است.



شکل ۱۷ : مقایسه نمودار پوش نمونه‌ها در بارگذاری برون‌صفحه نمونه‌های آزمایشگاهی.

Fig. 17. Comparison of the envelope curves for the laboratory specimens under out-of-plane loading.

جدول ۱۰ : نتایج و مقایسه نیرو، جابه‌جایی نمونه‌های آزمایشگاهی.

Table 10. Comparison of load and displacement results for the laboratory specimens.

مشخصات	نمونه (FI-NI-OOP)		نمونه (FI-I-OOP)		نمونه (RFI-I-OOP)	
	جابه‌جایی (mm)	نیرو (kN)	جابه‌جایی (mm)	نیرو (kN)	جابه‌جایی (mm)	نیرو (kN)
چرخه اول	۲۱/۰۱	۱۶/۶۷	۱۸/۸۱	۱۵/۶۵	۱۶/۹۷	۲۵/۳۰
چرخه دوم	۲۲/۶۱	۱۵/۱۱	۲۰/۲۰	۸/۲۴	۷۰	۲/۵۶

۶-۵- مقایسه پارامتر (سختی، نیرو و انرژی)

مقادیر ظرفیت باربری، سختی اولیه، سختی ثانویه و انرژی تلف‌شده نمونه‌ها در «جدول ۱۱» ارائه شده‌اند. سختی اولیه به‌صورت سختی سکانتی بین مبدأ منحنی بار–جابه‌جایی و نقطه متناظر با ۴۰ درصد ظرفیت باربری بیشینه تعیین شد، درحالی‌که سختی ثانویه از نسبت حداکثر بار به جابه‌جایی متناظر با آن محاسبه گردید و در نهایت انرژی تلف‌شده به‌صورت مساحت محصورشده توسط حلقه‌های رفت و برگشتی نیرو–جابه‌جایی در تمامی چرخه‌های بارگذاری محاسبه شد. ازاین‌رو، مقادیر انرژی تلف‌شده گزارش‌شده در «جدول ۱۱» بیانگر مجموع انرژی تلف‌شده در تمامی چرخه‌های اعمال‌شده تا پایان آزمایش هستند[۲۹]. این تعاریف برای تمامی نمونه‌ها به‌صورت یکسان به‌کار گرفته شدند. همچنین، به‌منظور تسهیل مقایسه عملکرد نمونه‌ها و درک بهتر تفاوت‌های رفتاری، داده‌های «جدول ۱۱» به‌صورت نمودارهای میله‌ای مقایسه‌ای در «شکل ۱۸» نمایش داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که حذف گپ پیرامونی در نمونه FI-NI-OOP موجب بهبود نسبی رفتار برون‌صفحه‌ای شده است، به‌گونه‌ای که ظرفیت باربری، سختی اولیه و سختی ثانویه این نمونه نسبت به نمونه دارای گپ FI-I-OOP افزایش یافته‌اند. به‌طور مشخص، نیروی ثبت‌شده برای FI-NI-OOP برابر ۱۶/۶۷کیلونیوتن و برای FI-I-OOP برابر ۱۵/۶۵ کیلونیوتن است. همچنین، سختی اولیه در این دو نمونه به‌ترتیب ۰/۹۶۱ و ۰/۵۷۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر و سختی ثانویه آن‌ها به‌ترتیب ۰/۷۹۲ و ۰/۸۳۲ کیلونیوتن بر میلی‌متر گزارش شده است. این موضوع بیانگر نقش مؤثر تماس مناسب میان میان‌قاب و قاب پیرامونی در انتقال نیرو و تداوم عملکرد مکانیسم قوسی پس از ترک‌خوردگی است. از نظر مکانیسم انتقال بار خارج‌صفحه‌ای نیز، نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ایجاد فاصله ۲۰ میلی‌متری بین میانقاب و قاب، تشکیل مکانیسم قوسی را در مراحل اولیه بارگذاری به تأخیر می‌اندازد. در مراحل اولیه، به دلیل جداسازی میانقاب از قاب پیرامونی، شواهد مشخصی از شکل‌گیری این مکانیسم مشاهده نشد. با افزایش جابه‌جایی و رسیدن نمونه به سطوح بالای تغییرشکل، مشاهدات آزمایشگاهی و الگوی گسترش ترک‌ها نشان داد که مکانیسم قوسی به‌تدریج در میانقاب شکل گرفته و در تحمل بار خارج‌صفحه‌ای آن نقش پیدا می‌کند. بنابراین، جداسازی ۲۰ میلی‌متری مانع از شکل‌گیری مکانیسم قوسی نمی‌شود، بلکه تشکیل آن را به سطوح بالاتر تغییرشکل موکول می‌کند.

ACCEPTED MANUSCRIPT

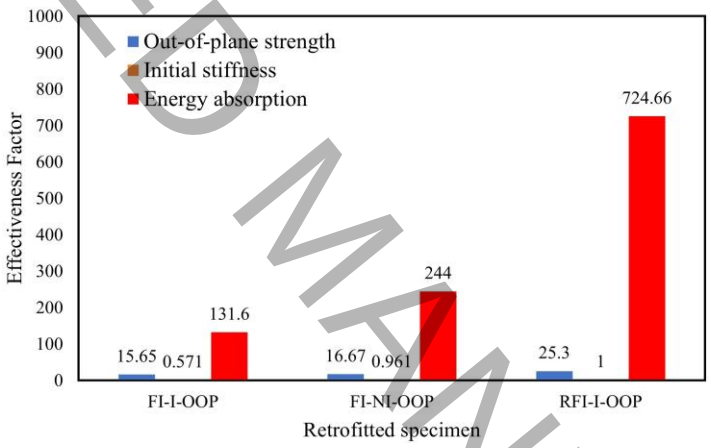
با این حال، نمونه RFI-I-OOP که همچنان دارای گپ بوده است، بهترین عملکرد را در میان تمامی نمونه‌ها از خود نشان داد. این نمونه با ثبت نیروی ۲۵/۳۰ کیلونیوتن، سختی اولیه ۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر، سختی ثانویه ۱/۴۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر و انرژی تلف‌شده ۷۲۴/۶۶ ژول، نسبت به سایر نمونه‌ها برتری محسوسی نشان داد. این نتایج حاکی از اثربخشی بالای سیستم تقویتی متشکل از الیاف شیشه و نبشی‌های منقطع است. این سیستم با محدود کردن گسترش ترک‌ها، حفظ یکپارچگی دیوار و بهبود شرایط مهاربندی، موجب حفظ ظرفیت مقاومتی پس از ترک‌خوردگی و افزایش شکل‌پذیری سازه شده است.

در مجموع، نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که اگرچه حذف فاصله می‌تواند عملکرد برون‌صفحه‌ای میان‌قاب را تا حدی بهبود بخشد، اما نقش سیستم تقویتی در افزایش مقاومت، حفظ سختی و ارتقای ظرفیت جذب انرژی به‌مراتب مؤثرتر بوده و توانسته است اثرات منفی ناشی از وجود گپ را تا حد زیادی جبران کند. نتایج مقایسه‌ای این رفتارها در «شکل ۱۸» و «جدول ۱۱» ارائه شده است.

جدول ۱۱ : مقایسه کلی نمونه‌ها در سختی، نیرو و انرژی تلف شده.

Table 11. Overall comparison of stiffness, lateral load, and dissipated energy among the specimens.

مشخصات	FI-NI-OOP	FI-I-OOP	RFI-I-OOP
نیرو (kN)	۱۶/۶۷	۱۵/۶۵	۲۵/۳۰
سختی اولیه (kN/mm)	۰/۹۶۱	۰/۵۷۱	۱
سختی ثانویه (kN/mm)	۰/۷۹۲	۰/۸۳۲	۱/۴۹
انرژی تلف شده (J)	۲۴۴	۱۳۱/۶	۷۲۴/۶۶



شکل ۱۸ : مقایسه سختی اولیه، اثربخشی تقویت و بیشینه نیروی برون‌صفحه‌ای میان‌قاب‌ها با استفاده از نمودار میله‌ای.

Fig. 18. Bar chart comparison of initial stiffness, retrofitting effectiveness, and peak out-of-plane lateral force among the infills.

مطابق نتایج «جدول ۱۲»، نمونه تقویت‌شده پژوهش حاضر **(RFI-I-OOP)** با مقاومت نهایی ۲۵/۳۰ کیلونیوتن، جابه‌جایی متناظر ۱۶/۹۷ میلیمتر و جابه‌جایی نهایی ۷۰ میلی‌متر ، ضمن برخورداری از ظرفیت تغییرشکل قابل‌توجه، رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به بسیاری از نمونه‌های مطالعات پیشین نشان می‌دهد. سختی مؤثر این نمونه ۱/۴۹ کیلونیوتن برمیلی‌متر در محدوده مقادیر گزارش‌شده برای نمونه‌های تقویت‌شده قرار دارد و انرژی تلف‌شده تجمعی ۷۲۴/۶۶ ژول نیز بیانگر قابلیت مناسب سیستم در جذب و استهلاک انرژی است. همچنین، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که اگرچه برخی نمونه‌های مطالعات پیشین مقاومت بیشتری دارند، این موضوع عمدتاً با سختی بالاتر همراه بوده و لزوماً به معنای تغییرشکل‌پذیری بیشتر نیست؛ در مقابل، RFI-I-OOP با حفظ ظرفیت تغییرشکل تا ۷۰ میلی‌متر، ترکیب مناسبی از مقاومت، سختی و قابلیت جذب انرژی را ارائه کرده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۱۲: مقایسه عملکرد نمونه‌های تقویت‌شده در پژوهش حاضر و مطالعات پیشین تحت بارگذاری برون‌صفحه‌ای.

Table 12. Comparison of the performance of the retrofitted specimens in the present study with previous literature under out-of-plane loading.

پژوهش	نمونه تقویت‌شده	مقاومت (kN)	جابه‌جایی در مقاومت (mm)	جابه‌جایی نهایی (mm)	سختی مؤثر (kN/mm)	انرژی تلف‌شده/تجمعی
پژوهش حاضر	RFI-I-OOP	۲۵/۳۰	۱۶/۹۷	۷۰	۱/۴۹	۷۲۴/۶۶ J
استاد و همکاران (۲۰۲۶)	SIFM-OOP	۴۶/۴۰	۲۰	۷۰	۲/۳۴	۱۱۵۵/۷۰ J
زارعی و همکاران (۲۰۲۶)	IWR-OOP	۳۲/۹۸	۲۱/۱۹	۷۰	۱/۶۰	۷۴۰/۵۰ J
وردرامه و همکاران (۲۰۱۹)	OOP-E-FRCM	۲۸/۴۰	۱۱	۱۳	۲/۵۸	–
	OOP-E-FRP	۱۹/۱۰	۹/۷۰	۱۰/۱۰	۱/۹۶	–
	OOP-E-RFRP	۱۶/۳۰	۱۲/۱۰	۱۳	۱/۳۴	–
کوتاس و همکاران (۲۰۱۹)	S_NOC	۱۱۰	۲۸/۴۰	۵۷	۱۳/۱۰	۳۸۹۰ J
	S_BCK	۱۱۸	۳۱/۱۰	۵۷	۱۹/۵۰	۵۰۳۰ J
	S_FRN	۱۵۸	۱۹/۸۰	۵۷	۲۰/۱۰	۵۵۲۰ J
	D_WRP	۱۳۷	۳۲/۷۰	۵۷	۵۱/۵۰	۶۸۵۰ J

۶- نتیجه‌گیری

۶-۱- جمع‌بندی نتایج اصلی

نتایج پژوهش نشان داد که نوع جزئیات پیرامونی و سیستم تقویتی، تأثیر مستقیمی بر رفتار برون‌صفحه‌ای میان‌قاب بنایی دارد. مقایسه نمونه‌ها بیانگر آن است که پاسخ برون‌صفحه‌ای میان‌قاب تنها تابع مقاومت مصالح نبوده و به نحوه انتقال نیرو، شرایط مرزی و سطح مهاربندی نیز وابسته است. مهم‌ترین نتایج به شرح زیر است:

مقایسه نمونه مرجع FI-NI-OOP با نمونه جداسازی‌شده FI-I-OOP نشان داد که اعمال گپ پیرامونی به‌تنهایی موجب بهبود ظرفیت باربری نشد، به‌طوری‌که بار اوج از ۱۶/۶۷ به ۱۵/۶۵کیلونیوتن کاهش یافت. این موضوع نشان می‌دهد که حذف تماس مستقیم میان میان‌قاب و قاب، در صورت نبود سیستم تقویتی مناسب، می‌تواند از کارایی انتقال نیرو در راستای برون‌صفحه بکاهد.

- در مقابل، استفاده از سیستم تقویتی در نمونه RFI-I-OOP موجب بهبود محسوس عملکرد شد، به‌گونه‌ای که بار اوج این نمونه به ۲۵/۳۰ کیلونیوتن رسید. این مقدار نسبت به نمونه‌های FI-NI-OOP و FI-I-OOP به‌ترتیب حدود ۵۱/۷۷ و ۶۳/۷۵ درصد افزایش نشان می‌دهد.
- سیستم تقویتی متشکل از الیاف شیشه مقاوم در برابر قلیا و نبشی‌های فولادی منقطع، نقش مؤثری در کنترل گسترش ترک‌ها، کاهش زوال تدریجی مصالح و حفظ یکپارچگی میان‌قاب در مراحل پیشرفته بارگذاری ایفا کرد. این موضوع سبب شد نمونه تقویت‌شده پس از ترک‌خوردگی نیز توان تحمل بار و تداوم عملکرد خود را حفظ کند.
- از نظر تغییرشکل‌پذیری، نمونه RFI-I-OOP عملکردی به‌مراتب بهتر از دو نمونه دیگر داشت. جابه‌جایی نهایی این نمونه برابر ۷۰ میلی‌متر بود که نسبت به نمونه‌های FI-NI-OOP و FI-I-OOP با جابه‌جایی‌های ۲۲/۶۱ و ۲۰/۲۰ میلی‌متر، به‌ترتیب حدود ۲۰۹/۶ و ۲۴۶/۵ درصد بیشتر است. این نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه ظرفیت تغییرشکل نمونه تقویت‌شده و تبدیل رفتار نسبتاً ترد میانقاب به رفتاری پایدارتر و شکل‌پذیرتر است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

- بررسی شاخص‌های سختی نیز نشان داد که نمونه تقویت‌شده دارای سختی اولیه ۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر و سختی ثانویه ۱/۴۹ کیلونیوتن بر میلی‌متر بوده که در مقایسه با دو نمونه دیگر، بیانگر عملکرد مناسب‌تر آن در تحمل بار و حفظ مقاومت در مراحل پس از ترک‌خوردگی است.
- انرژی تلف‌شده در نمونه RFI-I-OOP برابر ۷۲۴/۶۶ ژول به‌دست آمد که بیشترین مقدار در میان نمونه‌های مورد بررسی است. این نتیجه نشان می‌دهد که راهکار پیشنهادی نه‌تنها موجب افزایش مقاومت، بلکه سبب ارتقای ظرفیت جذب انرژی و کاهش احتمال فروریزش ناگهانی میان‌قاب تحت بارگذاری برون‌صفحه‌ای می‌شود.

۲-۶- محدودیت‌های پژوهش و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده

با توجه به محدودیت‌های اجرایی و آزمایشگاهی، از جمله تعداد نمونه‌ها و ظرفیت تجهیزات، ارزیابی هر پیکربندی با یک نمونه انجام شد؛ ازاین‌رو، بررسی تکرارپذیری نتایج با تعداد نمونه‌های بیشتر در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. همچنین، نتایج مربوط به مکانیسم قوسی و رویدادهای شاخص رفتاری (Events) صرفاً بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی ارائه شده‌اند و ارزیابی کمی و دقیق آن‌ها نیازمند مطالعات تحلیلی و مدل‌سازی تکمیلی است. علاوه بر این، پژوهش حاضر بر رفتار برون‌صفحه‌ای متمرکز بوده و بررسی رفتار داخل‌صفحه‌ای و اندرکنش همزمان بارگذاری‌های داخل‌صفحه و برون‌صفحه به‌عنوان مسیرهای پیشنهادی برای تحقیقات آینده در نظر گرفته شده است.

تشکروقدردانی

قدردانی نویسندگان: از مسئولین آزمایشگاه سازه و تکنولوژی بتن، جناب آقای ابوالفضل محمدی، سیداحمد نظامی و همکاران آقای بهمن بری، محمدجواد اسماعیلی و سرکار خانم دکتر دلارام استاد کمال تشکر و قدردانی را داریم.

جدول ۱۳ . علائم و نمادهای به‌کاررفته در مقاله.

Table 13. Symbols and Notations Used in This Study

Vy	بیشترین نیرو (kN/mm)
K_E	سختی (kN/mm)
μ	شکل‌پذیری
Fy	تنش تسلیم
F_u	تنش نهایی
ε_y	کرنش تسلیم
ε_u	کرنش نهایی
E	انرژی (J)

ACCEPTED MANUSCRIPT

مراجع

[1] D. Ostad, J. Shafaei, and F.J. Alaee, “Experimental study on seismic strengthening of hollow clay blocks infilled RC frames under in-plane and out-of-plane loading with AR-glass-fiber strips,” Results in Engineering, vol. 30, 2026.

[2] J.L.Dawe, and ,C.K.Seah, Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels. Canadian Journal of Civil Engineering, vol.16(6), pp.854-864, 1989

[3] M. Griffith and J. Vaculik, “Out-of-plane flexural strength of unreinforced clay brick masonry walls,” TMS Journal, vol. 25 (1), pp. 53–68, 2007.

[4] F.Akhoundi, , Graça Vasconcelos, P.Lourenco,and Luıs Silva, “Out-of-plane response of masonry infilled RC frames: Effect of workmanship and opening,” in Brick and Block Masonry: Trends, Innovations and Challenges—Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference (IBMAC), pp. 1147–1154, CRC Press, 2016.

[5] M. Di Domenico, P. Ricci, and G.M. Verderame, “Experimental assessment of the influence of boundary conditions on the out-of-plane response of unreinforced masonry infill walls,” Journal of Earthquake Engineering, vol. 24 (6), pp. 881–919, 2018.

[6] P. Ricci, M. Di Domenico, and G.M. Verderame, “Experimental investigation of the influence of slenderness ratio and of the in-plane/out-of-plane interaction on the out-of-plane strength of URM infill walls,” Construction and Building Materials, vol. 191, pp. 507–522, 2018.

[7] G.M.Verderame, A. Balsamo, P.Ricci, , M.Di Domenico, and G.Maddaloni., “Experimental assessment of the out-of-plane response of strengthened one-way spanning masonry infill walls,” Composite Structures, vol. 230, 2019.

[8] L.N. Koutas and D.A. Bournas, “Out-of-plane strengthening of masonry-infilled RC frames with textile-reinforced mortar jackets,” Journal of Composites for Construction, vol. 23 (1), 2019.

[9] M. Di Domenico, P. Ricci, and G.M. Verderame, “Experimental assessment of strengthened masonry partitions without arching effect under seismic out-of-plane load,” Journal of Earthquake Engineering, vol. 26 (9), pp. 4657–4680, 2020.

[10] B. Pradhan , M. Zizzo, V. Sarhosis, L Cavaleri., “Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry infill walls: Review of the experimental studies and analysis of the influencing parameters,” Structures, vol. 33, pp. 4387–4406, 2021.

[11] M.T.De Risi, , A.Furtado, H.Rodrigues, J.Melo, G.M. Verderame, A.Arêde, H.Varum, and G.Manfredi., “Influence of textile reinforced mortars strengthening on the in-plane/out-of-plane response of masonry infill walls in RC frames,” Engineering Structures, vol. 254, 2022.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[12] D. Ostad, J. Shafaei , and , F. J.Alaee, “Experimental evaluation of diagonal tension test on hollow clay block wallettes with different configurations of non-structural materials (cement and plaster),” Structures, vol. 79, p. 109418, 2025.

[13] D. Ostad, J. Shafaei, and F.J. Alaee, “Experimental evaluation of the diagonal tension test of hollow clay blocks strengthening with AR-glass fibers,” Case Studies in Construction Materials, p. e05151, 2025.

[14] M.J. Zarei, J. Shafaei , F. Basaligheh, “Experimental study of clay block infill frame strengthening using AR glass fibers under in-plane loading,” Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 55, no. 121, pp. 39–51, 2026. (In Persian)

[15] M.J. Zarei, D. Ostad, J. Shafaei, F. Basaligheh, “Experimental investigation of wall-post and AR-glass fiber retrofitting technique for clay-block masonry-infilled RC frames subjected to in-plane and out-of-plane loading,” Structures, vol. 93, p. 113000, 2026.

[16] D. Chen, L. Ma, and H. Wu, “Influence of boundary conditions on quasi-static out-of-plane behaviors of brick masonry infill walls: Full-scale test and numerical simulation,” Engineering Structures, vol. 339, 2025.

[17] X. Xie, Z.-X. Guo, and S.H. Basha, “Out-of-plane behavior of clay brick masonry infills contained within RC frames using 3D digital image correlation technique,” Construction and Building Materials, vol. 376, 2023.

[18] S. Karimi and M.R. Mirjalili, “Strengthened decoupled masonry infill walls: An experimental study on out-of-plane performance under cyclic loads,” Construction and Building Materials, vol. 475, 2025.

[19] M. Zhang, K. Ding, L. Pang, J. Ding., “In-plane/out-of-plane seismic performance of masonry infilled RC frame structure made of nano-SiO_2-reinforced mortar: Experimental study,” Journal of Building Engineering, vol. 68, 2023.

[20] M. Vailati, M. Mercuri, and A. Gregori, “Out-of-plane non-intrusive seismic retrofitting of in-plane damaged masonry infill through 3D-printed recycled plastic devices,” Construction and Building Materials, vol. 438, p. 137256, 2024.

[21] R.R. Milanesi, M. Kurukulasuriya, G. Magenes, P.Morandi., “Experimental campaign on the seismic response of weak clay masonry infills: In-plane and out-of-plane interaction via shake table testing,” Procedia Structural Integrity, vol. 78, pp. 1374–1381, 2026.

[22] ASTM International, “Standard test method for sampling and testing brick and structural clay tile,” ASTM C67, 2009.

[23] ASTM International, “Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products,” ASTM A370, 2012.

[24] ASTM International, “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,” ASTM E2098, 2010.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[25] ASTM International, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens,” ASTM C39, 2021.

[26] ASTM International, “Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or 50-mm cube specimens),” ASTM C109, 2013.

[27] D. Ostad and J. Shafaei, “Investigating the seismic performance of masonry infills with opening and non-opening by considering the interaction of behavior in plane and out of the plane and providing the reduction factor of effective stiffness and ultimate strength,” Journal of Civil and Environmental Engineering, vol. 54 (114), pp. 56–83, 2024. (In Persian)

[28] P. Asteris, L. Cavaleri, F. Di Trapani, AK.Tsaris., “Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels,” Engineering Structures, vol. 132, pp. 110–122, 2017.

[29] T.Paulay, and , M.N. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings (Vol. 768). New York: Wiley. 1992

ACCEPTED MANUSCRIPT