



مطالعه آزمایشگاهی به منظور یافتن اتصال دهنده قابل اعتماد برای اتصال میان قاب به قاب در قاب‌های فولادی میان‌پر

صاحبعلی اسدزاده^۱، سید علیرضا زارعی^۱، مجید محمدی^{۲*}، نادر خواجه احمد عطاری^۳

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان (خوراسگان)، اصفهان، ایران

۲- پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۳- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۱

بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۹

کلمات کلیدی:

قاب میان‌پر فولادی

نوع اتصال دیوار میان‌قاب

اتصال دهنده قابل اعتماد

آزمایش‌های داخل صفحه و خارج

از صفحه

بلوک‌های بتن سبک اتوکلاو شده

(AAC)

خلاصه: در هنگام زلزله، میان‌قاب‌ها در معرض تحریک‌های داخل صفحه و خارج از صفحه قرار می‌گیرند. بعد از چند دور ارتعاش در داخل صفحه، نامناسب‌ترین حالت در مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب زمانی است که حداقل یکپارچگی در محل اتصال میان‌قاب- قاب رخ می‌دهد. به کارگیری اتصال دهنده قابل اعتماد برای اتصال میان‌قاب به قاب به عنوان یک راه حل ابداعی، در بهبود رفتار لرزه‌ای داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها بسیار موثر است در حالی که در ادبیات فنی قاب‌های میان‌پر به طور جدی به بررسی این موضوع پرداخته نشده است. در این مطالعه، نتایج بررسی آزمایشگاهی با هدف معرفی یک اتصال دهنده کارآمد و قابل اعتماد برای اتصال میان‌قاب به قاب و بررسی تأثیر آن در رفتار داخل صفحه و خارج از صفحه قاب‌های میان‌پر و میان‌قاب ارائه شده است. چهار نمونه یک طبقه و تک دهانه در مقیاس نیمه شامل یک قاب فولادی خالی، یک دیوار میان‌قاب بدون آسیب قبلی داخل صفحه و دو قاب فولادی میان‌پر با دیوار بلوک‌های بتن سبک اتوکلاو شده، تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای داخل صفحه و خارج از صفحه با جابه‌جایی کنترل شده آزمایش شدند. نمونه‌ها با توجه به مودهای شکست، مقاومت، زوال سختی، گسترش خسارت در قاب و میان‌قاب، الگوی ترک‌خوردگی میان‌قاب، ظرفیت استهلاک انرژی و پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه میان‌قاب مقایسه شدند. بر اساس نتایج آزمایشگاهی اتصال دهنده‌های V شکل رفتار تعاملی خوب و قابل اطمینانی را از نظر ایمنی از خود نشان دادند، بنابراین این ادوات اتصال می‌توانند نوید بخش ارائه یک اتصال دهنده قابل اعتماد برای اتصال دیوار میان‌قاب به قاب باشند.

۱- مقدمه

درصد بالایی از ساختمان‌ها شامل یک سازه بتن آرمه یا اسکلت فولادی هستند که در آن‌ها فضای بین قاب‌ها به طور کامل و یا بخشی از آن با دیوارهای مصالح بنایی (میان‌قاب) پر می‌شوند. واقعیت این است که میان‌قاب‌ها در حین زلزله با قاب محصور کننده خود اندرکنش دارند و این اندرکنش سختی، مقاومت، رفتار لرزه‌ای و عملکرد سازه‌ای قاب‌های میان‌پر را تغییر می‌دهد. جهت‌گیری تحقیقات اولیه در رفتار قاب‌های میان‌پر در راستای تعیین مقدار سختی و مقاومت قاب‌های میان‌پر [۱]، ارائه عضو جایگزین برای میان‌قاب و تعیین مشخصات آن [۲ و ۳]، ارائه مدل ریاضی برای بیان رفتار میان‌قاب و تعیین تنش‌های داخلی میان‌قاب [۴ و ۵] بود.

در تحقیقات تکمیلی تأثیر متغیرهای متعدد همچون، تعداد

دهانه‌های مجاور [۶]، بارهای ثقلی [۷ و ۸]، میان‌قاب‌های دارای بازشو [۹ و ۱۰]، نسبت طول به ارتفاع دیوار و انواع مختلف مصالح میان‌قاب [۱۱] و میان‌قاب با ارتفاع ناقص [۱۲] در رفتار قاب‌های میان‌پر مطرح و بررسی شد.

اندرکنش قاب و میان‌قاب در قاب میان‌پر دارای اثرات مثبت و منفی روی قاب، میان‌قاب و رفتار کلی ساختمان است. در طی دو دهه اخیر، به منظور استفاده از اثرات مثبت دیوارهای میان‌قاب و کاهش اثرات مضر آن‌ها تحقیقاتی همچون، مقاوم‌سازی دیوارهای میان‌قاب با استفاده از پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) [۱۳]، تقویت دیوار میان‌قاب با اضافه کردن مش مسلح در یک یا دو سطح دیوار [۱۴]، مقاوم‌سازی میان‌قاب با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی به عنوان روکش در سطح دیوار [۱۵]، تأثیر ترمیم میان‌قاب‌های آسیب دیده در رفتار قاب‌های میان‌پر [۱۶ و ۱۷]، ایده‌های نوین جهت ارائه پیکربندی جدید برای قاب‌های میان‌پر مهندسی [۱۸]،

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: M.Mohammadigh@iiees.ac.ir



ارائه راه حل ساختاری برای به کارگیری اثرات مفید میان‌قاب [۱۹]، مطالعه و توسعه میان‌قاب‌های بنایی ابداعی [۲۰]، تأثیر جداسازی میان‌قاب از قاب [۲۱ و ۲۲]، تأثیر نحوه اتصال بلوک‌های AAC به قاب بتنی [۲۳] و اثر به کارگیری ادوات اتصال برای اتصال میان‌قاب به قاب [۲۴] در رفتار قاب‌های میان‌پر مطرح و بررسی شده است. چنین مطالعاتی بخشی از ضعف‌های موجود میان‌قاب‌ها را برای کاربرد آن‌ها در ساختمان‌ها برطرف می‌سازد و ایده‌های جدیدی را برای ابداع ابتکارات نوین در میان‌قاب‌ها فراهم می‌سازد.

دلایل شکست دیوارهای میان‌قاب، علاوه بر آن که به کیفیت دیوارهای میان‌قاب ارتباط دارد، به غیر منطقی بودن نوع اتصال بین پانل میان‌قاب و سازه اصلی بستگی دارد که عامل مهم دیگری در این مورد است. ارائه جزئیات اتصال مناسب و قاب اعتماد برای اتصال میان‌قاب به قاب و محدود کردن اثر متقابل قاب و میان‌قاب به سطوح خاص جابه‌جایی نسبی طبقه در قاب‌های میان‌پر می‌تواند بخشی از ضعف‌های موجود دیوارهای میان‌قاب را برای کاربرد آن‌ها در ساختمان‌ها برطرف سازد.

ارائه روش‌های کارآمد و مناسب، برای اتصال دیوار میان‌قاب به قاب و بررسی تأثیر آن‌ها در رفتار قاب‌های میان‌پر کمترین سهم را در ادبیات فنی قاب‌های میان‌پر دارد. در مطالعات محدودی که در این زمینه انجام شده است، تأثیر اتصال دهنده‌ها فقط در رفتار داخل صفحه قاب میان‌پر بررسی گردیده است [۲۴]. در حالی که آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه، به شدت مقاومت و پایداری خارج از صفحه میان‌قاب را کاهش می‌دهد [۲۵]. انجام مطالعات آزمایشگاهی اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها با مصالح بنایی از جمله موضوعات روز مجامع علمی است. بررسی تأثیر کنش‌های داخل صفحه بر پاسخ خارج از صفحه میان‌قاب بنایی غیر مسلح (URM) نازک [۲۶]، پاسخ داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌های ساخته شده از دو دیوار نازک با مصالح بنایی توخالی (حفره‌ای) که به طور عرضی به هم وصل نمی‌شوند [۲۷]، بررسی آزمایشگاهی قاب‌های بتنی مسلح با میان‌قاب مصالح بنایی تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای مشترک داخل صفحه و خارج از صفحه [۲۸]، تأثیر نسبت ابعاد میان‌قاب (عرض (w) نسبت به ارتفاع (h)) بر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها با مصالح بنایی [۲۹]، از جمله آخرین تحقیقات انجام شده در این زمینه است، ولی در این

تحقیقات نقش اتصال دهنده‌های دیوار میان‌قاب به قاب در رفتار داخل صفحه قاب و خارج از صفحه میان‌قاب بررسی نشده است.

این مطالعه آزمایشگاهی با هدف بررسی نقش اتصال دهنده‌های میان‌قاب به قاب در رفتار قاب میان‌پر فولادی و در راستای معرفی یک نوع اتصال ایمن و کارآمد، انجام شد. به هنگام وقوع زمین لرزه با توجه به جهت نیروی موثر زلزله به ساختمان و تاریخچه بارگذاری سه حالت مختلف (۱) بارگذاری داخل صفحه زودتر از بارگذاری خارج از صفحه (۲) بارگذاری هم زمان داخل صفحه و خارج از صفحه (۳) بارگذاری خارج از صفحه زودتر از بارگذاری داخل صفحه، برای قاب‌های میان‌پر قابل پیش بینی است. آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه، به شدت مقاومت و پایداری خارج از صفحه میان‌قاب را کاهش می‌دهد و حالت خرابی دیوار میان‌قاب را تغییر می‌دهد که می‌تواند منجر به سقوط فروریزی آن شود [۳۰]. بعد از چند سیکل بارگذاری داخل صفحه بدترین حالت در مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب زمانی است که حداقل یکپارچگی بین قاب و میان‌قاب رخ می‌دهد، که نباید از آن غافل شد. در این پژوهش مطابق رویکرد به کار گرفته شده در مرجع [۲۵]، برای نمونه‌های آزمایشگاهی حالت بارگذاری داخل صفحه زودتر از بارگذاری خارج از صفحه، در نظر گرفته شد تا تأثیر آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه در رفتار خارج از صفحه دیوار میان‌قاب با در نظر گرفتن نحوه اتصال آن به قاب اصلی بررسی شود. برای این منظور دو نمونه CINF-0 و CINF-V ابتدا تحت بارگذاری چرخه‌ای داخل صفحه با جابه‌جایی کنترل شده تا رانش نسبی طبقه ۴٪ بارگذاری شد، سپس بارگذاری داخل صفحه متوقف گردید، وقتی قاب میان‌پر به حالت عادی خود برگشت، میان‌قاب نمونه مذکور (نمونه با آسیب قبلی) تحت پروتکل بارگذاری خارج از صفحه آزمایش شد. نمونه‌های شاهد BF (نمونه قاب خالی) و WNPD (نمونه بدون آسیب قبلی) به ترتیب برای مقایسه نتایج تجربی آزمایش‌های داخل صفحه و خارج از صفحه، آزمایش شدند. هدف یافتن اتصال دهنده قابل اعتماد برای اتصال دیوار میان‌قاب به قاب بود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- نمونه‌های آزمایش

قاب نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس مشخصات طراحی شده

جدول ۱. فاکتورهای مقیاس در نمونه‌های قاب میان پر

Table 1. Scale Factors in Infilled Frame Specimens

نوع مشخصه	کمیت	بعد	مقیاس گذاری	فاکتور مقیاس
مصالح	نسبت پواسون	—	S_v	۱
	مدول الاستیسیته	$ML^{-1}T^{-2}$	S_E	۱
	کرنش	—	S_ϵ	۱
	تنش	$ML^{-1}T^{-2}$	$S_\sigma = S_E$	۱
هندسی	زاویه	—	S_β	۱
	طول	L	S_l	۰/۵۰
	تغییر مکان	L	$S_x = S_l$	۰/۵۰
	مساحت	L^2	$S_A = S_{l2}$	۰/۲۵
	ممان اینرسی	L^4	$S_I = S_{l4}$	۰/۰۶۲۵
بارگذاری	بار متمرکز و نیروی برشی	MLT^{-2}	$S_p = S_\sigma \times S_l^2 = S_l^2$	۰/۲۵
	بار خطی	MT^{-2}	$S_q = S_\sigma \times S_l = S_l$	۰/۵۰
	لنگر خمشی	ML^2T^{-2}	$S_M = S_p \times S_l = S_l^3$	۰/۱۲۵

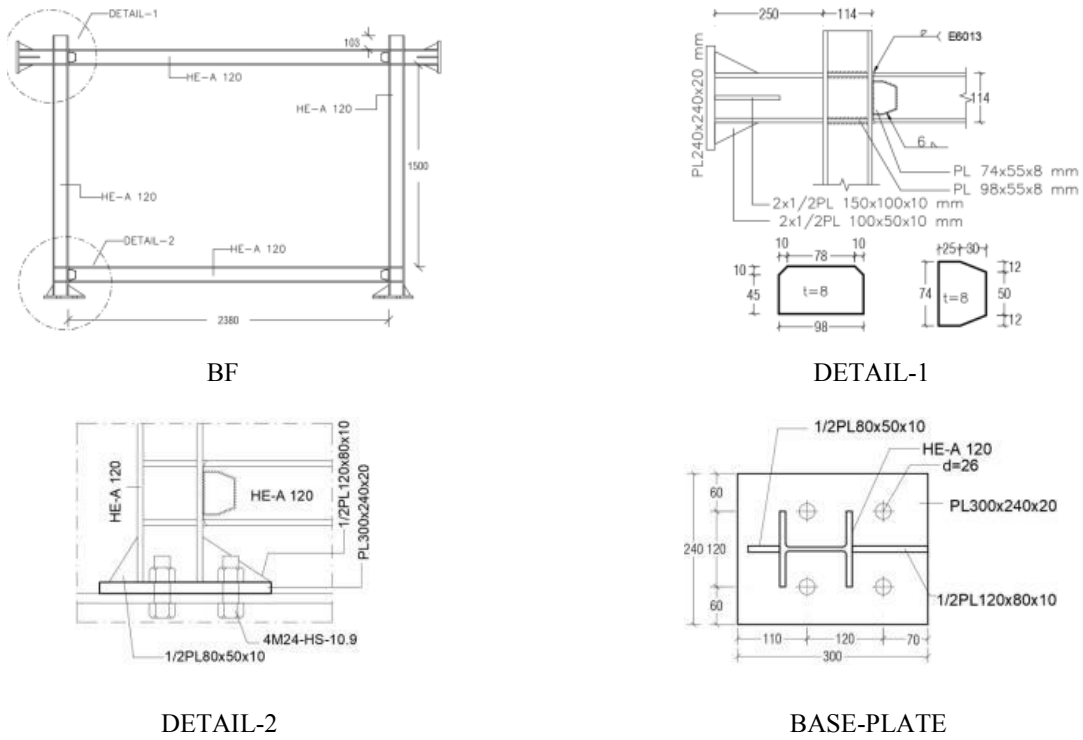
S_l مقیاس طولی بوده که برابر ۰/۵۰ در نظر گرفته شد. پارامترهای M ، L و T به ترتیب ابعاد اساسی جرم، طول و زمان هستند.

حرارتی، عایق صوتی، مقاومت در برابر آتش سوزی، تسریع در اجراء باعث رونق چشمگیر این محصول به عنوان جدا کننده‌های داخلی و پیرامونی در ساختمانها گردیده است. معمولاً در اجرای ساختمانها از بلوک‌های AAC به ابعاد $۶۰۰ \times ۲۴۰ \times ۱۰۰$ میلی مترمکعب در جدا کننده‌های پیرامونی استفاده میشود. با توجه به مقیاس نمونه‌ها، برای ساخت میان قاب‌ها از بلوک‌های AAC مقیاس شده به ابعاد $۳۰۰ \times ۱۲۰ \times ۱۰۰$ میلی مترمکعب استفاده شد. بلوک‌ها در رج‌های زوج، توسط تسمه‌های فولادی نازک و میخ به هم متصل شدند، (شکل ۲).

برای اتصال بلوک‌های AAC به یکدیگر در محل تماس با یکدیگر در بخش بند سه نوع ملات متداول شامل ملات متعارف ماسه سیمان، ملات لایه نازک اصلاح شده پلیمری (چسب AAC) و چسب پلی‌اورتان قابل استفاده است. با توجه به ابعاد بلوک‌های AAC و ماهیت ملات ماسه سیمان امکان استفاده آن در سطح تماس قائم بلوک‌ها با یکدیگر مقدور نیست، فقط در سطح تماس افقی بلوک با یکدیگر ملات ماسه سیمان قابل استفاده است. در صورتی که ملات

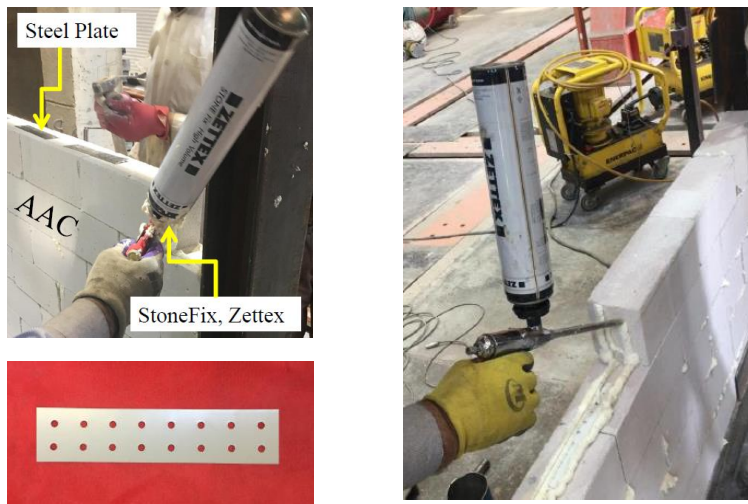
واقع‌گراانه یک ساختمان پنج طبقه واقع در شهر تهران با خاک نوع II، انتخاب شد. طراحی سازه فولادی اصلی بر اساس استاندارد AISC ۲۰۱۰ به روش حالت حدی صورت گرفت [۳۱ و ۳۲]. یک قاب از طبقه دوم ساختمان طراحی شده استخراج و خواص هندسی داده‌های آن مقیاس شدند. به لحاظ ملاحظات تامین بودجه و امکانات چنین تصمیم گرفته شد که انجام آزمایش در مقیاس ۱:۲ به جای مقیاس کامل باشد. فاکتورهای مقیاس مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. با کمک این جدول امکان تبدیل نتایج نمونه‌های مقیاس شده به سیستم سازه با مقیاس کامل وجود دارد. سه قاب خمشی فولادی یک طبقه تک دهانه یکسان با مقیاس ۱ به ۲ برای آزمایشهای مربوطه ساخته شدند. برای اتصال تیر به ستون از اتصال گیردار تقویت نشده جوشی استفاده شد.

قاب نمونه آزمایشگاهی، جزئیات اتصال تیر به ستون و جزئیات اتصال پای ستون به کف صلب در شکل ۱ آمده است. میان قاب نمونه‌ها از بلوک‌های بتن سبک اتوکلاو شده (AAC) بودند. برخی از ویژگیهای مناسب بلوک‌های AAC از جمله سبکی وزن، عایق



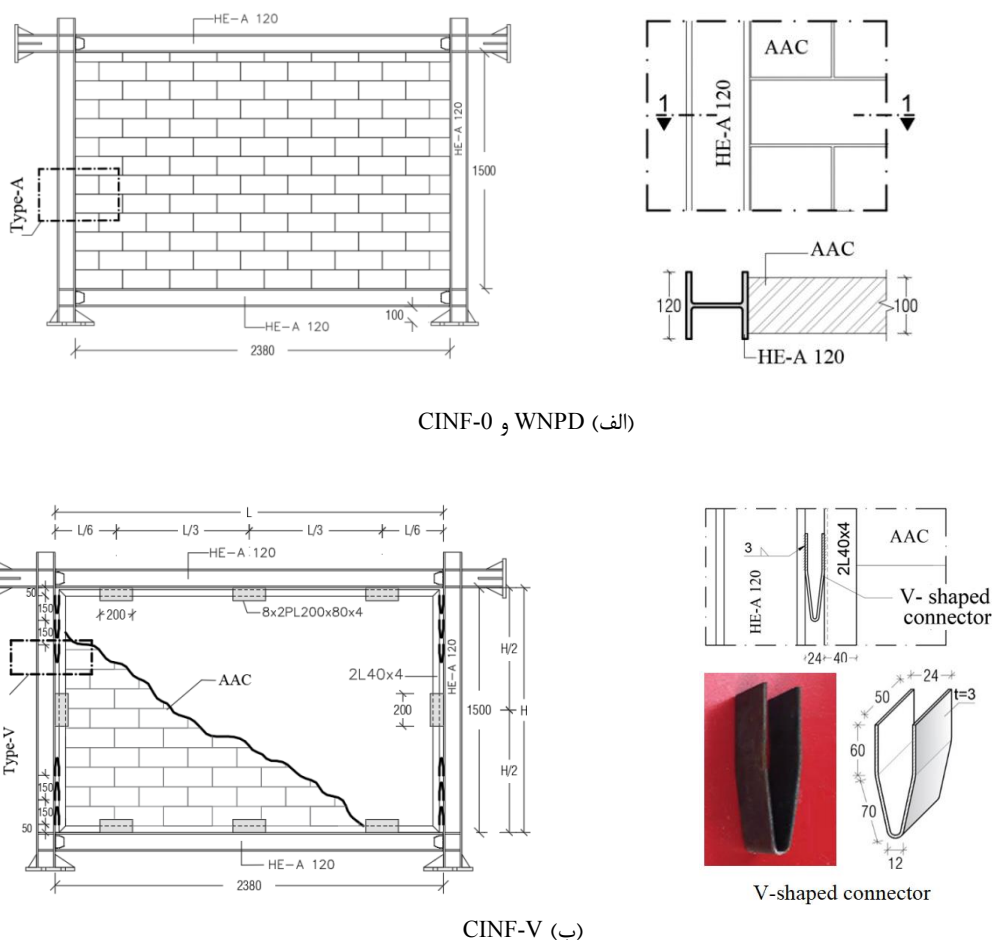
شکل ۱. قاب نمونه آزمایشگاهی-ابعاد به میلی متر

Fig. 1. Experimental frame specimen- dimensions in mm



شکل ۲. اجرای دیوار میان قاب با بلوک های AAC

Fig. 2. Construction of infilled wall using AAC blocks



الف) WNPD و CINF-0

ب) CINF-V

شکل ۳. جزئیات ابعاد و پیکربندی نمونه‌ها (واحد: میلی متر)

Fig. 3. Detailed dimensions and configurations of specimens (unit: mm)

نمونه CINF-V برای اتصال میان قاب به قاب در یک سوم ارتفاع میان قاب در بالا و پائین، از اتصال دهنده های فولادی شکل که با خم شدن اجازه سر خوردن میان قاب را فراهم می کند، استفاده شد. در این نمونه میان قاب توسط $L_{240 \times 4}$ محصور گردید. با در نظر گرفتن رانش نسبی طبقه معادل $1/5\%$ ($23/4 \text{ mm} = 156 \times 1/5\%$) و ملاحظات اجرایی برای اتصال دهنده ($24 \text{ mm} = 23/4 + 2 \times 3$)، فاصله نبشی محصور کننده میان قاب از ستون ها به اندازه ۲۴ میلی متر و از بال تیر فوقانی به اندازه ۱۲ میلی متر در نظر گرفته شد. اتصال دهنده های V شکل از یک طرف به ستون قاب و از طرف دیگر به نبشی محصور کننده میان قاب جوش شدند. پایداری خارج از صفحه میان قاب توسط ورقهای فولادی که به بال ستون ها و تیرهای قاب جوش شدند و به صورت اتکا جانبی با نبشی محصور کننده میان قاب در تماس بودند، تأمین گردید، (شکل ۳-ب).

لایه نازک اصلاح شده پلیمری (چسب AAC) و چسب پلی اورتان این محدودیت را ندارد. همچنین کاهش ضخامت ملات به ۱ تا ۳ میلی متر در مقایسه با زمانی که از ملات متعارف ماسه سیمانی با ضخامت ۱۰ تا ۱۵ میلی متر استفاده میشود یکی دیگر از ویژگیهای ملات لایه نازک اصلاح شده پلیمری (چسب AAC) و چسب پلی اورتان است. در فناوری نوین ساخت و ساز چسب پلی اورتان به دلیل داشتن برخی مزایا از جمله حمل و نقل و جابجایی ارزان تر، استفاده راحت تر، سرعت اجراء بالاتر، نیاز به نیروی انسانی کمتر، روند کسب مقاومت سریع تر و کاهش قابل توجه وزن سازه میتواند جایگزین مناسبی برای ملاتهای متعارف سنتی باشد. در این پژوهش برای اتصال بلوکها در محل تماس با یکدیگر در بخش بندهای افقی و قائم از چسب پلی اورتان استفاده گردید.

در نمونه های CINF-0 و WNPD بلوک های AAC فقط با چسب به تیر و ستون قاب میان پر وصل شده اند، (شکل ۳-الف). در

جدول ۲. اطلاعات نمونه‌های آزمایشی

Table 2. Construction of infilled wall using AAC blocks

نمونه	نوع دیوار	ضخامت دیوار (میلی‌متر)	ملاط بند بستر	نحوه ارتباط دیوار	تیپ اتصال	آزمایش داخل صفحه	آزمایش خارج از صفحه	
							(الف)	(ب)
BF	-	-	-	-	-	بلی	-	-
WNPD	بلوک AAC	۱۰۰	پلی‌اورتان	میان قاب	Type-A	خیر	بلی	خیر
CINF-0	بلوک AAC	۱۰۰	پلی‌اورتان	میان قاب	Type-A	بلی	خیر	بلی
CINF-V	بلوک AAC	۱۰۰	پلی‌اورتان	میان قاب	Type-V	بلی	خیر	بلی

(الف) بدون آسیب قبلی داخل صفحه، (ب) با آسیب قبلی داخل صفحه

اندرکنش قاب و میان قاب در قاب میان پر دارای اثرات مطلوب و نامطلوب روی قاب، میان قاب و رفتار کلی ساختمان است. یک راه حل نسبتاً عملی برای کاهش اثرات مضر اندرکنش قاب-میان قاب جدا کردن دیوار میان قاب از قاب سازه مربوط به آن با ایجاد فاصله (شکاف) بین آن‌ها است [۲۲ و ۲۱]. جداسازی کامل، نادیده گرفتن اثرات مطلوب میان قابها در عملکرد قابهای میان پر است. اتصال دهنده Type-V در نمونه CINF-V در راستای کاهش اثرات منفی و بهره برداری از اثرات مثبت اندرکنش قاب و میان قاب طراحی شد و در این پژوهش تاثیر آن در رفتار داخل صفحه قاب میان پر و خارج از صفحه میان قاب بررسی گردید.

هدف از انتخاب نمونه CINF-0 به عنوان یکی از نمونه‌های آزمایشگاهی، مقایسه نتایج آزمایشگاهی نمونه CINF-V با نتایج آزمایشگاهی این نمونه بود تا مشخص شود که با به کارگیری اتصال دهنده‌های V شکل تا چه اندازه: (الف) از گسترش خسارت در میان قاب جلوگیری می‌شود. (ب) اثر نامطلوب افزایش سختی اولیه حذف می‌شود. (ج) با سالم ماندن میان قاب در رانش نسبی طبقه ۲/۵٪ (رانش نسبی معادل سطح عملکرد ایمنی جانی)، زوال سختی قاب جبران می‌گردد و مقاومت قاب میان پر افزایش می‌یابد. (د) تأثیر نامطلوب اندرکنش داخل صفحه قاب - میان قاب بر رفتار خارج از صفحه میان قاب حذف و مقاومت خارج از صفحه میان قاب بهبود می‌یابد. (ه) پایداری خارج از صفحه میان قاب به هنگام وقوع زلزله تامین می‌گردد. در نهایت با استفاده از اتصال دهنده V شکل، تا چه اندازه ضعف‌های میان قاب با بلوک‌های AAC برای کاربرد آن‌ها در

ساختمان‌ها برطرف می‌شود.

از آنجایی که در روند فزاینده بارگذاری جانبی به دلیل تفاوت در تغییر شکل خمشی قاب و تغییر شکل برشی میان قاب اولین تماس بین قاب و میان قاب در گوشه‌های فشاری میان قاب صورت می‌گیرد، به همین دلیل چیدمان ادوات اتصال به گونه‌ای انتخاب شد که قسمت انحنای آن‌ها به طرف گوشه نزدیک قاب، نباشد تا از خرابی موضعی آن‌ها در بارگذاری چرخه‌ای جلوگیری شود. جدول ۲ اطلاعات مربوط به نمونه‌ها را ارائه می‌دهد.

۲-۲- ویژگی مواد

برای ویژگی مواد تعیین مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی، سه نمونه از بال، سه نمونه از جان مقطع HE-A120 و سه نمونه از ورق اتصال دهنده‌ها، طبق استاندارد ASTM A 370-11 [۳۳] آزمایش شدند. میانگین مقادیر حد تسلیم (F_y)، حد نهایی (F_u) و ضریب ارتجاعی (E) برای فولاد مصرفی در قاب به ترتیب برابر ۲۹۷/۵، ۴۳۵/۵ مگاپاسگال و ۲۰۲ کیگاپاسگال و اتصال دهنده‌ها به ترتیب برابر ۲۸۸، ۳۷۶ مگاپاسگال و ۱۹۸ کیگاپاسگال تعیین شد.

مقاومت فشاری واحدهای بلوک‌های AAC و وزن واحد حجم خشک آن‌ها بر اساس استاندارد ASTM C 1386-07 [۳۴] اندازه‌گیری شد. واحدهای مصالح از واحدهای اصلی بریده شدند، که قابل مقایسه با ساختار واقعی آن‌ها باشند. نتایج به دست آمده از آزمایش تعیین مقاومت فشاری برای شش نمونه بلوک AAC به ابعاد اسمی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر که میانگین مقاومت فشاری (f_m) شش



شکل ۴. تعیین مشخصات مکانیکی مصالح، الف) مقاومت کششی و مقاومت برشی بلوک‌های AAC ب) مقاومت برشی چسب.

Fig. 4. Determination of mechanical characteristics of the materials: (a) Tensile strength and shear strength of the AAC blocks; (b) Shear strength of polyurethane glue

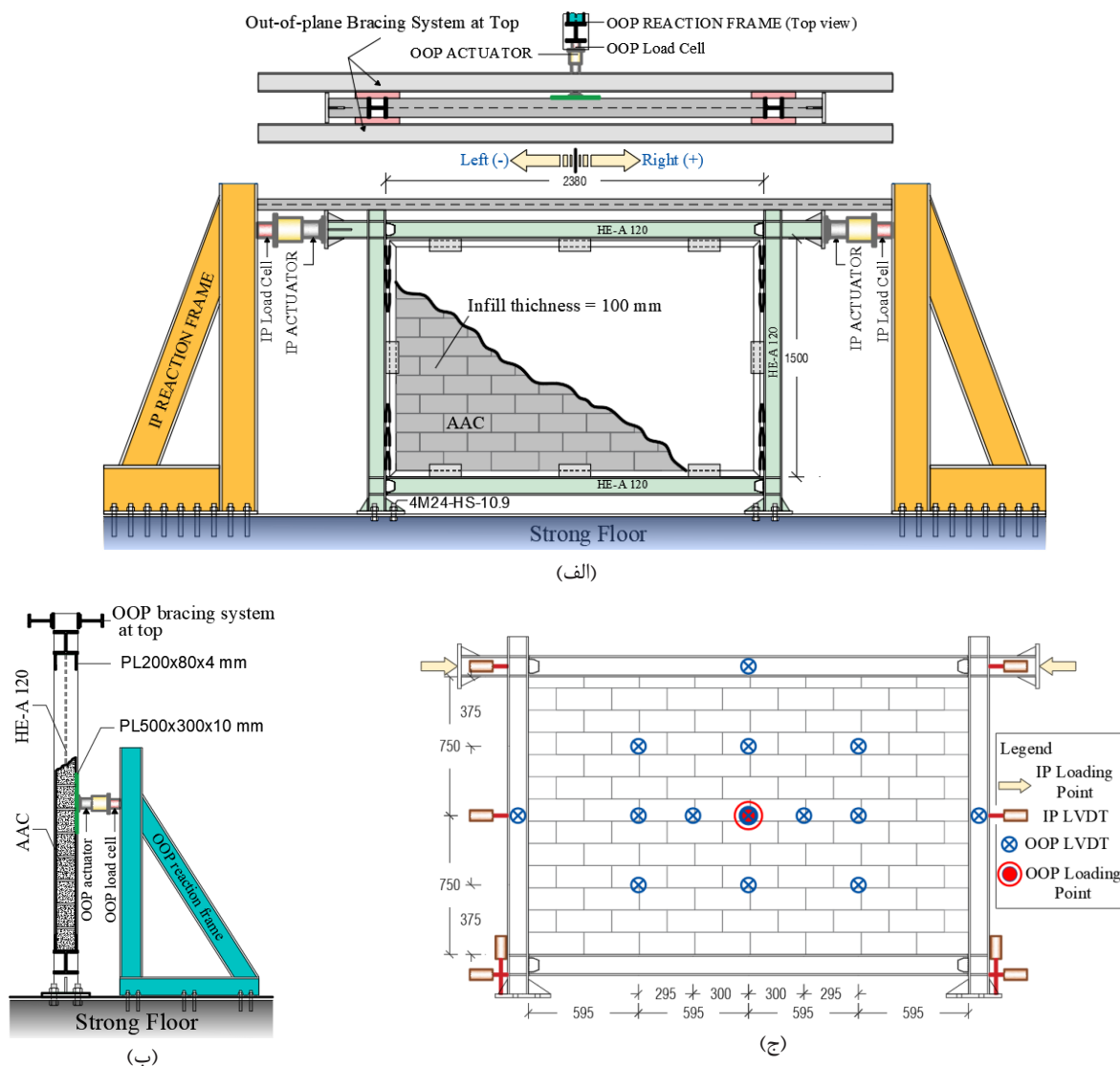
متوسط مقاومت برشی (f_v)، مقاومت کششی (f_t) و مدول برش بسته‌های بنایی (G_m) بلوک AAC که در آن‌ها از چسب پلی‌اورتان به عنوان ملات بند بستر استفاده شده بود، به ترتیب مساوی ۰/۳۵، ۰/۲۲ و مگاپاسگال و ۵۹۷ گیگاپاسگال تعیین شد.

مقاومت برشی خالص چسب بند بستر بر اساس استاندارد DIN EN ۱۰۵۲-۳ [۳۷] بدون اعمال پیش فشردگی در نمونه‌ها تعیین شد (شکل ۴-ب). برای ساخت نمونه‌ها از بلوک‌های AAC مقیاس شده به ابعاد $۳۰۰ \times ۱۲۰ \times ۱۰۰$ میلی‌متر استفاده گردید. نمونه‌ها در دو سری سه تایی A-i ($i=1,2,3$) و B-i ($i=1,2,3$) آزمایش شدند. در نمونه‌های A-i ($i=1,2,3$) ما بین بلوک‌ها فقط چسب بود در حالی که در نمونه‌های B-i ($i=1,2,3$) ما بین بلوک‌ها علاوه بر چسب تسمه‌ها رابط نیز بودند تا تأثیر آن‌ها در مقاومت چسبندگی چسب بررسی شود. نمونه‌ها بعد از ۷۲ ساعت آزمایش شدند. بر اساس نتایج آزمایش‌ها مقدار متوسط مقاومت برشی چسب پلی‌اورتان (f_{v0}) در محل اتصال (بند) بلوک‌های AAC برای حالتی که ما بین بلوک‌ها فقط چسب باشد مساوی ۰/۴۱ مگاپاسگال و برای حالتی که ما بین بلوک‌ها علاوه بر چسب تسمه رابط نیز باشد مساوی ۰/۲۲ مگاپاسگال تعیین شد. این نتایج نشان می‌دهد، مقاومت چسبندگی چسب پلی‌اورتان

بلوک مجزا که در وجه ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر خود فشرده شده‌اند، مساوی ۳/۴۰ مگاپاسگال می‌باشد. متوسط وزن واحد حجم برابر ۵/۲۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب تعیین شد.

مقاومت فشاری منشورهای بنایی برای سه نمونه، شامل دو رج بلوک AAC و یک لایه چسب پلی‌اورتان مطابق با استاندارد ASTM C 1314-07 [۳۵] تعیین شد. نمونه‌ها بعد از ۷۲ ساعت تحت بار فشاری عمودی آزمایش شدند. بر اساس نتایج آزمایش‌ها مقدار متوسط مقاومت فشاری منشورهای بنایی بلوک AAC مساوی ۱/۰۷ مگاپاسگال و مقدار میانگین ضریب ارتجاعی (E_m) مساوی ۱۶۳۷ مگاپاسگال تعیین شد.

مقاومت برشی، مقاومت کششی و مدول برشی بسته‌های بنایی بلوک‌های AAC که در آن‌ها از چسب پلی‌اورتان به عنوان ملات بند بستر استفاده شده بود، با آزمایش کردن چهار نمونه طبق استاندارد ASTM E519/E519M-10 [۳۶] تعیین شد (شکل ۴-الف). نمونه‌ها در امتداد قطرهای مجهز به دو دستگاه LVDT برای اندازه‌گیری تغییر شکل عمودی و افقی بودند. بار فشاری در امتداد قطری نمونه به وسیله یک دستگاه جک هیدرولیکی اعمال گردید. نمونه‌ها بعد از ۷۲ ساعت آزمایش شدند. بر اساس نتایج آزمایش‌ها



شکل ۵. راه اندازی آزمایش تجربی: (الف) نمای کلی (ب) نمای جانبی (ج) ابزار دقیق

Fig. 5. Experimental test set-up: (a) General view, (b) Lateral view, (c) Instrumentation

راه اندازی شدند. برای بارگذاری داخل صفحه، بارگذاری چرخه‌ای با جابه‌جایی کنترل شده به کار گرفته شد. نمونه‌ها روی کف صلب قرار گرفتند و صفحه پای ستون هر یک از ستون‌ها توسط چهار عدد پیچ و مهره M24-HS-10.9 به کف صلب متصل گردید، در حالی که دو عدد فعال کننده هیدرولیکی (با ظرفیت ۵۰ تن و ظرفیت جابه‌جایی ± 150 میلی‌متر) در دو طرف قاب، بار افقی چرخه‌ای اعمال می‌کردند. دامنه‌ها و تعداد چرخه‌ها و میزان بارگذاری داخل صفحه بر اساس

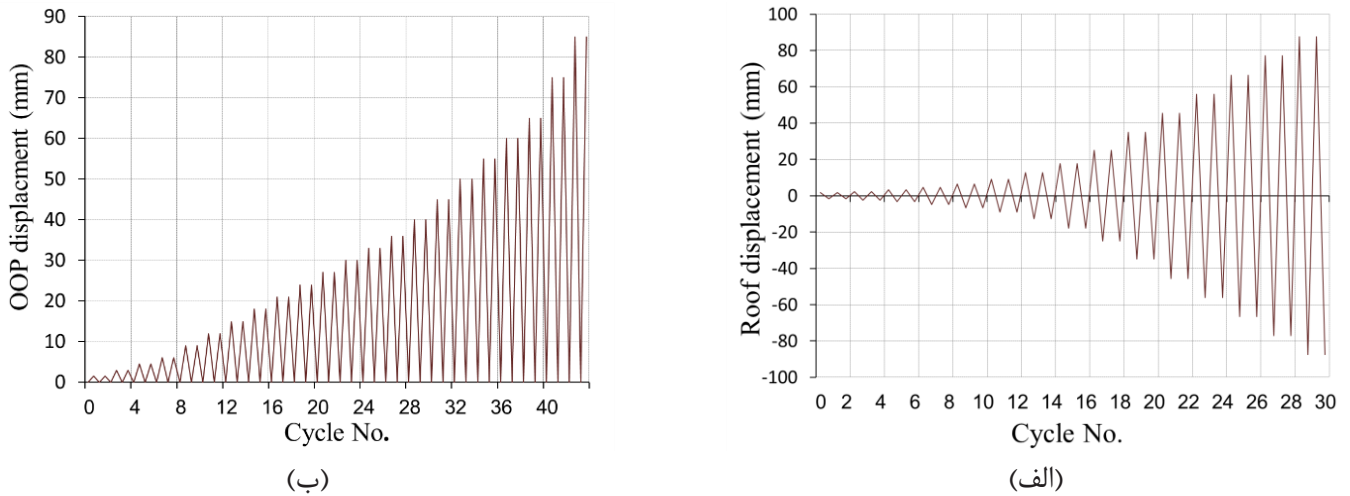
برای اتصال بلوک‌های AAC به یکدیگر بیشتر مقاومت چسبندگی چسب پلی‌اورتان برای اتصال بلوک‌های AAC به تسمه رابط است.

۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱

۳-۱-۱- برپایش آزمایشگاهی و ابزار دقیق

نحوه برپایش آزمایشگاهی شامل قاب واکنش، کف صلب، تجهیزات بارگذاری، جانمایی ابزار دقیق و قاب نمونه در شکل ۵ آمده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه مرکز تحقیقات مسکن، راه و شهرسازی ایران



شکل ۶. پروتکل بارگذاری: (الف) داخل صفحه (ب) خارج از صفحه

Fig. 6. Loading protocol: (a) In-plane; (b) Out-of-plane

بیرون آمدن خارج از صفحه میان قاب از قسمت وسط اتفاق افتاد. ابتداء ترکی قائم از نقطه مرکزی دیوار میان قاب به قسمت بالای دیوار میان قاب و حدود وسط طول دهانه آن و ترکی دیگر به صورت مورب از نقطه مرکزی دیوار میان قاب به گوشه سمت چپ پائین گسترش پیدا کردند. سپس با افزایش دامنه جابه‌جایی بارگذاری خارج از صفحه، الگوی شکست این ترک‌ها کامل شدند و ترک‌های مورب دیگری از حدود وسط میان قاب تا گوشه پائین و گوشه بالای سمت راست آن گسترش یافتند (شکل ۷-ب).

۳-۱-۳- نمونه CINF-0

در آزمایش نمونه CINF-0 (اتصال میان قاب به قاب با چسب پلی‌اورتان)، در جابه‌جایی ۲/۳ میلی‌متر (رانس نسبی طبقه ۰/۱۴٪) جداسدگی بین قاب و میان قاب (ترک مرزی) در گوشه فوقانی اتفاق افتاد. در جابه‌جایی ۹/۱ میلی‌متر (رانس نسبی طبقه ۰/۵۶٪) آثار جاری شدن قاب در بال خارجی ستون کم کم آشکار شد. این مود خرابی در قسمت پائین ستون‌ها در نزدیک اتصال ستون‌ها به تیر تحتانی اتفاق افتاد. از دیگر مودهای خرابی مشاهده شده، به وجود

استاندارد FEMA 461 [۳۸] تنظیم گردید (شکل ۶-الف). سرعت بارگذاری به قدری انتخاب شد که برای در نظر گرفتن بارگذاری شبه استاتیکی به اندازه کافی آهسته باشد. در دو نقطه تکیه‌گاه جانبی اجراء شد تا قاب را در برابر حرکات خارج از صفحه نگهداری کند.

برای بارگذاری خارج از صفحه، از بارگذاری چرخه‌ای یک جهته با جابه‌جایی کنترل شده توسط یک جک در نقطه مرکزی میان قاب استفاده شد. یک صفحه فولادی به ابعاد ۵۰۰×۳۰۰×۱۰ میلی‌متر در قسمت انتهائی جک نصب گردید تا نیروی اعمال شده توسط جک پخش گردد و از خرابی‌های موضعی جلوگیری شود. پروتکل بارگذاری خارج از صفحه مرکز دیوار مطابق با رویکرد به کار رفته توسط سایر محققان تنظیم گردید [۲۵] (شکل ۶-ب).

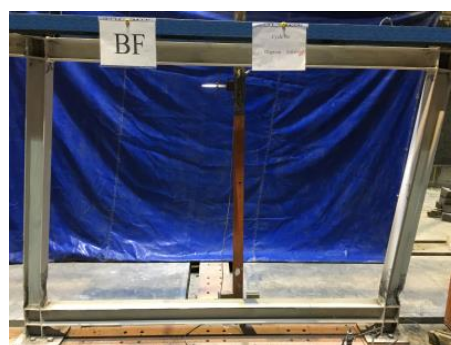
مقدار نیروی اعمال شده توسط جک‌های هیدرولیکی به وسیله Load Cell و جابه‌جایی متناظر با نیروی اعمال شده به وسیله سنسورهای LVDT اندازه‌گیری شد. داده‌ها و اطلاعات اندازه‌گیری شده در DATA LOGGER ذخیره گردید.

۳-۱-۲- نمونه WNPД

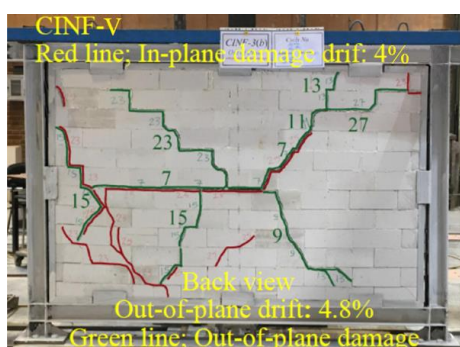
در آزمایش خارج از صفحه نمونه WNPД شکست میان قاب با



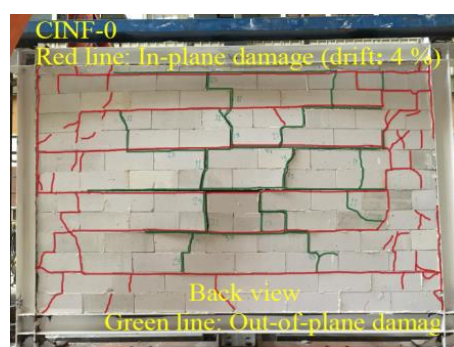
WNPB (ب)



BF (الف)



CINP-V (د)



CINP-0 (ج)

شکل ۷. خسارت داخل صفحه (خطوط قرمز) و خارج از صفحه (خطوط سبز) مشاهده شده در پایان آزمایش

Fig. 7. In-plane damage (red lines) and out-of-plane damage (green lines) observed at the end of the test

از ۰/۴۱ مگاپاسگال به ۰/۲۲ مگاپاسگال کاهش داد. در این نمونه بعد از رانش نسبی طبقه ۲/۲٪ میان قاب به شش نوار افقی قابل لغزش تقسیم شد. با تقسیم شدن میان قاب به عناصر افقی، شش نوار افقی در سیکل‌های رفت و برگشت بارگذاری در بستر بندهای افقی روی همدیگر لغزیدند. ترک قطری معنی‌دار در میان قاب مشاهده نشد.

در طول آزمایش خارج از صفحه نمونه CINP-0 (آسیب قبلی داخل صفحه، رانش نسبی طبقه ۰/۴٪) الگوی شکست غالب به صورت ترک‌های قائم و افقی بود که ترک‌های قائم در اثر بارگذاری خارج از صفحه دیوار میان قاب به وجود آمدند، و ترک‌های افقی عمدتاً به ترک‌های افقی رج‌های زوج که در بارگذاری داخل صفحه به وجود آمده بودند، منطبق شدند که با افزایش دامنه بارگذاری خارج از صفحه،

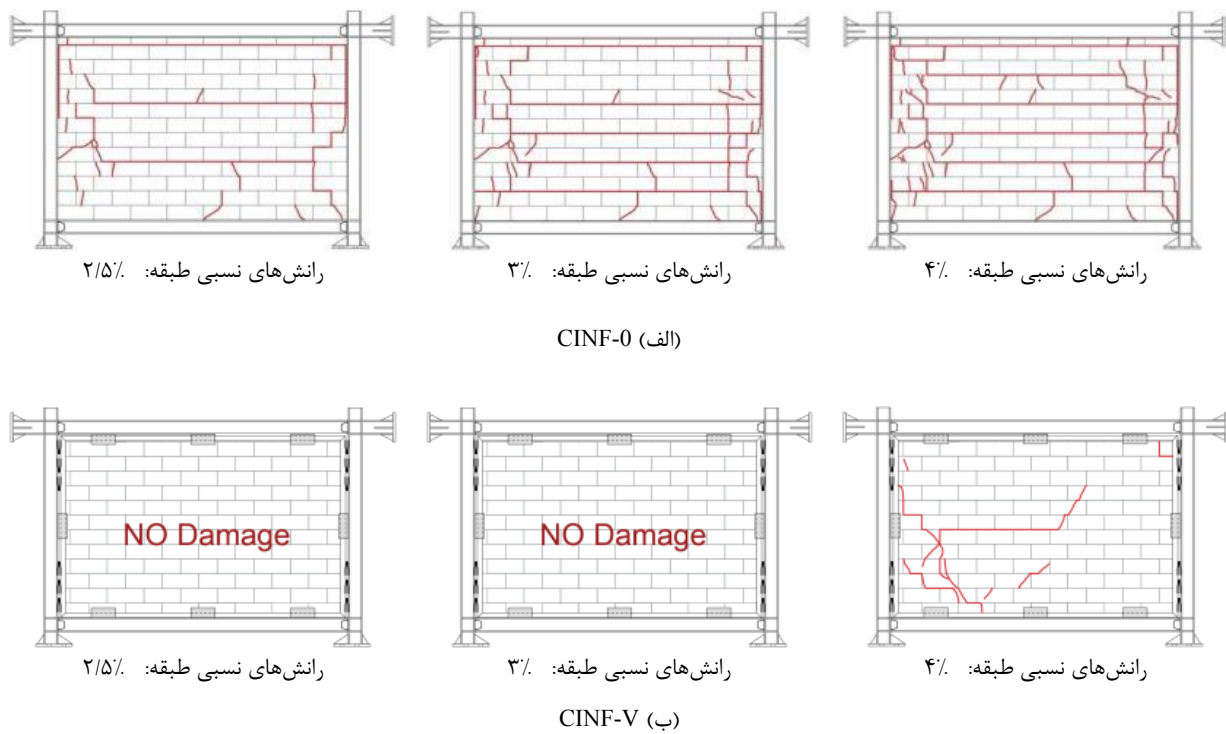
آمدن ترک‌های عمودی در جابه‌جایی ۹/۱ میلی‌متر (رانش نسبی طبقه ۰/۵۶٪) و جدا شدن بلوک‌ها از یکدیگر در بندهای قائم در جابه‌جایی ۱۷/۸ میلی‌متر (رانش نسبی طبقه ۱/۱٪) در محدوده ۳۰ سانتی متری از ستون بود (شکل ۷-ج).

با افزایش دامنه جابه‌جایی افقی، بلوک‌ها تمایل به لغزش در محل تماس با یکدیگر در رج‌های افقی در بخش بند بستر را داشتند (شکل ۷-ج). تمایل بلوک‌ها به لغزش در محل تماس با یکدیگر در بخش بندهای افقی دقیقاً در رج‌های زوج بود. در رج‌های زوج، برای اتصال بلوک‌های مجاور هم، از تسمه‌های فولادی نازک استفاده شده بود (شکل ۲). دلیل لغزش در این رج‌ها به این خاطر بود که قرار دادن تسمه‌های فولادی نازک در بند بستر افقی مقدار متوسط مقاومت برشی چسب پلی‌اورتان (f_{v0}) در محل اتصال (بند) بلوک‌های AAC را



شکل ۸. عملکرد اتصال دهنده های V شکل، (الف) گوشه کششی، (ب) گوشه فشاری میان قاب

Fig. 8. Performance of the V-shaped connectors: (a) tensile corners; (b) compressive corner of infill



شکل ۹. الگوی ترک خوردگی داخل صفحه میان قاب نمونه‌ها

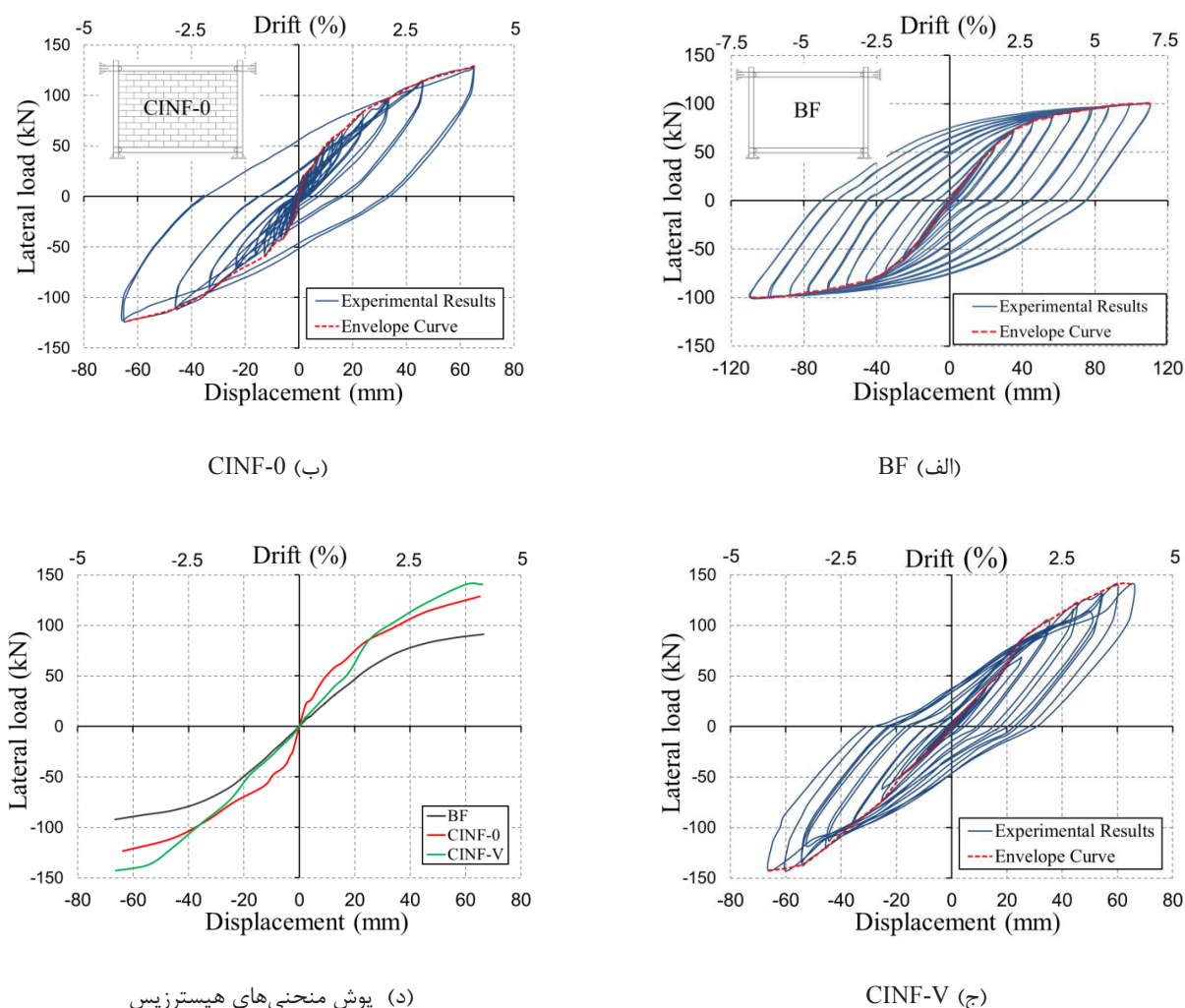
Fig. 9. In-plane cracking pattern of specimen infills

۳/۴٪) هیچ گونه خرابی در میان قاب مشاهده نشد. تنها خرابی ثبت شده تا رانش نسبی طبقه ۳/۴٪ در این نمونه خارج شدن بال ستون از حالت الاستیک در قسمت پائین ستون‌های قاب در جابه‌جایی ۹/۱ میلی‌متر (رانش نسبی طبقه ۰/۵۶٪) بود. تا جابه‌جایی ۴۵/۵ میلی‌متر (رانش نسبی طبقه ۲/۸٪) با اعمال جابه‌جایی افقی در تراز فوقانی قاب، اتصال دهنده‌های V شکل از طریق خم شدن (باز و بسته شدن) امکان

قسمت‌هایی از دیوار میان قاب از بند افقی رجهای زوج به سمت خارج از صفحه لغزیدند (شکل ۷-ج).

۳-۱-۴ نمونه CINF-V

در آزمایش نمونه CINF-V (اتصال میان قاب به قاب با استفاده از اتصال دهنده‌های V شکل)، تا جابه‌جایی ۵۵ میلی‌متر (رانش نسبی طبقه



شکل ۱۰. منحنی‌های هیستریزیس بار جانبی داخل صفحه - جابه‌جایی و پوش منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایش شده
Fig. 10. In-plane lateral load - displacement hysteresis curves and hysteresis envelope curves for the tested specimens

تقریباً ۴۵ درجه ظاهر شدند. رخداد دیگری که در جابه‌جایی در جابه‌جایی افقی ۶۵ میلی‌متر (رانس نسبی طبقه ۰.۴٪) مشاهده شد، لغزش بلوک‌ها در محل تماس با یکدیگر در بستر بندهای افقی در قسمتی از رج ششم بود. در رج‌های زوج، برای اتصال بلوک‌های مجاور هم، از تسمه‌های فولادی نازک استفاده شده بود (شکل ۲). در طول آزمایش عملکرد هیچ کدام از اتصال ادوات مختل نگردید و هیچ گونه خرابی در آن‌ها مشاهده نشد.

در طول آزمایش خارج از صفحه CINF-V، ابتداء در قسمت مرکزی میان قاب بخش بسیار اندکی از الگوی شکست خارج از صفحه میان قاب منطبق بر ترک‌های آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل

سر خوردن میان قاب را فراهم کردند، در نتیجه تغییر شکل خمشی ایجاد شده در قاب فولادی اثر نامطلوبی را روی میان قاب ایجاد نکرد (شکل ۸). در جابه‌جایی افقی ۵۵ میلی‌متر (رانس نسبی طبقه ۰.۳/۴٪) دو ترک مورب در محدوده یک سوم کناری میان قاب و در سمت اعمال بار شدند. این ترک‌های مورب از میان بلوک‌ها عبور کردند و زاویه انتشار آن‌ها ۴۰ و ۶۵ درجه و طول آن‌ها به ترتیب برابر ۵۷۰ و ۱۱۹۰ میلی‌متر بود (شکل ۷-د).

با افزایش دامنه جابه‌جایی افقی به ۶۵ میلی‌متر (رانس نسبی طبقه ۰.۴٪)، دو ترک قطری کششی در محدوده یک سوم میانی میان قاب در امتداد قطر فشاری به طول‌های ۵۱۰ و ۳۴۰ میلی‌متر با زاویه انتشار

جدول ۳. مقایسه نسبت مقاومت داخل صفحه نمونه CINF-V به نمونه BF و CINF-0

Table 3. Comparison of the ratio of in-plane strength of the specimen CINF-V to that of BF and CINF-0

نمونه	جهت بارگذاری	رانش نسبی طبقه ۰/۸٪			رانش نسبی طبقه ۲/۵٪			رانش نسبی طبقه ۳/۵٪				
		نسبت	P(kN)	(الف)	(ب)	نسبت	P(kN)	(الف)	(ب)	نسبت	P(kN)	(الف)
BF	میانگین	۳۱/۴	۱	۰/۵۳	۷۸/۳	۱	۰/۷۶	۸۷/۹	۱	۰/۷۴		
	+	۵۸/۸			۱۰۴/۶			۱۲۰/۲				
CINF-0	-	۵۸/۹	۱/۸۷	۱	۱۰۱/۹	۱/۳۲	۱	۱۱۷/۰	۱/۳۵	۱		
	میانگین	۵۸/۸۵			۱۰۳/۲			۱۱۸/۶				
CINF-V	+	۳۹/۹			۹۷/۸			۱۲۳/۷				
	-	۳۷/۲	۱/۲۳	۰/۶۶	۹۷/۱	۱/۲۴	۰/۹۴	۱۲۲/۶	۱/۴	۱/۰۴		
	میانگین	۳۸/۶			۹۷/۵			۱۲۳/۲				

که نوع اتصال دیوار میان قاب به قاب در نمونه‌ها متفاوت بود. به منظور به دست آوردن نقاط مشخص از منحنی‌های پوش هیستریزس برای ارزیابی کمی مقاومت نمونه‌ها، در سه نقطه خاص از منحنی‌های پوش، متناظر با رانش‌های نسبی طبقه ۰/۸٪، ۲/۵٪ و ۳/۵٪، نسبت مقاومت نمونه‌ها به مقاومت قاب خالی BF و نمونه CINF-0 در همان سطح از رانش نسبی طبقه محاسبه گردید. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. هدف از این کار بررسی این موضوع است که تا چه اندازه میان قاب و نوع اتصال آن به قاب توانسته‌اند در افزایش مقاومت قاب میان‌پر در سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و بعد، تأثیر مثبت داشته باشند. افزایش مقاومت قاب میان‌پر از اثرات مثبت حضور میان‌قاب‌ها در قاب‌های میان‌پر است به شرطی که اندرکنش قاب و میان‌قاب منجر به گسترش خسارت در میان‌قاب و قاب نگردد.

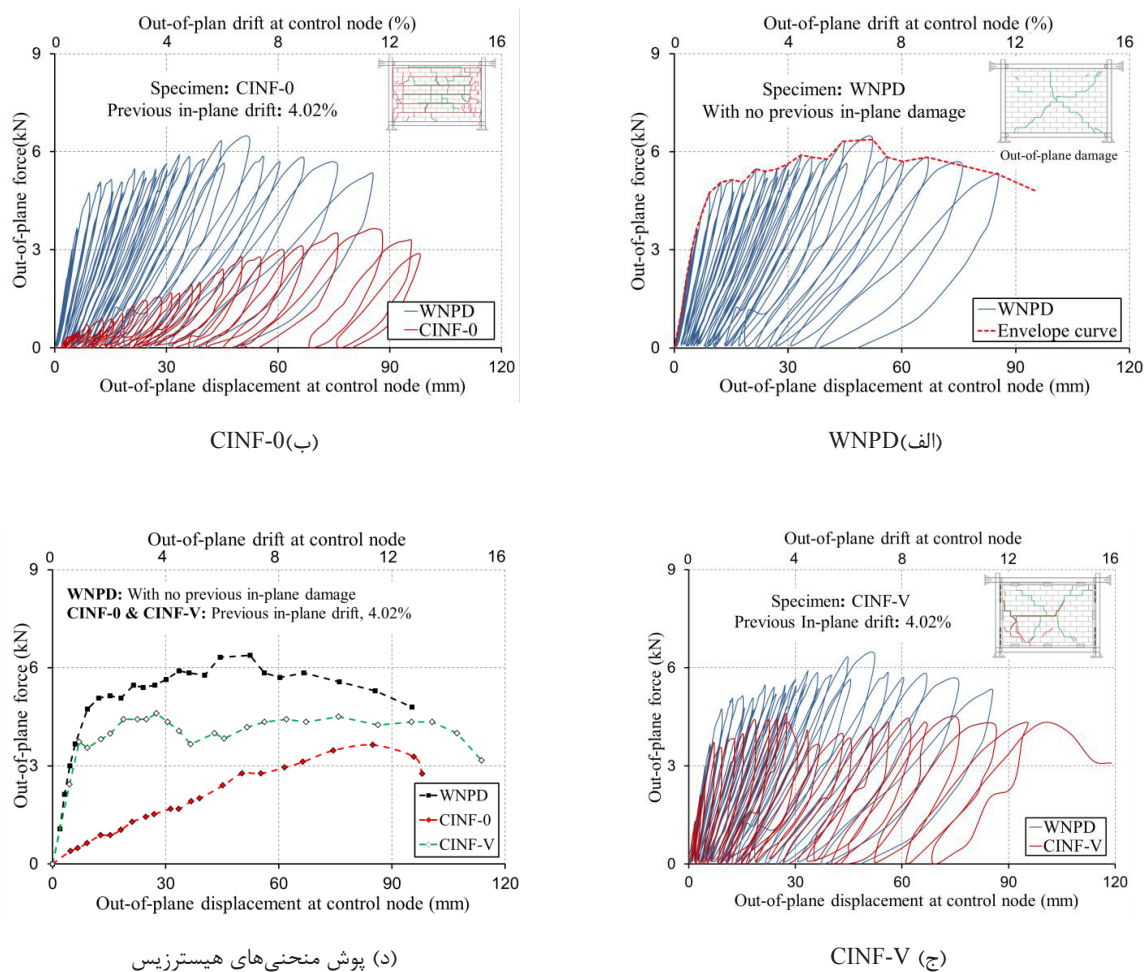
از نتایج جدول ۳ مشهود است که نمونه CINF-0 در رانش نسبی طبقه ۰/۸٪ با ۸۷٪ افزایش، بیشترین افزایش مقاومت را نسبت به قاب خالی BF دارد. این افزایش مقاومت در رانش نسبی طبقه ۲/۵٪ به علت گسترش خسارت در میان‌قاب به ۳۲٪ رسید. افزایش مقاومت نمونه CINF-0 با توجه به شدت خسارت‌های ایجاد شده در میان‌قاب این نمونه، قابل بهره برداری در سطوح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO) و ایمنی جانی (LS) [۳۹] به هنگام وقوع زلزله نخواهد بود (شکل ۷-ج). نمونه CINF-V در رانش نسبی طبقه ۰/۸٪ به مقدار ۲۳٪ مقاومت

صفحه بود که با افزایش دامنه جابه‌جایی خارج از صفحه ترک‌های جدید شکل گرفتند و الگو شکست میان‌قاب کامل گشت. گسترش ترک‌های ناشی از بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب، از قسمت مرکزی میان‌قاب به سمت گوشه‌ها بود (شکل ۷-د).

نحوه گسترش خسارت و الگوی ترک خوردگی میان‌قاب نمونه‌ها برای رانش‌های نسبی طبقه ۰/۸٪، ۲/۵٪، ۳٪ و ۴٪ بر اساس نتایج ثبت شده در طول آزمایش‌ها در شکل ۹ رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد اتصال دهنده‌های V شکل توانسته‌اند اثر مضر اندرکنش قاب-میان‌قاب را در نمونه CINF-V کاهش دهند، از گسترش خسارت در میان‌قاب این نمونه جلوگیری نمایند و الگوی شکست داخل صفحه میان‌قاب آن را نسبت به نمونه CINF-0 تغییر دهند. تغییر الگوی شکست در این نمونه در جهت بهبود رفتار تعاملی میان‌قاب با قاب بود.

۳-۲- رفتار هیستریزس، پوش منحنی چرخه‌ای و مقاومت

منحنی‌های هیستریزس بار جانبی داخل صفحه-جابه‌جایی نمونه‌ها و پوش منحنی‌های هیستریزس آن‌ها در مقایسه با قاب خالی BF در شکل ۱۰ آمده است. منحنی‌ها حاکی از آن است که در حالت کلی حضور میان‌قاب‌ها در قاب‌ها باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. ولی روند افزایش مقاومت و مقدار آن برای رانش‌های نسبی طبقه یکسان در نمونه‌ها متفاوت است. علت این موضوع بیشتر به این خاطر است



شکل ۱۱. منحنی‌های هیستریزیس بار-جاب‌جایی خارج از صفحه و پوش منحنی‌های هیستریزیس نمونه‌های آزمایش شده
Fig. 11. Out-of-plane load-displacement hysteresis curves and hysteresis envelope curves for the tested specimens

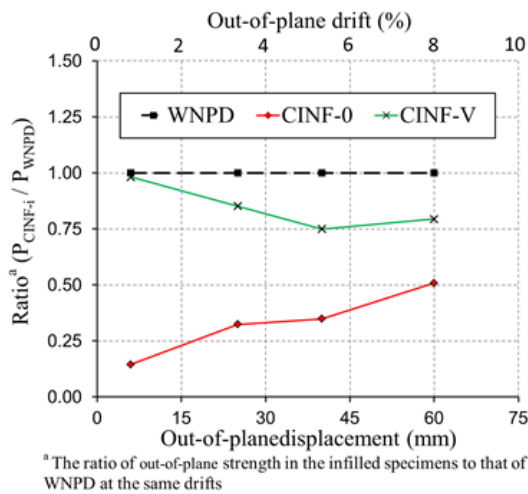
صفحه دیوار میان‌قاب تعریف شده است. پوش منحنی‌های هیستریزیس نمونه CINP-0 نشان می‌دهد بار خارج از صفحه این نمونه با افزایش دامنه جابه‌جایی در نقطه مرکزی میان‌قاب تا جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه مرکزی دیوار میان‌قاب برابر ۸۵ میلی‌متر با شیب ملایم افزایش یافته و به یک نقطه ماکزیمم می‌رسد، از این نقطه به بعد مقاومت خارج از صفحه دیوار میان‌قاب کاهش می‌یابد. در آزمایش خارج از صفحه نمونه CINP-0 حداکثر بار خارج از صفحه برای این نمونه برابر ۳/۶۴ کیلونیوتن ثبت شد. پوش منحنی‌های هیستریزیس نمونه CINP-V حاکی از آن است که حداکثر بار خارج از صفحه در این نمونه در جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه مرکزی دیوار میان‌قاب برابر ۲۷ میلی‌متر (رانش نسبی خارج از صفحه نظیر این جابه‌جایی برابر ۰/۳۶٪) ثبت شده است و مقدار آن برابر ۴/۷۰ کیلونیوتن می‌باشد. از جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه

قاب میان‌پر را نسبت به قاب خالی BF افزایش داد. روند افزایش مقاومت این نمونه با افزایش دامنه جابه‌جایی ادامه یافت به طوری که تا رانش نسبی طبقه ۳/۴٪ با سالم ماندن میان‌قاب، مقدار افزایش مقاومت این نمونه نسبت به قاب خالی BF به ۴۰٪ رسید. منحنی‌های هیستریزیس بار-جاب‌جایی خارج از صفحه نمونه‌ها و پوش منحنی‌های هیستریزیس آن‌ها در مقایسه با نمونه بدون آسیب قبلی WNPDP در شکل ۱۱ آمده است. پوش منحنی‌های هیستریزیس نمونه WNPDP نشان می‌دهد، حداکثر بار خارج از صفحه این نمونه در مقدار جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه مرکزی دیوار میان‌قاب برابر ۵۰ میلی‌متر (رانش نسبی خارج از صفحه نظیر این جابه‌جایی برابر ۰/۶۷٪) ثبت شده است و مقدار آن برابر ۶/۲۶ کیلونیوتن می‌باشد. در آزمایش‌های خارج از صفحه، جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه مرکزی میان‌قاب تقسیم بر نصف ارتفاع آن به عنوان رانش نسبی خارج از

جدول ۴. مقایسه نسبت مقاومت خارج از صفحه نمونه‌ها به نمونه WNPД

Table 4. Comparison of the ratio of out-of-plane strength of the specimens to that of WNPД

نمونه	رانش نسبی ۰/۸٪		رانش نسبی ۵/۳٪		رانش نسبی ۳/۳٪		رانش نسبی ۰/۸٪	
	نسبت	P(kN)	نسبت	P(kN)	نسبت	P(kN)	نسبت	P(kN)
WNPД	۱	۵/۶۰	۱	۵/۶۰	۱	۵/۴۰	۱	۳/۸۰
CINF-0	۰/۵۱	۲/۸۵	۰/۳۵	۱/۹۵	۰/۳۲	۱/۷۵	۰/۱۴	۰/۵۵
CINF-V	۰/۷۹	۴/۴۵	۰/۷۵	۴/۲۰	۰/۸۵	۴/۶۰	۰/۹۸	۳/۷۳



شکل ۱۲. نسبت مقاومت خارج از صفحه نمونه‌ها به نمونه WNPД (نمونه بدون آسیب قبلی)

Fig. 12. The ratio of out-of-plane strength of the specimens to WNPД (with no previous damage)

WNPД، به طور متوسط ۷۳٪ و ۱۴٪ کاهش داده است. این کاهش مقاومت تا رانش نسبی خارج از صفحه برابر ۵/۳٪ است. به طور کلی آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه، باعث کاهش مقاومت خارج از صفحه نمونه‌ها در رانش‌های نسبی یکسان شده است. اما کمترین کاهش مقاومت خارج از صفحه، مربوط به نمونه CINF-V است. در این نمونه، عملکرد اتصال دهنده‌های □ شکل، باعث بهبود رفتار خارج از صفحه میان‌قاب آن شده‌اند.

۳-۳- زوال سختی

منحنی زوال سختی نمونه‌ها در مقایسه با قاب خالی به ازای جابه‌جایی تراز فوقانی ستون در شکل ۱۳ ارائه شده است. برای توصیف زوال سختی، ضریب زوال سختی K_j به صورت ذیل تعریف می‌شود [۲۴].

مرکزی دیوار میان‌قاب برابر ۲۷ میلی‌متر تا ۳۶ میلی‌متر مقاومت خارج از صفحه دیوار میان‌قاب کاهش یافته است. بعد از جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه مرکزی دیوار میان‌قاب برابر ۳۶ میلی‌متر تا ۷۵ میلی‌متر، مقدار بار خارج از صفحه در نقطه مرکزی دیوار میان‌قاب با یک شیب ملایمی افزایش یافته و به مقدار حداکثری دوم برابر ۵/۴ کیلونیوتن رسیده است.

نسبت مقاومت خارج از صفحه نمونه‌ها به مقاومت خارج از صفحه نمونه بدون آسیب قبلی WNPД در جابه‌جایی خارج از صفحه نقطه مرکزی میان‌قاب برابر ۶، ۲۵، ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر در جدول ۴ و شکل ۱۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهند آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه تا رانش نسبی طبقه ۰/۴٪، مقاومت خارج از صفحه نمونه‌های CINF-V، CINF-0 را نسبت به نمونه بدون آسیب قبلی

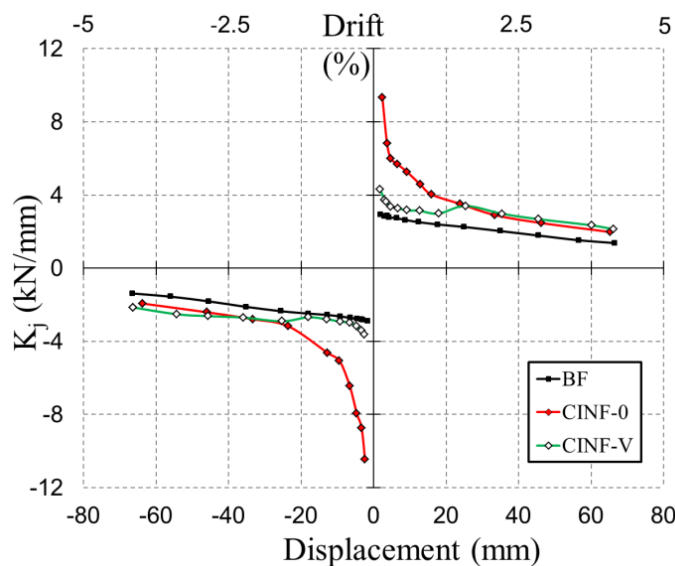


Fig. 13. Stiffness degradation curves for the tested specimens

شکل ۱۳. منحنی‌های زوال سختی نمونه‌های آزمایش شده

جدول ۵. مقایسه نسبت زوال سختی نمونه‌ها به سختی اولیه قاب خالی

Table 5. Comparison of the ratio of stiffness degradation of the specimens to the initial stiffness of BF

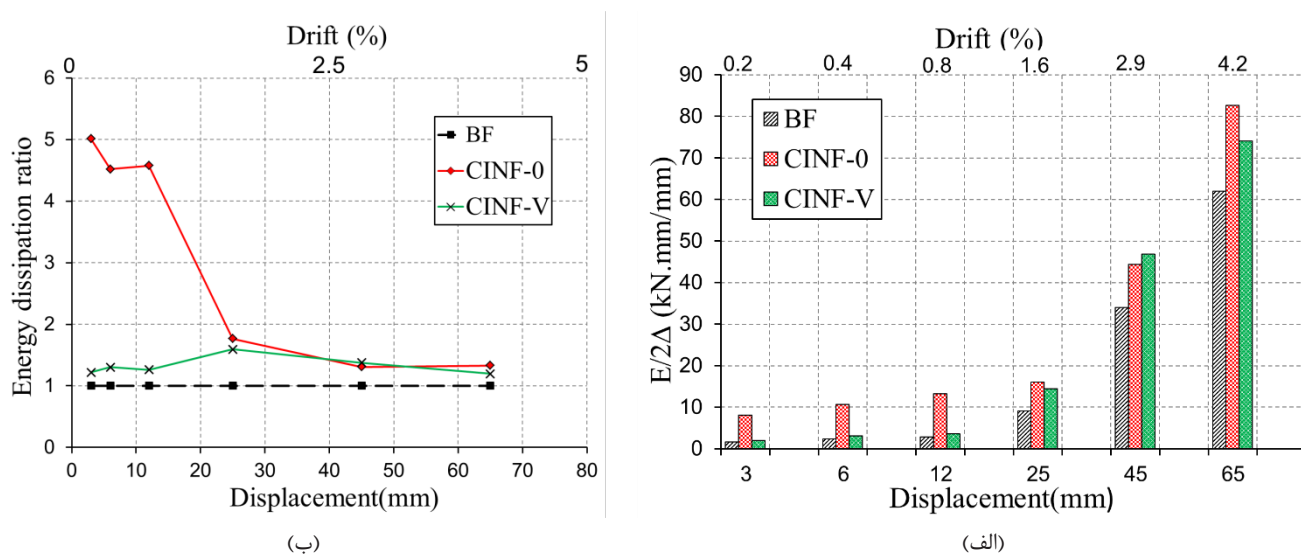
رانش نسبی ۴/۵ %		رانش نسبی ۲/۵ %		رانش نسبی ۰/۸ %		K_{ini}		جهت بارگذاری	نمونه
نسبت	K_j (kN/mm)	نسبت	K_j (kN/mm)	نسبت	K_j (kN/mm)	نسبت	K_{ini} (kN/mm)		
۰/۵۹	۱/۶۷	۰/۷۴	۲/۰۹	۰/۹۲	۲/۶۲	۱	۲/۸۴	میانگین	BF
	۲/۲۹		۲/۷۹		۴/۹۰		۶/۰۱	+	
۰/۸۰	۲/۲۳	۰/۹۷	۲/۷۲	۱/۷۲	۴/۹۱	۳/۰۲	۶/۴۴	-	CINF-0
	۲/۲۶		۲/۷۵		۴/۹۰		۶/۲۳	میانگین	
	۲/۳۶		۲/۶۱		۳/۳۳		۳/۳۷	+	
۰/۸۳	۲/۳۴	۰/۹۴	۲/۵۹	۱/۱۳	۳/۱۰	۱/۱۵	۳/۱۹	-	CINF-V
	۲/۳۵		۲/۶۰		۳/۲۱		۳/۲۸	میانگین	

انتهای ستون برابر j است. n تعداد چرخه‌های بارگذاری برای هر مرحله بارگذاری است.

به منظور ارزیابی کمی تأثیر نوع اتصال میان قاب به قاب در افزایش سختی نمونه‌ها و زوال سختی آن‌ها در روند فزاینده دامنه جا به جایی، سه نقطه خاص در منحنی‌های فاکتور زوال سختی که متناظر با رانش‌های

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n P_j^i}{\sum_{i=1}^n u_j^i} \quad (1)$$

که در آن P_j^i و u_j^i به ترتیب حداکثر بار جانبی و جابه‌جایی متناظر با آن در چرخه بارگذاری i -ام در هنگامی می‌باشند که جابه‌جایی



شکل ۱۴. ظرفیت استهلاک انرژی نمونه‌ها، الف) انرژی مستهلاک شده نمونه‌ها در تغییر مکان‌های معین که بر حسب دو برابر تغییر مکان حداکثر هر دامنه جابه‌جایی نرمال شده‌اند، ب) نسبت انرژی مستهلاک شده نمونه‌ها به قاب خالی

Fig. 14. Energy-dissipating capacity of the specimens: (a) Dissipated hysteretic energy of the specimens at certain displacements normalized by the peak-to-peak displacement (2Δ); (b) The ratio of the dissipated energy of the specimens to BF

نشان می‌دهند، افزایش سختی اولیه نمونه CINF-V نسبت به سختی اولیه قاب خالی ۱۵٪ است، در حالی که سختی اولیه نمونه CINF-0، ۳/۰۲ برابر سختی اولیه نمونه قاب خالی BF است و نسبت سختی نمونه CINF-V به سختی قاب خالی BF در رانش نسبی طبقه ۲/۵٪ برابر ۰/۹۴ است. به عبارت دیگر در این نمونه علاوه بر آن که افزایش سختی اولیه محسوس نیست بلکه زوال سختی قاب با سالم ماندن میان قاب در رانش نسبی معادل سطح عملکرد LS (رانش نسبی طبقه ۲/۵٪) جبران شده است.

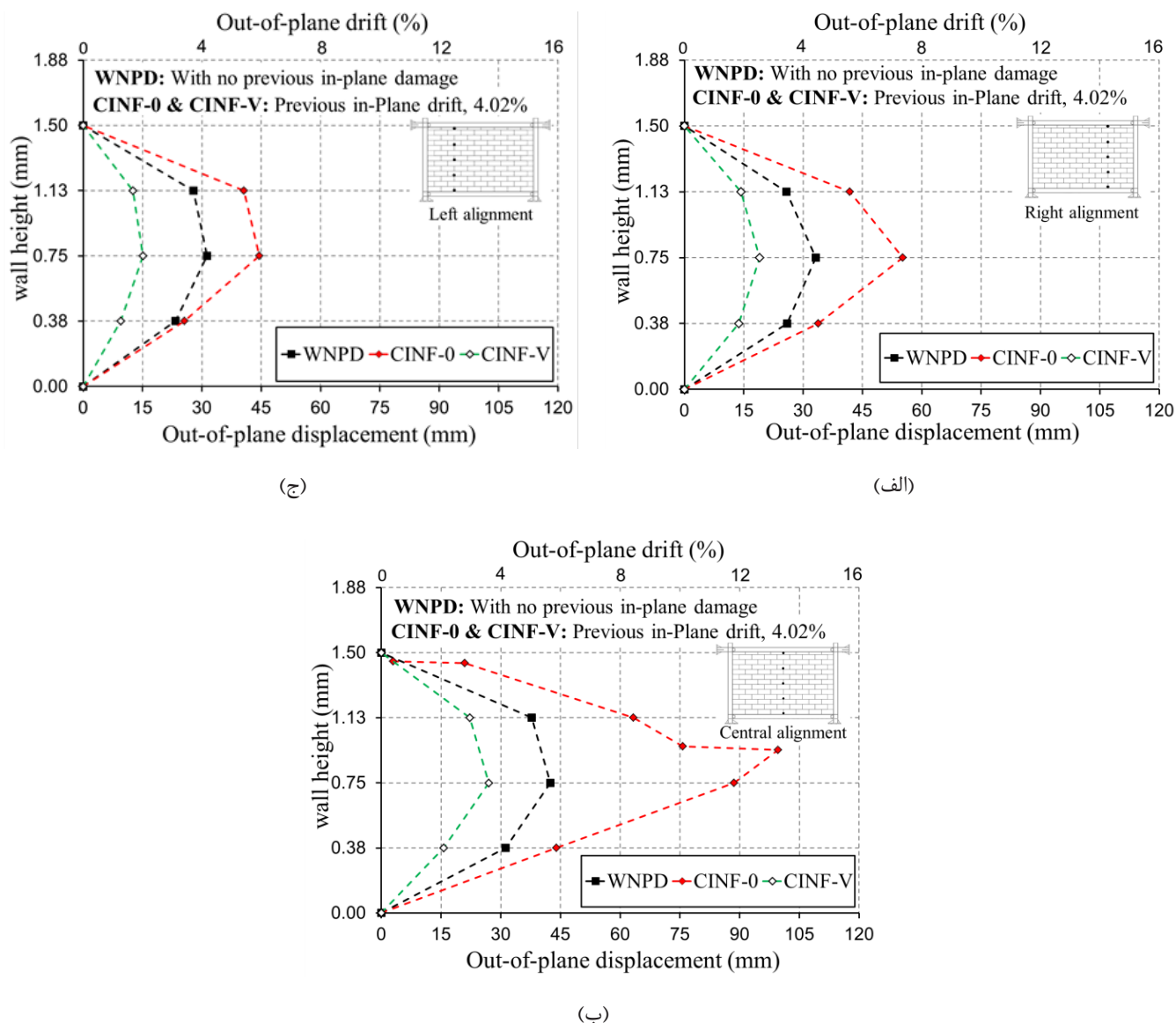
۳-۴- ظرفیت استهلاک انرژی

اکثر سازه‌ها می‌توانند به وسیله تغییر شکل کلی، آسیب موضعی و غیره انرژی را تحت عمل لرزه‌ای مستهلاک نمایند. استهلاک انرژی در یک سازه زمانی جذاب خواهد بود که این استهلاک توأم با حداقل آسیب در سازه باشد. ظرفیت استهلاک انرژی را می‌توان از مساحت محصور توسط حلقه‌های هیستریزس بار-جابه‌جایی در هر چرخه برآورد کرد. به منظور مقایسه توانایی استهلاک انرژی نمونه‌های مختلف در هر سطح جابه‌جایی، رویکرد به کار رفته توسط سایر

نسبی ۰/۸٪، ۲/۵٪ و ۳/۵٪ هستند، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج این بررسی در جدول ۵ آمده است. در این جدول سختی اولیه نمونه‌ها و نسبت فاکتور زوال سختی نمونه‌ها در هر رانش نسبی به سختی اولیه نمونه قاب خالی BF محاسبه گردیده است.

در بحث سختی قاب‌های میان‌پر دو نکته حائز اهمیت است: ۱- افزایش سختی قاب‌ها که توسط میان‌قاب‌ها پر شده‌اند، ۲- زوال سختی این قاب‌ها با افزایش دامنه جابه‌جایی در بارگذاری چرخه‌ای است. افزایش سختی قاب‌های میان‌پر، باعث می‌شود: الف) سهم آن‌ها از نیروهای ناشی از زلزله بیشتر شود، در صورتی که این قاب‌ها و میان‌قاب‌هایشان برای چنین نیروهایی طراحی نشده باشند، ممکن است تخریب شوند. ب) توزیع سختی در پلان و ارتفاع سازه تغییر یابد. پیچش در ساختمان به علت توزیع غیر یکنواخت و نامنظم سختی در پلان ایجاد می‌شود. طبقه نرم، ناشی از توزیع نامنظم سختی در ارتفاع سازه است. زوال سختی قاب‌ها با افزایش دامنه جابه‌جایی در بارهای لرزه‌ای باعث تشدید جابه‌جایی کل سازه شده و منجر به ناپایداری آن می‌شود.

منحنی‌های زوال سختی نمونه‌ها در شکل ۱۴ و نتایج جدول ۵



شکل ۱۵. پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه میان قاب نمونه‌ها در مقایسه با نمونه بدون آسیب قبلی WNPД در سه بخش مختلف (الف) سمت راست، (ب) مرکز و (ج) سمت چپ

Fig. 15. Comparison of out-of-plane displacement of specimen frames with WNPД in three different sections (a) Right side; (b) Center and (c) Left side

با سایر نمونه‌های آزمایش شده در شکل ۱۴ تا رانش نسبی طبقه ۲/۵٪ مشهود است. منطقه محصور شده توسط حلقه‌های پسماند (هیستریزیس) از منحنی پاسخ یا پوش منحنی‌ها که معمولاً به عنوان نماینده ظرفیت جذب انرژی در نظر گرفته می‌شود، به عنوان یک پارامتر قابل توجه به نمایندگی از سایر پارامترها برای مقاومت در برابر زلزله قاب‌های میان‌پر لازم هست ولی کافی نمی‌باشد. چون چنین

محققان مورد استفاده قرار گرفت [۴۰]. انرژی مستهلک شده نمونه‌ها در مقایسه با قاب خالی BF، در تغییر مکان‌های معین که بر حسب دو برابر تغییر مکان حداکثر هر دامنه جابه‌جایی نرمال شده‌اند در شکل ۱۴- الف و نسبت انرژی مستهلک شده نمونه‌ها به قاب خالی BF نیز در شکل ۱۴- ب نشان داده شده است. ظرفیت بالای استهلاک انرژی نمونه CINF-0 در مقایسه

۴- نتیجه گیری

به عنوان مهم‌ترین یافته این تحقیق می‌توان گفت ارائه اتصال دهنده مناسب و قابل اعتماد برای اتصال دیوار میان‌قاب به قاب، یک اقدام ساختمانی منطقی در راستای پیشگیری از تأثیرات نامطلوب اثر اندرکنش قاب و میان‌قاب و به کارگیری اثرات مثبت آن در قاب‌های میان‌پر است. بر اساس نتایج تجربی اتصال دهنده V شکل رفتار تعاملی خوب و قابل اطمینانی را از نظر ایمنی از خود نشان داد. نتایج آزمایش‌های داخل صفحه نشان دادند، با داشتن چنین اتصال دهنده‌ای با سالم ماندن میان‌قاب تا رانش نسبی معادل سطح عملکرد ایمنی جانی (رانش نسبی طبقه ۲/۵٪) [۳۹] مقاومت قاب میان‌پر افزایش می‌یابد. همچنین از نتایج به کارگیری اتصال دهنده V شکل عملکرد دو سطحی میان‌قاب است که به وسیله آن زوال سختی و کاهش مقاومت قاب بعد از رانش نسبی ۲/۵٪ جبران می‌شود.

نتایج آزمایش‌های خارج از صفحه تأثیر مثبت اتصال دهنده V شکل را در حفظ انسجام و پایداری خارج از صفحه میان‌قابی را که ابتداء تا رانش نسبی طبقه ۴٪ در داخل صفحه به صورت چرخه‌ای بارگذاری شده بود و سپس تحت بارگذاری چرخه‌ای خارج از صفحه قرار گرفت، به خوبی نشان داد. این اتصال دهنده میزان خسارت ناشی از بارگذاری داخل صفحه در میان‌قاب را کاهش داد همچنین موجب تغییر در الگوی شکست داخل صفحه میان‌قاب گردید. در نتیجه میزان انطباق الگوی شکست خارج از صفحه به شکست داخل صفحه به حداقل مقدار خود رسید و این موضوع باعث بهبود رفتار خارج از صفحه میان‌قاب گردید. بنابراین اتصال دهنده V شکل را می‌توان به عنوان یک اتصال دهنده قابل اعتماد و کارآمد بین دیوار میان‌قاب و قاب استفاده کرد.

منابع

- [1] S. Polyakov, On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall, *Translations in earthquake engineering*, 2(3) (1960) 36-42.
- [2] B. Stafford Smith, C. Carter, A method of analysis for infilled frames, *Proceedings of the institution of civil engineers*, 44(1) (1969) 31-48.
- [3] M. Holmes, Steel frames with brickwork and concrete infilling, *proceedings of the Institution of civil Engineers*, 19(4) (1961) 473-478.

حلقه‌هایی در منحنی هیستریزیس قاب‌های میان‌پر می‌تواند مشخصه سیستم‌های باشد که دیوار میان‌قاب آن‌ها در معرض ترک خوردگی قرار گرفته‌اند. در بحث قاب‌های میان‌پر، به منظور امنیت فضاها و محیط ساخته شده، سیستم‌های که توانایی جذب انرژی بیشتر بدون گسترش خسارت در میان‌قاب را دارند، مقبولیت دارد.

بنابراین ظرفیت بالای استهلاک انرژی قاب میان‌پر برای مستهلک کردن انرژی ناشی از وقوع زمین لرزه زمانی کارایی مناسب خواهد داشت که میان‌قاب دچار خسارت نشود. هر چند نمونه‌های CINF-0 ظرفیت استهلاک انرژی بالایی داشتند ولی در طول آزمایش تا رانش نسبی طبقه ۲/۵٪ به شدت خسارت دیدند، (شکل ۷-ج). توانایی بیشتر استهلاک انرژی نمونه CINF-V در مقایسه با نمونه قاب خالی BF از نتایج قابل توجه در شکل ۱۴ است. این در حالی است که در میان‌قاب نمونه CINF-V تا رانش نسبی طبقه ۳/۴٪ هیچ‌گونه خسارتی ثبت نشد.

۳-۵- پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه

جابه‌جایی خارج از صفحه دیوار میان‌قاب در طول آزمایش برای تمام نمونه‌ها در سه بخش مختلف (الف) سمت چپ، (ب) مرکز و (ج) سمت راست و در پنج ارتفاع مختلف ($h_1=0m$, $h_2=1/4h_{wall}$, $h_3=1/2h_{wall}$, $h_4=h_{wall}$, $h_5=3/4h_{wall}$) که در آن h_{wall} ارتفاع دیوار است) اندازه‌گیری شدند. شکل ۱۵ پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه میان‌قاب نمونه‌ها را در مقایسه با پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه نمونه بدون آسیب قبلی WNPD در سه بخش مختلف (الف) سمت چپ، (ب) مرکز و (ج) سمت راست، به هنگام اعمال حداکثر بار خارج از صفحه در نقطه مرکزی میان‌قاب، نشان می‌دهد.

پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه میان‌قاب نمونه‌ها را در مقایسه با پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه نمونه بدون آسیب قبلی WNPD نشان می‌دهد نمودار پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه نمونه CINF-V موقع اعمال حداکثر بار خارج از صفحه در نقطه مرکزی میان‌قاب، با نمودار پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه نمونه WNPD (نمونه بدون آسیب قبلی) از نظر ظاهری شبیه است و هیچ‌گونه ناپیوستگی در نمودار پروفیل جابه‌جایی خارج از صفحه این نمونه که بیانگر از بین رفتن انسجام و پایداری خارج از صفحه دیوار میان‌قاب آن، به علت آسیب قبلی ناشی از بارگذاری داخل صفحه باشد، وجود ندارد.

- Structures, 105 (2015) 197-208.
- [16] H. Moghaddam, Lateral load behavior of masonry infilled steel frames with repair and retrofit, *Journal of structural engineering*, 130(1) (2004) 56-63.
- [17] K.M. Amanat, M.M. Alam, M.S. Alam, Experimental investigation of the use of ferrocement laminates for repairing masonry in filled RC frames, *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 35(2) (2007) 71-80.
- [18] M. Mohammadi, R.M.G. Mahalleh, A new infilled steel frame with engineering properties, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 165(1) (2012) 15-25.
- [19] D. Markulak, I. Radić, V. Sigmund, Cyclic testing of single bay steel frames with various types of masonry infill, *Engineering structures*, 51 (2013) 267-277.
- [20] P. Morandi, R. Milanesi, G. Magenes, Innovative solution for seismic-resistant masonry infills with sliding joints: in-plane experimental performance, *Engineering Structures*, 176 (2018) 719-733.
- [21] R.-S. Ju, H.-J. Lee, C.-C. Chen, C.-C. Tao, Experimental study on separating reinforced concrete infill walls from steel moment frames, *Journal of Constructional Steel Research*, 71 (2012) 119-128.
- [22] S.J. Hashemi, J. Razzaghi, A.S. Moghadam, Behaviour of sandwich panel infilled steel frames with different interface conditions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 171(2) (2018) 166-177.
- [23] S. Schwarz, A. Hanaor, D. Yankelevsky, Experimental response of reinforced concrete frames with AAC masonry infill walls to in-plane cyclic loading, in: *Structures*, Elsevier, 2015, pp. 306-319.
- [24] J. Wang, B. Li, Cyclic testing of square CFST frames with ALC panel or block walls, *Journal of Constructional Steel Research*, 130 (2017) 264-279.
- [25] 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.
- [26] P. Ricci, M. Di Domenico, G.M. Verderame, [4] H. Barua, S. Mallick, Behaviour of mortar infilled steel frames under lateral load, *Building and Environment*, 12(4) (1977) 263-272.
- [5] J. Dawe, C. Seah, Y. Liu, A computer model for predicting infilled frame behaviour, *Canadian Journal of civil engineering*, 28(1) (2001) 133-148.
- [6] T. Liauw, C. Lo, On Multibay Infilled Frames, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 85(3) (1988) 469-483.
- [7] B.S. Smith, Model test results of vertical and horizontal loading of infilled frames, in: *Journal Proceedings*, 1968, pp. 618-625.
- [8] J. Dawe, Y. Liu, C. Seah, A parametric study of masonry infilled steel frames, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(1) (2001) 149-157.
- [9] H. Elshafie, A. Hamid, E.-s. Nasr, Strength and stiffness of masonry shear walls with openings, *The Masonry Society Journal*, 20(1) (2002) 49-60.
- [10] A. Tasnimi, A. Mohebkah, Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches, *Engineering Structures*, 33(3) (2011) 968-980.
- [11] M. Kaltakçı, A. Köken, H. Korkmaz, Analytical solutions using the equivalent strut tie method of infilled steel frames and experimental verification, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(5) (2006) 632-638.
- [12] M. RJ, On the stiffness and strengths of infilled frame, *Proceedings Institution of Civil Engineers, Supplement IV*, (1971) 57-90.
- [13] M.L. Albert, A.E. Elwi, J.R. Cheng, Strengthening of unreinforced masonry walls using FRPs, *Journal of Composites for Construction*, 5(2) (2001) 76-84.
- [14] S. Altın, Ö. Anıl, Y. Koprman, Ç. Belgin, Strengthening masonry infill walls with reinforced plaster, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 163(5) (2010) 331-342.
- [15] A. Dehghani, F. Nateghi-Alahi, G. Fischer, Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames, *Engineering*

- [33] ASTM, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, in: (ASTM A 370-11), West Conshohocken, PA, US 2011.
- [34] ASTM, Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Wall Construction Units, in: ASTM C 1386-07, West Conshohocken, PA, US 2009.
- [35] ASTM, Standard Test Methods for Compressive Strength of Masonry Prisms, in: ASTM C 1314-07, West Conshohocken, PA, US 2009.
- [36] ASTM, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages, in: ASTM E519/E519M-10, West Conshohocken, PA, US 2009.
- [37] E. DIN, 1052-3: 2002-10: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength, in, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [38] A.T. Council, M.-A.E. Center, M.C.f.E.E. Research, P.E.E.R. Center, N.E.H.R. Program, Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components, Federal Emergency Management Agency, 2007.
- [39] FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, ASCE, 2000.
- [40] S.J. Hashemi, J. Razzaghi, A.S. Moghadam, P.B. Lourenço, Cyclic testing of steel frames infilled with concrete sandwich panels, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18 (2018) 557-572.
- Experimental assessment of the in-plane/out-of-plane interaction in unreinforced masonry infill walls, Engineering Structures, 173 (2018) 960-978.
- [27] V. Palieraki, C. Zeris, E. Vintzileou, C.-E. Adami, In-plane and out-of plane response of currently constructed masonry infills, Engineering Structures, 177 (2018) 103-116.
- [28] 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.
- [29] M.T. De Risi, M. Di Domenico, P. Ricci, G.M. Verderame, G. Manfredi, Experimental investigation on the influence of the aspect ratio on the in-plane/out-of-plane interaction for masonry infills in RC frames, Engineering Structures, 189 (2019) 523-540.
- [30] A. Furtado, H. Rodrigues, A. Arêde and H. Varum, Out-of-plane behavior of masonry infilled RC frames based on the experimental tests available: A systematic review, Construction and Building Materials, 168 (2018) 831-848.
- [31] American Institute of Steel Construction (AISC), Specification for Structural Steel Buildings, Standard ANSI/AISC 360-10, Chicago, IL, 2010.
- [32] American Institute of Steel Construction (AISC), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Standard ANSI/ AISC 341-10, Chicago, IL, 2010.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. A. Asadzadeh, M. Mohammadi, N. K. A. Attari, S. A. Zareei, *Experimental Study on Finding Reliable Connectors for Infill-frame Connection in Infilled Steel Frame*, Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5259-5280.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18761.6953



