ارزیابی عملکرد خارج از صفحه میان‌قاب‌های بلوک سفالی با استفاده از سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی

محمد جواد اسماعیلی [۱]، جلیل شفائی [*۲]، دلارام استاد [۳]

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، mohamadjavadesmaeili@shahroodut.ac.ir

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

۳- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، delaramostad@shahroodut.ac.ir

چکیده

میان‌قاب‌های بلوک سفالی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین اجزای غیرسازه‌ای در قاب‌های بتن‌آرمه، هنگام وقوع زلزله، به‌ویژه تحت بارگذاری خارج از صفحه، مستعد گسیختگی ترد و فروریزش ناگهانی هستند که می‌تواند خسارات جانی و مالی به همراه داشته باشد. هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی تأثیر مقاوم‌سازی میان‌قاب‌های بلوک سفالی با استفاده از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا بر رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های واقع در قاب‌های بتن‌آرمه تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی است. بدین‌منظور، دو نمونه قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب، شامل یک نمونه تقویت‌نشده و یک نمونه تقویت‌شده با سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، پوشش ملات ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی، در مقیاس ۱:۲ ساخته شدند و تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه قرار گرفتند. عملکرد نمونه‌ها بر اساس ظرفیت باربری، سختی، تغییرمکان نهایی، شکل‌پذیری، الگوی ترک‌خوردگی، مکانیزم شکست و نحوه فروریزش میان‌قاب ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی، در مقایسه با نمونه تقویت‌نشده، موجب افزایش حدود ۱۷۳ درصدی ظرفیت باربری خارج از صفحه، افزایش ۷۵ درصدی تغییرمکان نهایی و افزایش حدود ۱۲۵ درصدی سختی مؤثر شد. همچنین، نمونه تقویت‌شده در مقایسه با نمونه تقویت‌نشده، گسترش تدریجی‌تر ترک‌ها، حفظ بهتر یکپارچگی میان‌قاب و رفتار شکست تدریجی‌تری را نشان داد. بر اساس نتایج نمونه‌های آزمایش‌شده، سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی پیشنهادی می‌تواند روشی مؤثر برای بهبود عملکرد خارج از صفحه میان‌قاب‌های بلوک سفالی و کاهش خطرات ناشی از فروریزش آن‌ها هنگام زلزله باشد.

کلمات کلیدی

میان‌قاب بلوک سفالی، مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، بارگذاری خارج از صفحه، عملکرد لرزه‌ای، مقاوم‌سازی.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

میان‌قاب‌های مصالح بنایی یکی از رایج‌ترین اجزای غیرسازه‌ای در قاب‌های بتن‌آرمه هستند که علاوه بر نقش معماری، می‌توانند بر رفتار لرزه‌ای سازه نیز تأثیر قابل‌توجهی داشته باشند. اگرچه این اعضا معمولاً در طراحی سازه‌ای به‌عنوان عضو باربر در نظر گرفته نمی شوند، اما شواهد حاصل از زلزله‌های گذشته نشان داده است که حضور آن‌ها می‌تواند سختی، مقاومت جانبی، توزیع نیرو و حتی الگوی خرابی قاب را تحت تأثیر قرار دهد [۱]. در مقابل، شکست ترد میان‌قاب‌ها، به‌ویژه در اثر بارگذاری خارج از صفحه، یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد خسارات جانی و مالی در زلزله‌ها محسوب می‌شود؛ زیرا جداشدگی و فروریزش ناگهانی دیوار می‌تواند حتی در صورت سالم ماندن سیستم باربر اصلی نیز ایمنی ساکنان را به خطر اندازد [۲, ۳].

رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی در سال‌های اخیر به یکی از موضوعات مهم پژوهش‌های مهندسی زلزله تبدیل شده است. این نوع شکست معمولاً در اثر نیروهای اینرسی عمود بر صفحه، کاهش عملکرد قوسی دیوار، آسیب‌های ناشی از بارگذاری‌های قبلی و یا ضعف اتصال میان‌قاب به قاب پیرامونی رخ می‌دهد. ازاین‌رو، شناخت مکانیزم شکست و ارائه روش‌های مناسب برای افزایش ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌ها، نقش مهمی در بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن‌آرمه و کاهش خطرات ناشی از فروریزش دیوارهای بنایی دارد [۴, ۵].

مطالعات متعددی در سال‌های اخیر به بررسی رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی و روش‌های مقاوم‌سازی آن‌ها پرداخته‌اند. آخوندی و همکاران[1] در سال ۲۰۱۸ با انجام آزمایش‌های خارج از صفحه روی شش میان‌قاب بنایی نشان دادند که آسیب‌های ناشی از بارگذاری درون‌صفحه‌ای موجب کاهش قابل‌توجه ظرفیت و سختی خارج از صفحه دیوار می‌شود [۶]. پانتو و همکاران[2] در سال ۲۰۱۹ با ارائه یک مدل ماکرو عددی، رفتار غیرخطی و مکانیزم قوسی میان‌قاب‌ها را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کردند [۷]. همچنین بینیسی و همکاران[3] در سال ۲۰۱۹ گزارش کردند که اگرچه دیوارهای ساخته‌شده از بلوک AAC وزن کمتری دارند، اما به دلیل رفتار ترد، در برابر بارگذاری خارج از صفحه مستعد شکست زودهنگام هستند [۸]. دریسی و همکاران[4] در سال ۲۰۲۰ نشان دادند که استفاده از سیستم TRM ظرفیت باربری خارج از صفحه را بین ۸۰ تا ۱۲۰ درصد افزایش داده و الگوی شکست را از حالت ترد به رفتاری شکل‌پذیرتر تغییر می‌دهد [۹]. آنیک و همکاران[5] در سال ۲۰۲۱ با بررسی آزمایشگاهی قاب‌های بتن‌آرمه میان‌قاب‌دار بیان کردند که نسبت لاغری دیوار و شرایط اتصال به قاب از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقاومت خارج از صفحه هستند [۲]. سو و همکاران[6] در سال ۲۰۲۴ نیز با انجام مطالعه عددی نشان دادند که وجود لایه‌های لغزش افقی اگرچه رفتار درون‌صفحه‌ای دیوار را بهبود می‌دهد، اما موجب کاهش عملکرد قوسی و ظرفیت باربری خارج از صفحه می‌شود [۱۰]. همچنین نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که استفاده از سامانه‌های مقاوم‌سازی نظیر FRP[7] و TRM[8] می‌تواند موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری میان‌قاب‌ها شود، هرچند عملکرد این سیستم‌ها به نوع الیاف، نحوه اتصال و شرایط بارگذاری وابسته است [۱۱-۱۶].

با وجود پیشرفت‌های حاصل در زمینه مقاوم‌سازی میان‌قاب‌های بنایی، بیشتر مطالعات انجام‌شده بر استفاده از سامانه‌های FRP، TRM و سایر کامپوزیت‌های متداول متمرکز بوده‌اند و اطلاعات آزمایشگاهی درباره عملکرد خارج از صفحه میان‌قاب‌های بلوک

[1] Akhoundi et al.
[2] Panto et al.
[3] Binici et al.
[4] De Risi
[5] Anic et al.
[6] Su et al.
[7] Fiber Reinforced Polymer
[8] Textile Reinforced Mortar

ACCEPTED MANUSCRIPT

سفالی تقویت‌شده با نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا[1] همچنان محدود است [۱۷-۱۹]. همچنین تأثیر این روش مقاوم‌سازی بر ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و مکانیزم شکست میان‌قاب‌های بلوک سفالی تحت بارگذاری خارج از صفحه به‌صورت جامع بررسی نشده است؛ ازاین‌رو، همچنان خلأ تحقیقاتی قابل‌توجهی در این زمینه وجود دارد.

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی عملکرد خارج از صفحه یک سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی، دو نمونه قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب بلوک سفالی در مقیاس نصف واقعی، شامل یک نمونه تقویت‌نشده و یک نمونه تقویت‌شده با سیستمی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، ملات ماسه‌سیمان و اجزای مهاری فولادی، ساخته و تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی خارج از صفحه آزمایش شدند. عملکرد نمونه‌ها بر اساس ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی، الگوی ترک‌خوردگی و مکانیزم شکست ارزیابی شد تا کارایی سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی در بهبود عملکرد خارج از صفحه میان‌قاب‌های بلوک سفالی بررسی شود.

در این مقاله، ابتدا مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی، مصالح مصرفی و نحوه اجرای سیستم تقویتی تشریح می‌شود. سپس برنامه آزمایش و روش بارگذاری ارائه شده و در ادامه، نتایج حاصل از آزمایش‌ها شامل رفتار نیرو-جابجایی، ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری، جذب انرژی و الگوی شکست مورد تحلیل و مقایسه قرار می‌گیرد. در پایان نیز مهم‌ترین یافته‌های پژوهش جمع‌بندی و ارائه می‌شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- معرفی نمونه‌های آزمایشگاهی

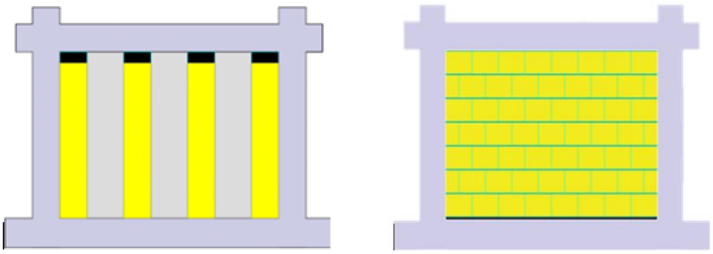
به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای میان‌قاب‌های بلوک سفالی تحت بارگذاری خارج از صفحه، یک برنامه آزمایشگاهی شامل دو نمونه قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب در مقیاس ۱:۲ طراحی و اجرا شد. نمونه‌ها شامل یک قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب بدون تقویت و یک قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب تقویت‌شده با یک سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی بودند. هر دو نمونه تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی خارج از صفحه قرار گرفتند و عملکرد آن‌ها از نظر ظرفیت باربری، سختی، شکل‌پذیری، اتلاف انرژی و مکانیزم شکست مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲-۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

دو نمونه آزمایشگاهی با ابعاد و مشخصات هندسی یکسان ساخته شدند که تنها تفاوت آن‌ها در نوع تقویت میان‌قاب بود. نمونه نخست، قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب بلوک سفالی بدون تقویت با نماد (IFM-OOP) و نمونه دوم، قاب بتن‌آرمه دارای میان‌قاب بلوک سفالی تقویت‌شده با سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی شامل نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی با نماد (SIFM-OOP) بود. در هر دو نمونه، میان‌قاب در داخل قاب پیرامونی بتن‌آرمه و در تماس با اعضای قاب قرار داشت تا شرایط متداول قرارگیری میان‌قاب در ساختمان‌های بتن‌آرمه شبیه‌سازی شود. وضعیت تماس میان‌قاب و قاب پیرامونی می‌تواند در اثر تغییر شکل قاب و آسیب‌دیدگی میان‌قاب طی بارگذاری تغییر کند. نمای کلی نمونه‌های آزمایشگاهی و جزئیات تقویت آن‌ها در شکل (۱) ارائه شده است.

[1] AR Glass fibers

ACCEPTED MANUSCRIPT

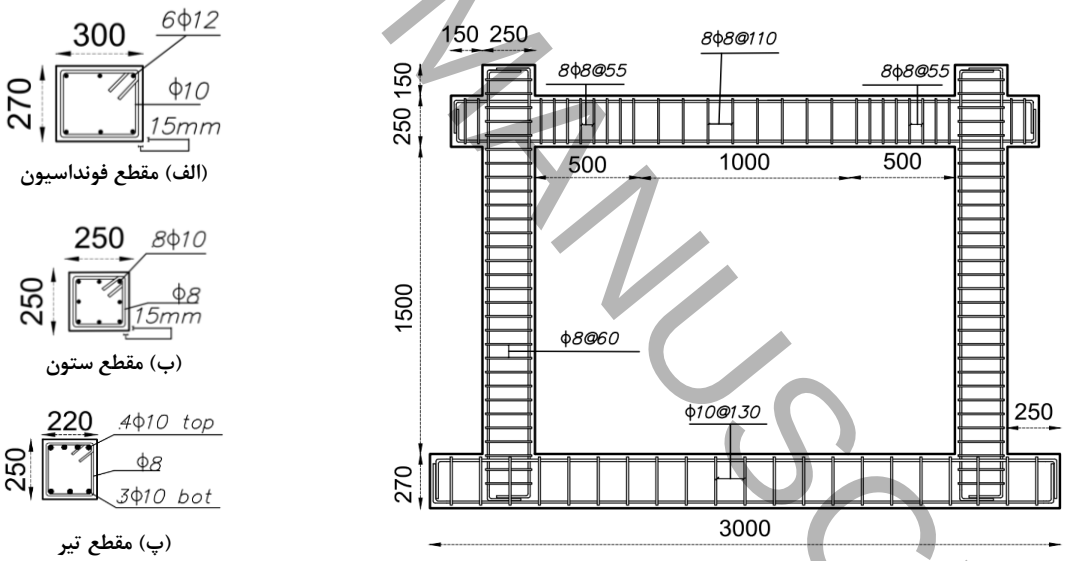


شکل ۱: نمای شماتیک پیکربندی نمونه‌های مورد آزمایش: (الف) نمونهIFM-OOP ؛ (ب) نمونه SIFM-OOP

Figure 1. Schematic configuration of the test specimens: (a) IFM-OOP specimen; (b) SIFM-OOP specimen.

۲-۳- مشخصات قاب بتن آرمه

قاب‌های بتن‌آرمه مورد استفاده در این پژوهش بر اساس الزامات لرزه‌ای آیین‌نامه ACI 318-19 طراحی و اجرا شدند تا از عملکرد مناسب اعضای سازه‌ای و جلوگیری از وقوع گسیختگی در قاب پیرامونی اطمینان حاصل شود [۲۰]. بدین‌ترتیب، پاسخ مشاهده شده در آزمایش‌ها عمدتاً ناشی از رفتار میان‌قاب و اثر سیستم تقویت در برابر بارگذاری خارج از صفحه بود. نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس یک قاب بتن‌آرمه متعارف و با مقیاس هندسی ۱:۲ ساخته شدند. در انتخاب این مقیاس، ضمن رعایت محدودیت‌های آزمایشگاهی، تلاش شد تشابه مناسبی با رفتار نمونه واقعی برقرار شود. همچنین، تمامی نمونه‌ها دارای ابعاد، مشخصات هندسی و آرایش آرماتورگذاری یکسان بوده و تنها تفاوت آن‌ها در نوع تقویت میان‌قاب بود. جزئیات ابعاد، مشخصات هندسی و آرماتورگذاری قاب بتن‌آرمه در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲: جزئیات اجرائی قاب بتن مسلح کلیه نمونه‌ها (اندازه‌ها بر حسب میلی‌متر).

Figure 2. Construction details of the reinforced concrete frame for all specimens (dimensions in mm).

۲-۴- مراحل ساخت و تقویت نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی مطابق با مشخصات طراحی و به‌صورت مرحله‌ای ساخته شدند. پس از اجرای قاب بتن‌آرمه و عمل‌آوری بتن به مدت ۲۸ روز، میان‌قاب‌های بلوک سفالی با استفاده از ملات ماسه-سیمان با نسبت اختلاط ماسه به سیمان ۱:۳ اجرا شدند. پیش از دیوارچینی، بلوک‌های سفالی اشباع شده و ضخامت بندهای ملات در حدود ۱۰ میلی‌متر حفظ شد. ملات به مدت ۷ روز

ACCEPTED MANUSCRIPT

عمل‌آوری شد. در محل تماس میان‌قاب بنایی با قاب بتن‌آرمه، فاصله بین میان‌قاب و اعضای پیرامونی قاب به‌طور کامل با ملات پر شد. در این ناحیه از مهار مکانیکی جداگانه‌ای برای اتصال میان‌قاب به قاب استفاده نشد.

در نمونه تقویت‌شده، پس از آماده‌سازی و تمیزکردن سطح میان‌قاب، هشت نوار شبکه مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا (AR-Glass Fiber) با عرض ۲۵۰ میلی‌متر نصب شد؛ به‌طوری‌که چهار نوار در هر یک از دو وجه میان‌قاب قرار گرفتند. ابعاد چشمه‌های شبکه الیاف ۵×۵ میلی‌متر بود و نوارها به‌صورت قائم و با فاصله تقریبی ۳۳۳ میلی‌متر از یکدیگر آرایش یافتند. آرایش نوارهای مش الیاف شیشه و نحوه مهار آن‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شد که در کنار اندود ملات ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی، عملکرد سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی در برابر بارگذاری خارج از صفحه بهبود یابد.

برای مهار مکانیکی نوارهای الیاف، در قسمت بالای میان‌قاب، حدود ۱۰۰ میلی‌متر از انتهای نوارها در زیر یک نبشی فولادی قرار گرفت و نبشی به قاب بتن‌آرمه پیچ شد. در قسمت پایین نیز حدود ۱۰۰ میلی‌متر از انتهای نوارها در زیر یک تسمه فولادی قرار گرفت تا مهار نوارها در دو انتهای میان‌قاب تأمین شود. پس از نصب و مهار نوارها، یک لایه اندود ماسه-سیمان با ضخامت تقریبی ۱۰ میلی متر، نسبت اختلاط ماسه به سیمان ۱:۳ و نسبت آب به سیمان ۰/۵ روی سطح میان‌قاب اجرا شد تا شبکه الیاف درون لایه اندود قرار گیرد. لایه تقویتی به مدت تقریبی ۷ روز عمل‌آوری شد و سپس آزمایش بارگذاری خارج از صفحه انجام گرفت. مراحل ساخت میان‌قاب و اجرای سیستم تقویت در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند.



شکل۳: ساخت میان‌قاب بلوک سفال تقویت نشده.

Figure 3. Construction of the unreinforced clay block infill wall.



(ث) (ت) (پ) (ب) (الف)

شکل ۴: مراحل ساخت میان‌قاب بلوک سفال تقویت شده: (الف) حفر سوراخ‌های مهار، (ب) مهار و نصب الیاف، (پ) نصب نبشی، (ت) نمایی از تکمیل نصب الیاف، (ث) اعمال پوشش نهایی ملات ماسه-سیمان.

Figure 4. Construction stages of the strengthened clay block infill wall: (a) drilling of anchorage holes; (b) anchoring and installation of fibers; (c) installation of steel angles; (d) completed fiber installation; (e) application of the final sand–cement mortar coating.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲-۵- خواص مصالح

به‌منظور تعیین خواص مکانیکی مصالح مورد استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی، آزمایش‌های لازم بر روی بتن، میلگردهای فولادی، بلوک‌های سفالی، ملات ماسه‌سیمان و شبکه مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا انجام شد. آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای مربوطه انجام گرفت و مقادیر حاصل از آن‌ها، شامل میانگین خواص مکانیکی و سایر شاخص‌های آماری موجود، در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

۲-۵-۱- مقاومت فشاری بتن

برای ساخت قاب‌های بتن‌آرمه از بتن با رده مقاومتی C30 استفاده شد. مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز با آزمایش روی آزمونه‌های مکعبی تعیین گردید. سپس، نتایج حاصل بر اساس ضرایب تبدیل ارائه‌شده در آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، به مقاومت فشاری معادل استوانه‌ای تبدیل شدند. میانگین مقاومت فشاری معادل استوانه‌ای بتن مربوط به فونداسیون، ستون و تیر به‌ترتیب برابر با ۳۵ و ۳۰ مگاپاسکال بود. تعداد آزمونه‌های آزمایش‌شده و نتایج مقاومت فشاری آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. همچنین، نمایی از انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل۵: نمایی از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتن.
Figure 5. Compressive strength test of concrete cube specimens.

۲-۵-۲- میلگردهای فولادی

به‌منظور تعیین خواص مکانیکی فولاد مصرفی، آزمون کشش میلگردها مطابق استاندارد ASTM A370 انجام شد [۲۱]. برای هر یک از قطرهای ۸، ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر، پنج نمونه میلگرد تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. میانگین تنش تسلیم، تنش نهایی کششی و شاخص آماری پراکندگی نتایج آزمایش کشش میلگردها در جدول (۱) ارائه شده‌اند. نمایی از آزمایش کشش میلگردها در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل۶: نمایی از آزمایش کشش میلگردهای فولادی.
Figure 6. Tensile strength test of steel reinforcing bars.

۲-۵-۳- بلوک سفالی و ملات ماسه-سیمان

خواص مکانیکی بلوک‌های سفالی مورد استفاده مطابق استاندارد ASTM C67 ارزیابی شد [۲۲]. میانگین مقاومت فشاری بلوک‌ها در راستای موازی و عمود بر حفره‌ها به‌ترتیب برابر با ۵/۶ و ۰/۸۴ مگاپاسکال بود. نمایی از آزمایش مقاومت فشاری بلوک‌های سفالی در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.

ACCEPTED MANUSCRIPT



(ب) (الف)

شکل ۷: نمایی از آزمایش مقاومت فشاری بلوک‌های سفالی در دو جهت بارگذاری: (الف) موازی با حفره‌ها؛ (ب) عمود بر حفره‌ها.

Figure 7. Compressive strength test of clay blocks in two loading directions: (a) parallel to the cavities; (b) perpendicular to the cavities.

برای اجرای درز ملات بین رج‌های میان‌قاب و پوشش سیستم تقویت از ملات ماسه-سیمان با نسبت اختلاط ۱:۳ استفاده شد. مقاومت فشاری ملات مطابق استاندارد ASTM C109 اندازه‌گیری شد [۲۳]. میانگین مقاومت فشاری ملات ماسه سیمات برابر با ۵/۲ مگا پاسکال به‌دست آمد. تعداد نمونه‌های آزمایش‌شده و نتایج مربوط به مقاومت فشاری بلوک‌های سفالی و ملات در جدول (۱) ارائه شده‌اند. نمایی از آزمایش مقاومت فشاری ملات در شکل‌های (۸) نشان داده شده‌اند.



شکل۸: نمایی از آزمایش مقاومت فشاری ملات ماسه-سیمان.

Figure 8. Compressive strength test of sand–cement mortar specimens.

۲-۵-۴- مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا

برای تعیین مشخصات مکانیکی مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا مورد استفاده در سامانه مقاوم‌سازی، آزمایش کشش تک‌محوری مطابق استاندارد ASTM E2098 انجام شد [۲۴]. ابعاد نمونه‌های مش مورد آزمایش شامل طول ۲۵۰ میلی‌متر و عرض ۵۰ میلی‌متر بود. نتایج آزمایش نشان داد که میانگین مقاومت کششی مش در هر دو راستا برابر با ۹۱۸ مگاپاسکال است. نمونه مش الیاف شیشه آماده‌شده برای انجام آزمایش کشش در شکل (۹) نشان داده شده است. مشخصات مکانیکی حاصل از آزمایش نیز در جدول (۲) ارائه شده‌اند. ازآنجاکه مش الیاف شیشه در این پژوهش در ترکیب با مصالح پایه سیمانی به کار رفته است، مقاومت قلیایی آن از جنبه دوام بلندمدت سامانه مقاوم‌سازی حائز اهمیت است. قرارگیری الیاف شیشه در محیط قلیایی مواد سیمانی می‌تواند بر دوام و خواص مکانیکی آن‌ها در طول زمان تأثیر بگذارد [۲۵]. مش مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس اطلاعات ارائه‌شده از سوی تأمین‌کننده در زمان تهیه مصالح، به‌عنوان مش مقاوم به قلیا انتخاب شد. بااین‌حال، به دلیل انجام‌نشدن آزمایش مستقل مقاومت قلیایی و در دسترس نبودن مستندات فنی محصول، امکان تأیید مستقل این ویژگی در پژوهش حاضر فراهم نبود.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل ۹: مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا آماده‌شده برای آزمایش کشش.

Figure 9. Alkali-resistant glass fiber mesh prepared for the tensile test.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده

Table 1. Mechanical Properties of the Materials Used

مصالح	مشخصه	تعداد نمونه‌های آزمایش شده	مقدار (مگاپاسکال)	ضریب تغییرات
بتن	مقاومت فشاری فونداسیون	۳	۳۵	۲٪/۸
	مقاومت فشاری ستون‌ها و تیر	۳	۳۰	۳٪
بلوک سفال حفره‌دار	مقاومت فشاری (عمود بر حفره)	۵	۰/۸۴	۷٪/۹
	مقاومت فشاری (موازی حفره)	۵	۵/۶	۳٪/۷۵
ملات ماسه-سیمان	مقاومت فشاری	۳	۵/۲	۵٪/۲
میلگرد شماره ۸	تنش تسلیم	۵	۳۵۰	۰٪/۲۹
	تنش نهایی		۵۱۵/۶	۰٪/۹۲
میلگرد شماره ۱۰	تنش تسلیم	۵	۳۶۵/۷	۰٪/۱۶
	تنش نهایی		۵۷۰	۰٪/۱۸
میلگرد شماره ۱۲	تنش تسلیم	۵	۵۰۹/۴	۱٪
	تنش نهایی		۶۲۵	۰٪/۶

۳- برپایش و برنامه بارگذاری آزمایش

۳-۱- برپایش آزمایش خارج از صفحه

آزمایش‌های خارج از صفحه در آزمایشگاه سازه دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. به منظور جلوگیری از هرگونه جابه‌جایی یا دوران ناخواسته، فونداسیون قاب بتن‌آرمه توسط بولت‌های مهاری به کف صلب آزمایشگاه متصل گردید. سپس سامانه بارگذاری خارج از صفحه بر روی نمونه نصب و هم‌راستا شد. بارگذاری توسط یک جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰ تن انجام شد. نمای کلی برپایش آزمایشگاهی و محل استقرار حسگرها در شکل (۱۰) ارائه شده است. به منظور ایجاد توزیع یکنواخت بار بر سطح میان‌قاب، نیروی خارج از صفحه توسط جک هیدرولیکی و از طریق یک سیستم توزیع بار چهارنقطه‌ای به نمونه اعمال شد. نحوه اعمال بار و آرایش سیستم بارگذاری در شکل (۱۱) نشان داده شده است. سیستم توزیع بار شامل چهار کفشک بارگذاری، هر یک به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ میلی‌متر، بود که نیرو را در چهار نقطه به سطح میان‌قاب منتقل می‌کردند. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های خارج از صفحه میان‌قاب در حین بارگذاری، از نه مبدل جابه‌جایی خطی متغیر[1] (LVDT) استفاده شد. محل استقرار این حسگرها و نحوه اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها در شکل (۱۲)، نشان داده شده است. به‌گونه‌ای که پنج حسگر برای ثبت تغییرمکان خارج از صفحه میان‌قاب و چهار حسگر دیگر به‌ترتیب برای کنترل جابه‌جایی تیر، ستون و فونداسیون نصب شدند.

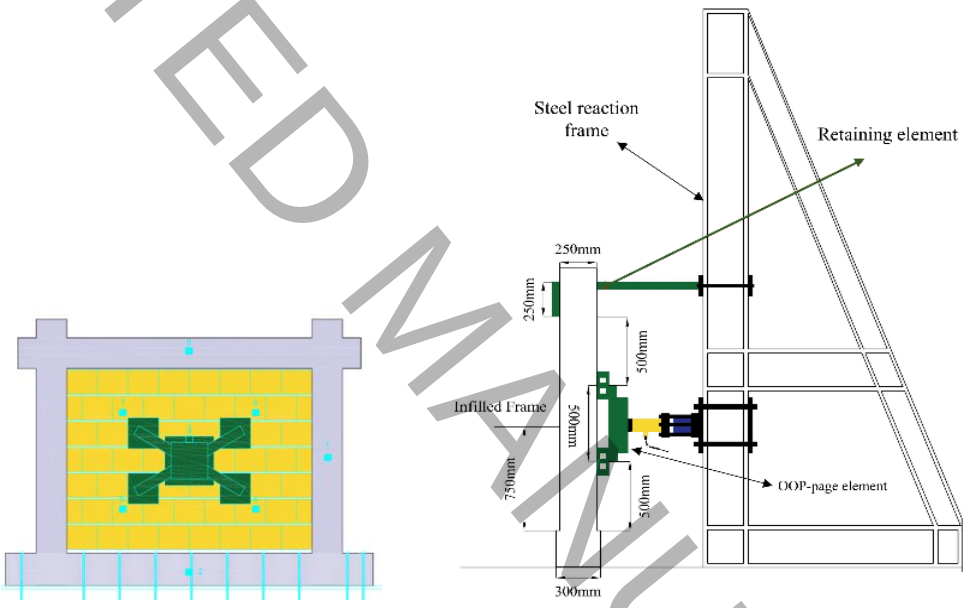
[1] Linear Variable Differential Transformer

ACCEPTED MANUSCRIPT



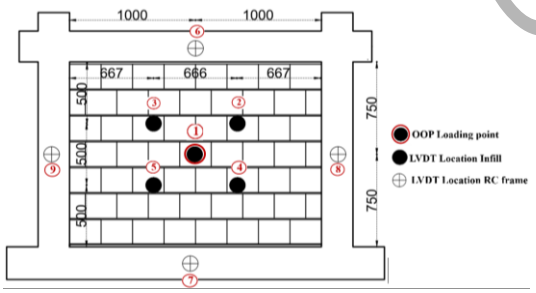
شکل۱۰: نحوه اعمال بار خارج از صفحه بر روی میان‌قاب مصالح بنایی.

Figure 10. Application of out-of-plane loading to the masonry infill wall.



شکل ۱۱: نمای شماتیک بارگذاری خارج از صفحه.

Figure 11. Schematic view of the out-of-plane loading setup.



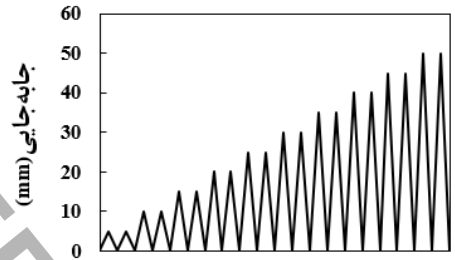
شکل۱۲: تصویر شماتیک و نصب LVDTها برای آزمایش خارج از صفحه.

Figure 12. Schematic view and installation of LVDTs for the out-of-plane test.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳-۲- برنامه بارگذاری خارج از صفحه

برنامه بارگذاری خارج از صفحه با الگوبرداری از مطالعات تجربی پیشین درباره رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی تنظیم شد [۵, ۲۵]. بارگذاری به‌صورت مرحله‌ای و با افزایش تدریجی دامنه جابه‌جایی اجرا شد و در هر سطح جابه‌جایی، دو چرخه بارگذاری انجام گرفت. بارگذاری به‌صورت دستی کنترل شد و نرخ آن به‌صورت عددی ثبت نشد؛ ازاین‌رو، مقدار مشخصی برای نرخ بارگذاری قابل گزارش نیست. آزمایش هر نمونه تا زمانی ادامه یافت که نیروی ثبت‌شده در نمودار نیرو–جابه‌جایی به نزدیکی صفر رسید. این برنامه بارگذاری امکان بررسی ظرفیت باربری، سختی، تغییرشکل‌پذیری، انرژی مستهلک‌شده و الگوی خرابی نمونه‌ها را تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه فراهم کرد. برنامه بارگذاری در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل ۱۳: برنامه بارگذاری خارج از صفحه.
Figure 13. Out-of-plane loading protocol.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مشاهدات آزمایشگاهی

۴-۱-۱- رفتار نمونه بدون تقویت

نمونه IFM-OOP تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه، رفتار نسبتاً تردی از خود نشان داد. در مرحله نخست بارگذاری (جابجایی ۵ میلی‌متر)، رفتار نمونه کاملاً الاستیک بود و هیچ‌گونه ترک یا آسیب قابل مشاهده‌ای ایجاد نشد. با این حال، در چرخه دوم همین مرحله، یکی از بلوک‌های سفالی در محل تماس با کفشک بارگذاری به دلیل تمرکز تنش موضعی و ضعف اتصال ملات، از جای خود خارج شد و به بیرون پرتاب گردید، (شکل ۱۴-الف). با افزایش جابه‌جایی به ۱۰ میلی‌متر، نخستین ترک‌های افقی و قائم در امتداد درزهای ملات ظاهر شدند و در چرخه دوم توسعه یافتند. این ترک‌ها عمدتاً در نواحی مجاور کفشک‌های بارگذاری متمرکز بودند که نشان‌دهنده تمرکز تنش در محل انتقال نیرو به میان‌قاب است، (شکل ۱۴-ب).

در جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر، ترک قائم در مجاورت ستون و ترک‌های افقی در بخش پایینی میان‌قاب ایجاد شدند و به‌تدریج در دو وجه دیوار گسترش یافتند. در این مرحله، تشکیل عملکرد قوسی در میان‌قاب نیز مشاهده شد که بیانگر انتقال نیرو از طریق مسیرهای فشاری مورب میان نواحی تماس با کفشک‌های بارگذاری بود، (شکل ۱۴-پ). با وجود تشکیل این مکانیزم، عملکرد قوسی تنها برای مدت کوتاهی پایدار ماند.

با افزایش جابه‌جایی به ۲۰ میلی‌متر، شکست موضعی در بخش میانی میان‌قاب و در ناحیه تماس کفشک‌های بارگذاری با بلوک‌های سفالی رخ داد که موجب تخریب مکانیزم قوس فشاری، افت ناگهانی سختی و کاهش شدید ظرفیت باربری نمونه گردید. در این مرحله، فروپاشی اصلی میان‌قاب رخ داد و نمونه بخش عمده‌ای از ظرفیت باربری خود را از دست داد، (شکل ۱۴-ت). با وجود وقوع فروپاشی اصلی در این مرحله، بارگذاری تا جابه‌جایی نهایی ثبت‌شده در آزمایش، یعنی ۴۰ میلی‌متر، ادامه یافت. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که میان‌قاب بدون تقویت در برابر بارگذاری خارج از صفحه رفتار شکننده‌ای دارد. ترک‌خوردگی زودهنگام، توسعه سریع

ACCEPTED MANUSCRIPT

آسیب‌ها، از بین رفتن عملکرد قوسی و افت ناگهانی مقاومت پس از رسیدن به بار حداکثر، بیانگر ظرفیت محدود این سیستم در تحمل تغییرشکل‌های بزرگ خارج از صفحه است.



(الف) جابه‌جایی ۵ میلیمتر (ب) جابه‌جایی ۱۰ میلیمتر (پ) جابه‌جایی ۱۵ میلیمتر (ت) جابه‌جایی ۲۰ میلیمتر

شکل ۱۴: روند ایجاد و گسترش آسیب در نمونه بدون تقویت میان‌قاب بنایی در جابه‌جایی‌های منتخب تا ۲۰ میلی‌متر.

Figure 14. Damage initiation and propagation in the non-strengthened masonry infill specimen at selected displacement levels up to 20 mm: (a) 5 mm displacement; (b) 10 mm displacement; (c) 15 mm displacement; (d) 20 mm displacement.

۴-۱-۲- رفتار نمونه تقویت شده

نمونه SIFM-OOP تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه، رفتار پایدارتر و شکل‌پذیرتری نسبت به نمونه بدون تقویت از خود نشان داد. در مراحل اولیه بارگذاری شامل جابه‌جایی‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر، هیچ‌گونه ترک‌خوردگی، خردشدگی یا جدایش در سطح میان‌قاب، اندود سیمانی و نواحی اتصال مشاهده نشد. این رفتار بیانگر سختی اولیه مناسب و عملکرد یکپارچه سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی در کنترل تغییرشکل‌های اولیه بود. با افزایش جابه‌جایی به ۲۰ میلی‌متر، نخستین ترک‌های قطری در سطح اندود سیمانی و در مجاورت نوارهای مش الیاف شیشه ظاهر شدند. با ادامه بارگذاری، ترک‌های افقی و قائم نیز در ناحیه میانی میان‌قاب و اطراف محل اعمال بار توسعه یافتند. در پشت نمونه نیز ترک‌هایی در اطراف کفشک‌های بارگذاری و درز قائم ملات مجاور ستون مشاهده شد که نشان‌دهنده تمرکز تنش در نواحی انتقال نیرو و آغاز کاهش شرایط مرزی میان‌قاب بود، (شکل ۱۵-الف). در مرحله ۲۵ میلی‌متر، ترک‌های ایجادشده در مراحل قبل گسترش یافته و بازشدگی آن‌ها افزایش یافت، اما سامانه تقویت همچنان یکپارچگی خود را حفظ کرد و هیچ‌گونه پارگی در مش الیاف شیشه مشاهده نشد، (شکل ۱۵-ب). این مشاهدات نشان داد که سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی، ضمن کنترل توسعه ترک‌ها، به حفظ انسجام میان‌قاب و جلوگیری از گسیختگی ناگهانی آن کمک کرده است.

با افزایش جابه‌جایی به ۳۰ میلی‌متر، خردشدگی تدریجی بلوک‌ها و ملات آغاز شد و بازشدگی ترک‌های قطری و افقی افزایش یافت. با وجود پیشرفت آسیب‌های داخلی، مش الیاف شیشه در این مرحله همچنان سالم باقی ماندند. الگوی خرابی مشاهده‌شده و حفظ ظرفیت باربری نمونه می‌تواند با مشارکت عملکرد قوسی میان‌قاب در انتقال نیروهای خارج از صفحه سازگار باشد؛ بااین‌حال، به دلیل نبود اندازه‌گیری مستقیم کرنش‌ها و توزیع نیرو، این سازوکار به‌طور مستقل تأیید نشده است (شکل ۱۵-پ).

در مرحله نهایی بارگذاری ۳۵ میلی‌متر، خردشدگی گسترده بلوک‌های سفالی و آسیب موضعی اندود سیمانی مشاهده شد و تنها در برخی نواحی، پارگی محدود مش الیاف شیشه رخ داد. با این وجود، نبشی‌های مهارکننده و سیستم اتصال کاملاً پایدار باقی ماندند و از جداشدگی لایه تقویت جلوگیری کردند. همچنین بخش عمده‌ای از شبکه الیاف همچنان یکپارچگی خود را حفظ نمود و مانع از فروپاشی ناگهانی میان‌قاب شد، (شکل ۱۵-ت).

به‌طور کلی، نتایج نشان داد که استفاده از سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه‌سیمان و اجزای مهاری فولادی، در مقایسه با نمونه بدون تقویت، با افزایش سختی اولیه، تأخیر در آغاز ترک‌خوردگی و حفظ بهتر ظرفیت باربری در تغییرمکان‌های بزرگ‌تر همراه بود. مشاهدات آزمایشگاهی با احتمال مشارکت عملکرد قوسی میان‌قاب سازگار هستند؛ بااین‌حال، به دلیل نبود اندازه‌گیری‌های کمی مستقیم، نمی‌توان این سازوکار را به‌طور مستقل تأیید کرد. برخلاف نمونه

ACCEPTED MANUSCRIPT

بدون تقویت، فرآیند تخریب در این نمونه به صورت تدریجی و کنترل شده رخ داد و میان‌قاب توانست تا جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر، ظرفیت باربری و انسجام خود را حفظ کند. شایان ذکر است که شکل (۱۵) مراحل شاخص ایجاد و گسترش آسیب را تا جابه‌جایی ۳۵ میلی‌متر نشان می‌دهد، درحالی‌که آزمایش نمونه تقویت‌شده تا جابه‌جایی نهایی ۷۰ میلی‌متر ادامه یافته است. بنابراین، جابه‌جایی‌های نشان‌داده‌شده در تصاویر بیانگر مراحل منتخب آسیب هستند و نباید با جابه‌جایی نهایی آزمایش یکسان در نظر گرفته شوند.



(الف) جابه‌جایی ۲۰ میلیمتر (ب) جابه‌جایی ۲۵ میلیمتر (پ) جابه‌جایی ۳۰ میلیمتر (ت) جابه‌جایی ۳۵ میلیمتر

شکل ۱۵: روند ایجاد و گسترش آسیب در نمونه تقویت‌شده میان‌قاب بنایی در جابه‌جایی‌های منتخب تا ۳۵ میلی‌متر.

Figure 15. Damage initiation and propagation in the strengthened masonry infill specimen at selected displacement levels up to 35 mm: (a) 20 mm displacement; (b) 25 mm displacement; (c) 30 mm displacement; (d) 35 mm displacement.

۴-۱-۳- مقایسه گسیختگی دو نمونه

مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان داد که سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی، در مقایسه با نمونه بدون تقویت ، تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود رفتار خارج از صفحه میان‌قاب بنایی داشته است. در نمونه بدون تقویت (IFM-OOP)، ترک‌خوردگی از جابه‌جایی‌های نسبتاً کم آغاز شد و با گسترش سریع ترک‌ها، میان‌قاب به‌صورت ترد و ناگهانی دچار گسیختگی گردید. در مقابل، در نمونه تقویت‌شده (SIFM-OOP)، آغاز ترک‌خوردگی به جابه‌جایی‌های بزرگ‌تر منتقل شد و توسعه آسیب‌ها به‌صورت تدریجی و کنترل‌شده ادامه یافت. مشاهدات همچنین نشان داد که در نمونه تقویت‌شده، سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی ضمن محدود کردن بازشدگی ترک‌ها، به حفظ انسجام میان‌قاب در طول بارگذاری کمک کرد و از ریزش و پرتاب قطعات بلوک سفالی جلوگیری نمود. علاوه بر این، عملکرد قوسی در این نمونه به‌صورت پایدارتر و در محدوده وسیع‌تری از بارگذاری شکل گرفت، در حالی که در نمونه بدون تقویت این مکانیزم تنها برای مدت کوتاهی فعال بوده و با تخریب بخش میانی میان‌قاب از بین رفت.

به‌طور کلی، تقویت سطحی موجب بهبود رفتار شکست، افزایش پایداری نمونه در برابر بارگذاری خارج از صفحه و تغییر مکانیزم خرابی از یک گسیختگی ناگهانی و شکننده به یک فرآیند تدریجی و شکل‌پذیر شد. این نتایج نشان می‌دهد که سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی بررسی‌شده، در مقایسه با میان‌قاب بدون تقویت، روشی مؤثر برای بهبود عملکرد خارج از صفحه میان‌قاب‌های مصالح بنایی است. با این‌حال، از آنجا که اجزای این سیستم به‌صورت مستقل ارزیابی نشده‌اند، سهم جداگانه هر یک از اجزا در بهبود عملکرد مشاهده شده قابل تعیین نیست.

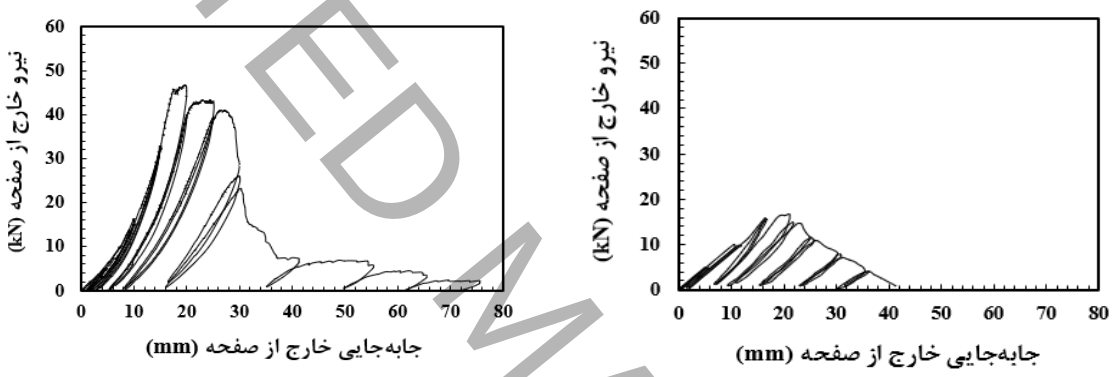
۴-۲- بررسی عملکرد نمونه‌ها

۴-۲-۱- رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها

شکل (۱۶) نمودارهای نیرو-جابجایی چرخه‌ای نمونه‌های IFM-OOP و SIFM-OOP را تحت بارگذاری خارج از صفحه نشان می‌دهد. نمونه IFM-OOP رفتار نسبتاً تردی از خود نشان داد؛ به‌گونه‌ای که پس از رسیدن به مقاومت بیشینه، افت ناگهانی سختی و

ACCEPTED MANUSCRIPT

ظرفیت باربری مشاهده شد. این رفتار ناشی از گسترش سریع ترک‌ها، لغزش درزهای ملات و از بین رفتن مکانیزم انتقال نیرو در میان‌قاب بود. در مقابل، نمونه SIFM-OOP پاسخ چرخه‌ای پایدارتر و حلقه‌های هیسترزیس بزرگ‌تری ارائه داد. استفاده از سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی، متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی، در مقایسه با نمونه بدون تقویت، با افزایش ظرفیت باربری، کاهش نرخ افت مقاومت پس از نقطه اوج و حفظ بهتر یکپارچگی میان‌قاب در طول بارگذاری همراه بود. بنابراین، نمونه تقویت‌شده توانست تغییرشکل‌های بزرگ‌تری را بدون گسیختگی ناگهانی تحمل کند که بیانگر بهبود رفتار پس از اوج و پایداری چرخه‌ای نمونه آزمایش‌شده است. در سطوح جابه‌جایی برنامه بارگذاری، دو چرخه بارگذاری رفت‌وبرگشتی اجرا شد؛ بااین‌حال، به دلیل هم‌پوشانی مسیرهای بارگذاری و باربرداری، دو چرخه در برخی قسمت‌های نمودار شکل (۱۶) به‌وضوح از یکدیگر قابل تفکیک نیستند. در نمونه بدون تقویت (IFM-OOP)، بارگذاری تا جابه‌جایی نهایی ۴۰ میلی‌متر ادامه یافت. در نمونه تقویت‌شده (SIFM-OOP)، پس از افت نیروی مقاوم در حدود جابه‌جایی ۴۰ میلی‌متر، یک چرخه کامل رفت و برگشتی دیگر اجرا شد و بارگذاری تا جابه‌جایی ۷۰ میلی‌متر ادامه یافت. بنابراین، تعداد چرخه‌های اجرا شده در بخش انتهایی بارگذاری نمونه تقویت‌شده با سطوح قبلی یکسان نبود و این تفاوت در نمودار نیرو-جابه‌جایی آن قابل مشاهده است.



(الف) نمونه IFM-OOP (ب) نمونه SIFM-OOP

شکل ۱۶: نمودارهای نیرو–جابه‌جایی نمونه‌های IFM-OOP و SIFM-OOP تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه

Figure 16. Force–displacement curves of the IFM-OOP and SIFM-OOP specimens under cyclic out-of-plane loading: (a) IFM-OOP specimen; (b) SIFM-OOP specimen.

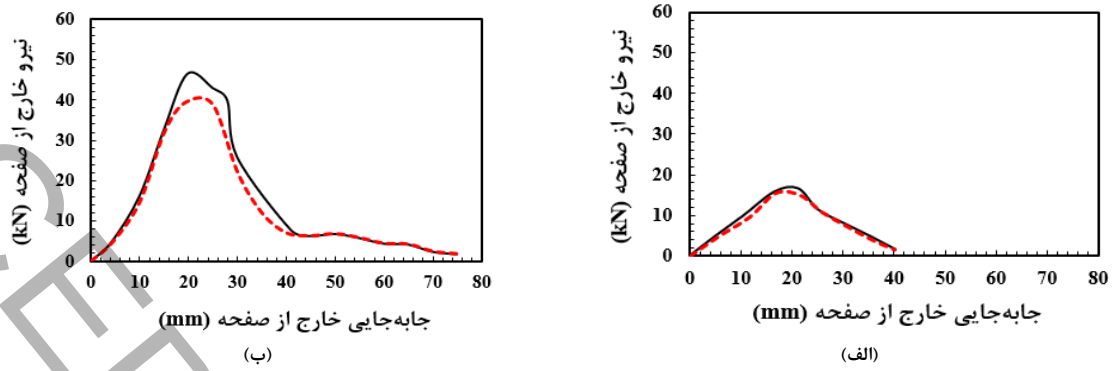
۴-۲-۲- بررسی منحنی‌های پوش‌اور و پارامترهای لرزه‌ای

شکل (۱۷) منحنی‌های پوش استخراج‌شده از دو چرخه بارگذاری خارج از صفحه را برای هر یک از دو نمونه نشان می‌دهد و پارامترهای متناظر در جدول (۲) ارائه شده‌اند. مقایسه نتایج دو چرخه نشان می‌دهد که میزان اختلاف پارامترهای پاسخ در چرخه دوم نسبت به چرخه اول، بسته به نوع نمونه و پارامتر مورد بررسی، متفاوت است. در نمونه IFM-OOP، مقاومت بیشینه و انرژی مستهلک شده به‌ترتیب حدود ۴/۷ و ۵/۸ درصد کاهش یافتند؛ درحالی‌که در نمونه SIFM-OOP، این کاهش‌ها به‌ترتیب حدود ۱۴/۷ و ۱۲/۲ درصد بود. همچنین، در هر دو نمونه، سختی اولیه و سختی مؤثر در چرخه دوم کاهش یافتند. این تفاوت‌ها می‌توانند با پیشرفت آسیب و تغییر وضعیت ترک‌ها در جریان بارگذاری چرخه‌ای مرتبط باشند. بااین‌حال، بر اساس داده‌های موجود، نمی‌توان سهم هر یک از سازوکارهای آسیب را به‌طور مستقل تعیین کرد.

مقایسه دو نمونه همچنین نشان می‌دهد که نمونه تقویت‌شده در هر دو چرخه، مقاومت بیشینه، سختی اولیه، سختی مؤثر و انرژی مستهلک‌شده بیشتری نسبت به نمونه بدون تقویت داشته است. این نتایج، در نمونه‌های آزمایش‌شده، بیانگر عملکرد بهتر

ACCEPTED MANUSCRIPT

سیستم تقویت پیشنهادی در برابر بارگذاری خارج از صفحه است. با توجه به آزمایش تنها یک نمونه برای هر شرایط، اختلاف پاسخ دو چرخه نباید به‌عنوان شاخصی از پراکندگی نتایج بین نمونه‌های مستقل یا اثبات تکرارپذیری آماری تلقی شود.



شکل ۱۷: منحنی‌های پوش استخراج‌شده از دو چرخه بارگذاری خارج از صفحه: (الف) نمونه IFM-OOP؛ (ب) نمونه SIFM-OOP.

Figure 17. Envelope curves derived from two out-of-plane loading cycles: (a) IFM-OOP specimen; (b) SIFM-OOP specimen.

جدول ۲: پارامترهای لرزه‌ای استخراج‌شده از منحنی‌های پوش اور برای دو چرخه بارگذاری خارج از صفحه.

Table 2. Seismic parameters derived from the envelope curves for two out-of-plane loading cycles.

نمونه‌ها	چرخه	نیرو P_{max} (kN)	جابه‌جایی متناظر با نیرو حداکثر d_{max} (mm)	جابه‌جایی نهایی $d_{ultimate}$ (mm)	سختی اولیه K_i (kN/mm)	سختی موثر K_e (kN/mm)	انرژی مستهلک شده E_i (J)
IFM-OOP	اول	۱۷	۲۰	۴۰	۱/۱	۱/۰۴	۳۵۷/۴
	دوم	۱۶/۲	۱۹	۴۰	۰/۷۸	۰/۷	۳۳۶/۶
	اختلاف	٪-۴/۷	٪-۵	۰٪	٪-۲۹/۱	٪-۳۲/۷	٪-۵/۸
SIFM-OOP	اول	۴۶/۴	۲۰	۷۰	۱/۷	۲/۳	۱۱۵۵/۷
	دوم	۳۹/۶	۲۰	۷۰	۱/۴	۲/۰۴	۱۰۱۵/۰۳
	اختلاف	٪-۱۴/۷	۰٪	۰٪	٪-۱۷/۶	٪-۱۲/۸	٪-۱۲/۲

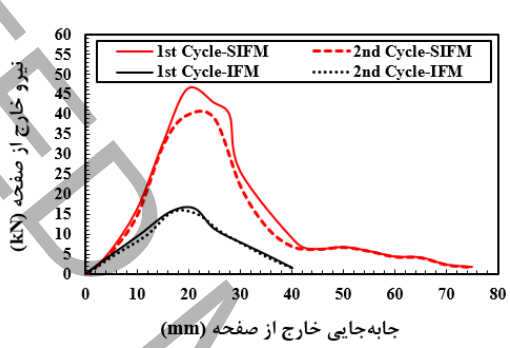
۴-۲-۳- مقایسه عملکرد لرزه‌ای نمونه‌ها

شکل (۱۸) مقایسه منحنی‌های پوش دو نمونه را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی، متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه-سیمان و اجزای مهاری فولادی، در مقایسه با نمونه بدون تقویت، موجب بهبود شاخص‌های اندازه‌گیری‌شده عملکرد خارج از صفحه شده است. مقاومت بیشینه از ۱۷ کیلونیوتن در نمونه بدون تقویت به ۴۶/۴ کیلونیوتن در نمونه تقویت‌شده افزایش یافت که معادل افزایش حدود ۱۷۳ درصدی ظرفیت باربری است. همچنین، تغییرمکان نهایی ثبت‌شده از ۴۰ میلی‌متر در نمونه بدون تقویت به ۷۰ میلی‌متر در نمونه تقویت‌شده رسید که نشان‌دهنده افزایش حدود ۷۵ درصدی تغییرمکان نهایی است.

سختی اولیه نیز از ۱/۱ کیلونیوتن بر میلیمتر در نمونه بدون تقویت به ۱/۷ کیلو نیوتن بر میلیمتر در نمونه تقویت شده افزایش یافت که بیانگر بهبود حدود ۵۴/۵ درصدی در سختی اولیه سیستم است. همچنین سختی مؤثر با افزایش از ۱/۰۴ به ۲/۳ کیلو نیوتن بر میلیمتر، حدود ۱۲۵ درصدی بیشتر شد که نشان‌دهنده حفظ بهتر ظرفیت باربری در مراحل پس از ترک‌خوردگی است. از سوی دیگر، انرژی مستهلک‌شده از ۳۵۷/۴ ژول در نمونه بدون تقویت به ۱۱۵۵/۷ ژول در نمونه تقویت شده افزایش یافت که معادل افزایش حدود ۲۲۳/۴ درصدی است. این نتایج نشان می‌دهند که در نمونه‌های آزمایش‌شده، سیستم تقویت پیشنهادی با افزایش مقاومت و سختی و نیز افزایش انرژی مستهلک‌شده همراه بوده است. بااین‌حال، افزایش تغییرمکان نهایی به‌تنهایی برای نتیجه‌گیری درباره میزان افزایش شکل‌پذیری کافی نیست و ارزیابی این شاخص به تعریف و محاسبه معیار مناسب شکل‌پذیری نیاز دارد.

ACCEPTED MANUSCRIPT

بررسی منحنی‌های پوش و الگوی خرابی نشان داد که نمونه IFM-OOP پس از رسیدن به مقاومت بیشینه، افت مقاومت بیشتری را تجربه کرد؛ در مقابل، نمونه SIFM-OOP کاهش تدریجی‌تری در مقاومت نشان داد و تا تغییرمکان نهایی ۷۰ میلی‌متر، ظرفیت باربری قابل‌اندازه‌گیری داشت. این تفاوت رفتاری نشان می‌دهد که سیستم تقویت پیشنهادی در نمونه آزمایش‌شده با بهبود رفتار پس از اوج همراه بوده است. یکی از سازوکارهای احتمالی برای تبیین این رفتار، مشارکت عملکرد قوسی میان‌قاب در انتقال نیروهای خارج از صفحه است. در نمونه بدون تقویت، ترک‌خوردگی و خردشدگی موضعی بلوک‌ها ممکن است پایداری این سازوکار را محدود کرده باشد؛ درحالی‌که در نمونه تقویت‌شده، شبکه مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ماسه‌سیمان و مهارهای فولادی می‌توانند با کمک به حفظ یکپارچگی میان‌قاب، شرایط مناسب‌تری برای انتقال نیرو فراهم کنند (شکل ۱۹). بااین‌حال، در پژوهش حاضر اندازه‌گیری مستقیم کرنش‌ها، عرض ترک‌ها یا توزیع نیرو انجام نشده است؛ بنابراین، عملکرد قوسی دوطرفه به‌عنوان تبیین احتمالی رفتار مشاهده‌شده مطرح می‌شود و تأیید مستقل و کمی آن امکان‌پذیر نیست. با توجه به آزمایش تنها یک نمونه برای هر یک از شرایط مورد بررسی، نتایج بیانگر رفتار نمونه‌های آزمایش‌شده هستند و تعمیم آن‌ها به سایر نمونه‌های مشابه به انجام آزمایش‌های تکراری نیاز دارد.



شکل ۱۸: مقایسه منحنی‌های پوش نمونه‌های IFM-OOP و SIFM-OOP

Figure 18. Comparison of the envelope curves of the IFM-OOP and SIFM-OOP specimens.



(ب) (الف)

شکل ۱۹: عملکرد قوسی دوطرفه نمونه‌های آزمایشگاهی: (الف) نمونه IFM-OOP؛ (ب) نمونه SIFM-OOP.

Figure 19. Two-way arching action of the laboratory specimens: (a) IFM-OOP specimen; (b) SIFM-OOP specimen.

۴-۳- محدودیت‌های پژوهش

یکی از محدودیت‌های پژوهش حاضر، آزمایش تنها یک نمونه برای هر یک از شرایط مورد بررسی است. بنابراین، اگرچه نتایج تفاوت عملکرد نمونه‌های تقویت‌شده و تقویت‌نشده را نشان می‌دهند، امکان ارزیابی پراکندگی نتایج، عدم‌قطعیت تجربی و تکرارپذیری

ACCEPTED MANUSCRIPT

آماری فراهم نیست. ازاین‌رو، درصدهای بهبود گزارش‌شده صرفاً بیانگر اختلاف مقادیر اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های آزمایش‌شده هستند و تعمیم آن‌ها به نمونه‌های مشابه به انجام آزمایش‌های تکراری نیاز دارد.

همچنین، به دلیل اندازه‌گیری‌نشدن مستقیم کرنش‌ها، عرض ترک‌ها و توزیع نیرو، تفسیر مربوط به مشارکت عملکرد قوسی میان‌قاب بر مشاهدات کیفی و رفتار کلی نمونه‌ها استوار است و تأیید کمی آن به بررسی‌های آزمایشگاهی تکمیلی نیاز دارد.

محدودیت دیگر، بررسی‌نشدن هزینه اجرای سیستم مقاوم‌سازی پیشنهادی و مقایسه اقتصادی آن با سایر روش‌های مقاوم‌سازی است. بنابراین، درباره صرفه اقتصادی یا برتری هزینه‌ای روش پیشنهادی نمی‌توان بر اساس نتایج این پژوهش نتیجه‌گیری کرد و ارزیابی هزینه مصالح، نیروی انسانی و اجرا به پژوهش‌های آینده واگذار می‌شود.

در نهایت، ملاحظات اجرایی آماده‌سازی سطح دیوار پیش از مقاوم‌سازی به‌صورت مستقل بررسی نشده‌اند. در ساختمان‌های موجود، برداشتن لایه نازک‌کاری ممکن است به بلوک‌های سفالی یا درزهای ملات آسیب وارد کند. ازاین‌رو، پیش از اجرای روش پیشنهادی، باید وضعیت دیوار و امکان آماده‌سازی سطح با حداقل آسیب ارزیابی شود. در صورت احتمال آسیب قابل‌توجه، مقایسه فنی و اقتصادی مقاوم‌سازی با گزینه‌هایی مانند تخریب و اجرای مجدد دیوار ضروری است. بررسی این ملاحظات اجرایی نیز به پژوهش‌های آینده موکول می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار خارج از صفحه دو نمونه میان‌قاب بلوک سفال حفره‌دار، شامل نمونه بدون تقویت (IFM-OOP) و نمونه تقویت‌شده با سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه‌سیمان و اجزای مهاری فولادی (SIFM-OOP)، تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه‌استاتیکی به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. هدف اصلی پژوهش، ارزیابی تأثیر سیستم تقویت پیشنهادی بر مقاومت، سختی، ظرفیت تغییرشکل، اتلاف انرژی و مکانیزم خرابی میان‌قاب‌های بنایی در برابر بارگذاری خارج از صفحه بود. بر اساس نتایج حاصل، مهم‌ترین یافته‌های پژوهش به شرح زیر است:

در نمونه‌های آزمایش‌شده، استفاده از سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی متشکل از نوارهای مش الیاف شیشه مقاوم به قلیا، اندود ملات ماسه‌سیمان و اجزای مهاری فولادی، ظرفیت باربری خارج از صفحه را از ۱۷ کیلونیوتن در نمونه بدون تقویت به ۴۶/۴ کیلونیوتن در نمونه تقویت‌شده افزایش داد که بیانگر افزایش حدود ۱۷۳ درصدی نسبت به نمونه بدون تقویت است.

تغییرمکان نهایی نمونه تقویت‌شده از ۴۰ میلی‌متر در نمونه بدون تقویت به ۷۰ میلی‌متر رسید که معادل افزایش حدود ۷۵ درصدی در تغییرمکان نهایی است. این نتیجه نشان‌دهنده توانایی نمونه تقویت‌شده در تحمل تغییرمکان‌های بزرگ‌تر پیش از رسیدن به وضعیت نهایی ثبت‌شده در آزمایش است.

سختی اولیه نمونه تقویت‌شده از ۱/۱ کیلونیوتن بر میلی‌متر در نمونه بدون تقویت به ۱/۷ کیلونیوتن بر میلی‌متر افزایش یافت که بیانگر افزایش حدود ۵۴/۵ درصدی است. همچنین، سختی مؤثر از ۱/۰۴ به ۲/۳۴ کیلونیوتن بر میلی‌متر رسید که معادل افزایش حدود ۱۲۵ درصدی نسبت به نمونه بدون تقویت است.

انرژی مستهلک‌شده در نمونه تقویت‌شده از ۳۵۷/۴ ژول در نمونه بدون تقویت به ۱۱۵۵/۷ ژول افزایش یافت که بیانگر افزایش حدود ۲۲۳/۴ درصدی انرژی مستهلک‌شده در نمونه‌های مورد بررسی است. این یافته نشان می‌دهد که نمونه تقویت‌شده در آزمایش انجام‌شده، انرژی بیشتری را نسبت به نمونه بدون تقویت مستهلک کرده است.

بررسی الگوی خرابی نشان داد که نمونه بدون تقویت پس از رسیدن به بار بیشینه، با افت قابل‌توجه مقاومت و تخریب موضعی میان‌قاب مواجه شد. در مقابل، نمونه تقویت‌شده رفتار پس از اوج تدریجی‌تری نشان داد و سیستم تقویت تا جابه‌جایی‌های

ACCEPTED MANUSCRIPT

بزرگ‌تر، به‌طور عمده به حفظ یکپارچگی میان‌قاب و جلوگیری از فروپاشی ناگهانی کمک کرد. این تفاوت، نقش بالقوه سیستم تقویت پیشنهادی را در بهبود رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی نشان می‌دهد.

بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، عملکرد نمونه تقویت‌شده با تشکیل عملکرد قوسی دوطرفه و محدودکردن گسترش خرابی در میان‌قاب همراه بود. بااین‌حال، ازآنجاکه اجزای سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی به‌صورت مستقل آزمایش نشده‌اند، سهم جداگانه نوارهای مش الیاف شیشه، اندود ملات ماسه‌سیمان و اجزای مهاری فولادی در بهبود عملکرد مشاهده‌شده قابل تعیین نیست. بنابراین، نتایج و درصدهای بهبود گزارش‌شده به عملکرد کلی سیستم مقاوم‌سازی ترکیبی در نمونه آزمایش‌شده مربوط هستند و برای تعمیم آن‌ها به سایر نمونه‌های مشابه، انجام آزمایش‌های تکراری ضروری است.

تشکروقدردانی

نویسندگان از مسئولان آزمایشگاه سازه و تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شاهرود به‌دلیل فراهم نمودن امکانات لازم برای انجام این پژوهش و همچنین از آقایان محمدجواد زارعی و میلاد فرجی، دانشجویان کارشناسی ارشد، به‌دلیل همکاری ارزشمند در اجرای آزمایش‌ها، صمیمانه قدردانی می‌کنند.

علائم انگلیسی

P_{max}	نیرو حداکثر، kN
K_i	سختی اولیه، kN/mm
K_e	سختی موثر، kN/mm
E_i	انرژی مستهلک شده، J
d_{max}	جابه‌جایی متناظر با نیرو حداکثر، mm
$d_{ultimate}$	جابه‌جایی نهایی، mm

مراجع

[1] M. Di Domenico, P. Ricci, 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, 24(6) (2020) 881–919.

[2] F. Anić, D. Penava, I. Guljaš, V. Sarhosis, L. Abrahamczyk, Out-of-plane cyclic response of masonry infilled RC frames: An experimental study, Engineering Structures, 238 (2021) 112258.

[3] C. Butenweg, M. Marinković, R. Salatić, Experimental results of reinforced concrete frames with masonry infills under combined quasi-static in-plane and out-of-plane seismic loading, Bulletin of Earthquake Engineering, 17(6) (2019) 3397–3422.

[4] K.Q. Walsh, D.Y. Dizhur, J. Shafaei, H. Derakhshan, J.M. Ingham, In situ out-of-plane testing of unreinforced masonry cavity walls in as-built and improved conditions, in: Structures, Elsevier, 2015, pp. 187–199.

[5] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arêde, H. Varum, Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry infill walls, Engineering Structures, 111 (2016) 48–63.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[6] F. Akhoundi, G. Vasconcelos, P. Lourenço, L.M. Silva, F. Cunha, R. Fangueiro, In-plane behavior of cavity masonry infills and strengthening with textile reinforced mortar, Engineering Structures, 156 (2018) 145–160.
[7] B. Pantò, L. Silva, G. Vasconcelos, P. Lourenço, Macro-modelling approach for assessment of out-of-plane behavior of brick masonry infill walls, Engineering Structures, 181 (2019) 529–549.
[8] B. Binici, E. Canbay, A. Aldemir, I.O. Demirel, U. Uzgan, Z. Eryurtlu, K. Bulbul, A. Yakut, Seismic behavior and improvement of autoclaved aerated concrete infill walls, Engineering Structures, 193 (2019) 68–81.
[9] M.T. De Risi, A. Furtado, H. Rodrigues, J. Melo, G.M. Verderame, A. António, H. Varum, G. Manfredi, Experimental analysis of strengthening solutions for the out-of-plane collapse of masonry infills in RC structures through textile reinforced mortars, Engineering Structures, 207 (2020) 110203.
[10] Q. Su, X. Hu, C. Xv, R. Liu, X. Liang, H. Kong, Out-of-plane behavior of unreinforced masonry walls with horizontal slip layers in RC frames, Engineering Structures, 319 (2024) 118858.
[11] P. Triller, M. Tomaževič, M. Gams, Seismic strengthening of clay block masonry buildings with composites: an experimental study of a full scale three-storey building model, Bulletin of Earthquake Engineering, 17(7) (2019) 4049–4080.
[12] L. Farias, P. Lima, R.D. Toledo Filho, Shear behavior of hollow clay brick masonry wallet coated with short jute fiber reinforced mortar, Materiales de Construcción, 74(354) (2024) e347–e347.
[13] S. Bula, M. Kholod, Experimental study of compressed ceramic hollow brick masonry structures strengthened with GFRP meshes, in: International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering, Springer, 2020, pp. 71–78.
[14] C.G. Papanicolaou, T.C. Triantafillou, M. Papathanasiou, K. Karlos, Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading, Materials and structures, 41(1) (2008) 143–157.
[15] M. Ehsani, H. Saadatmanesh, J. Velazquez-Dimas, Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading, Journal of Composites for Construction, 3(3) (1999) 134–142.
[16] A. Dehghani, F. Nateghi-Alahi, G. Fischer, Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames, Engineering Structures, 105 (2015) 197–208.
[17] D. Ostad, J. Shafaei, F.J. Alaee, Experimental Evaluation of the Diagonal Tension Test of Hollow Clay Blocks Strengthening with (AR) Glass Fibers, Case Studies in Construction Materials, (2025) e05151.
[18] L. Facconi, F. Minelli, Retrofitting RC infills by a glass fiber mesh reinforced overlay and steel dowels: experimental and numerical study, Construction and Building Materials, 231 (2020) 117133.
[19] A. Kalali, M.Z. Kabir, Experimental response of double-wythe masonry panels strengthened with glass fiber reinforced polymers subjected to diagonal compression tests, Engineering Structures, 39 (2012) 24–37.
[20] A.C. 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary, American Concrete Institute, 2019.
[21] A. International, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (ASTM A370-21), in, West Conshohocken, PA, USA, 2021.
[22] A. International, Standard Test Method for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile (ASTM C67), in, West Conshohocken, PA, USA, 2021.
[23] A. International, Standard Test Methods for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (ASTM C109), in, West Conshohocken, PA, USA, 2021.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[24] A. International, Standard Test Method for Cyclic Shear Strength of Veneer Assemblies (ASTM E2098), in, West Conshohocken, PA, USA, 2021.
[25] S.A. Asadzadeh, M. Mohammadi, N. KA Attari, S.A. Zareei, An experimental study on finding prequalified connectors between the wall and steel frame infilled with autoclave-cured aerated concrete blocks, Journal of Earthquake Engineering, 26(8) (2022) 4085–4104.

ACCEPTED MANUSCRIPT