

# بهسازی لرزه‌ای اتصالات خارجی تیر - ستون بتنی با آسیب شدید با استفاده از مصالح HPFRCC و FRCC

پویا الهی<sup>۱</sup>، محمدحسین ثقفی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

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

Email: Mh.saghafi@semnaniau.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۰۹]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۰۶/۱۵]

## چکیده

بررسی زلزله‌های گذشته حاکی از آن است که به علت عدم رعایت جزئیات لرزه‌ای ویژه اتصالات تیر-ستون، سازوکار ترد سازه ناشی از رفتار اتصال، اغلب منجر به آسیب‌دیدگی شدید یا حتی فروریزش ساختمان می‌شود. گسیختگی اتصال تیر-ستون به دلیل گسیختگی برشی هسته اتصال یا لغزش آرماتور در این سازوکار شایع است. احیا و بهسازی لرزه‌ای اتصالات خارجی تیر-ستون بتن مسلح آسیب‌دیده یکی از چالش‌های اخیر پژوهشگران است؛ پس در این تحقیق به ارائه راهکاری برای ارتقای لرزه‌ای رفتار اتصالات آسیب‌دیده تحت زلزله پرداخته شده است. در این راستا ۳ اتصال خارجی تیر-ستون با مقیاس  $1/2$  تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای با دامنه افزایشی قرار گرفتند. نمونه‌های آزمایش شده شامل دو نمونه کنترلی بدون آسیب اولیه است که یک نمونه دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه و نمونه کنترلی دیگر فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه است. نمونه بهسازی شده، مانند نمونه‌های کنترلی فاقد جزئیات لرزه‌ای است که ابتدا تحت آسیب شدید قرار گرفته است و سپس اقدام به احیا و بهسازی اتصال با مصالح HPFRCC و FRCC شده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که جایگزینی بتن آسیب‌دیده با مصالح HPFRCC و استفاده از FRCC سبب جابه‌جایی مفصل پلاستیک به بیرون هسته اتصال و شکل‌گیری مفصل پلاستیک خمشی در تیر و عدم آسیب هسته اتصال و بهبود پیوستگی بین بتن و آرماتور طولی شده است، همچنین میانگین بار حداکثر، ضریب شکل‌پذیری و انرژی مستهلک شده برای نمونه احیاء و بهسازی شده به طور میانگین به ترتیب ۱۶٪، ۱۷٪ و ۵۶٪ نسبت به نمونه کنترلی دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه بدون آسیب اولیه افزایش یافته است.

**واژگان کلیدی:** بهسازی اتصالات، رفتار چرخه‌ای، اتصال تیر-ستون، اتصالات آسیب‌دیده، جابه‌جایی مفصل پلاستیک

## ۱- مقدمه

در ساختمان‌های بتن آرمه قاب خمشی، اتصالات تیر-ستون عنصر تعیین کننده رفتار سازه تحت زلزله است. الاستیک باقی ماندن هسته اتصالات و انتقال نیروها بین تیرها و ستون‌ها در طول تغییرشکل‌های پلاستیک سازه سبب تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها و حاصل شدن شکل پذیری مناسب تحت بارهای زلزله می‌شود. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که بیشتر خسارت‌های وارد بر سازه در ناحیه اتصالات تیر-ستون متمرکز است [1-3]. از طرفی به دلیل ضعف در دستورالعمل آئین‌نامه‌های قبل از سال‌های ۱۹۷۰ ضوابط لازم درخصوص طراحی اتصالات تیر-ستون اعمال نشده و توجه کمی به جزئیات این نواحی شده است. از سوی دیگر ضوابط آئین‌نامه‌های جدید [4, 5] برای تامین مقاومت و شکل‌پذیری اتصالات سبب رعایت لزوم آرماتورهای عرضی در نواحی هسته اتصالات و نیز کاهش فواصل آرماتورهای عرضی در نواحی مفاصل پلاستیک تیر و ستون شده است. این موضوع باعث تراکم حجم بالای آرماتور در نواحی اتصالات و نیز مشکلات آرماتوربندی و بتن ریزی در این نواحی شده است. به دلیل کیفیت نامطلوب بتن در ناحیه هسته اتصال این اتصالات نیز عملکرد مطلوبی را در زلزله‌های گذشته از خود نشان نداده اند به طوری محدودیت‌های اجرایی برای رعایت ضوابط آئین‌نامه‌های فعلی منجر به عدم اجرای صحیح این ضوابط به ویژه در ناحیه هسته اتصالات برای ساختمان‌های جدید و آسیب پذیر بودن آنها در برابر زلزله می‌شود. پس تقویت اتصالات تیر-ستون بدون آسیب و احیاء ویژگیهای رفتاری اتصالات تیر-ستون آسیب دیده یکی از چالش‌های بزرگ پژوهشگران قرار گرفته است.

مطالعات انجام شده درخصوص بهسازی لرزه ای اتصالات تیر-ستون بتنی شامل استفاده از پلیمر مسلح شده با الیاف (FRP)<sup>۱</sup>، استفاده از المان‌های بتنی و کامپوزیت‌های سیمانی الیافی [6-16] و استفاده از المان‌های فولادی [8, 9, 13, 17-31] در حالت‌های مختلف و متنوع می باشد. استفاده از المان‌های بتنی و فولادی

دارای مزیت‌هایی مانند افزایش مقاومت، سختی و استهلاک انرژی می‌باشد ولی از طرف دیگر با افزایش سختی سازه منجر به افزایش نیروهای وارد به سازه در هنگام زلزله می‌شود. از میان المان‌های فولادی و بتنی ژاکت‌ها دارای محدودیت در اجرا و اختلال در کاربری سازه در حین اجرا می‌باشند. از سوی دیگر نصب ژاکت فولادی به وجوه خارجی اتصالات با توجه به نیاز به انکر بولت و گروت‌های سیمانی ویژه برای پرکردن فضای بین ورق فولادی و ناحیه بتنی نسبت به ژاکت‌های بتنی با مشکلات بیشتری همراه است [20, 24-26, 32-38]. مصالح FRP به دلیل مزایایی مانند سبک بودن، مقاومت بالا و امکان استفاده برای تقویت خمشی و یا برشی به صورت مجزا بر اساس برای قرارگیری الیاف در بهسازی اتصالات بتنی مورد استفاده وسیعی قرار گرفته‌اند [39-64]. استفاده از این مصالح در بهسازی لرزه ای اتصالات بتنی موجب ارتقای مقاومت، سختی، استهلاک انرژی و شکل‌پذیری شده است. همچنین با استفاده از این مصالح امکان دور کردن محل مفصل پلاستیک تیر از بر ستون ایجاد می‌شود. اگرچه استفاده از رزین عملکرد مناسبی در زمینه ایجاد چسبندگی کافی و مقاومت در برابر شرایط محیطی FRP دارد، با وجود این دارای مشکلاتی از قبیل مقاومت کم در برابر امواج ماورا بنفش (UV) خورشید، مقاومت کم در محیط‌های قلیایی به ویژه در FRP با الیاف شیشه و همچنین کاهش مقاومت و تخریب ماتریس پلیمری در محیط‌های با دمای بالا و رطوبت زیاد می‌باشد [65]. برای جلوگیری از برخی مشکلات ذکر شده، سیستم‌های کامپوزیتی مبتنی بر سیمان متشکل از FRP و یک عامل اتصال سیمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با وجود این، استفاده از سیستم‌های تقویتی پایه سیمانی دارای برخی مشکلات می‌باشد. بزرگترین مشکل در این خصوص، چسبندگی FRP به ملات سیمانی است که ملات به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود امکان نفوذ در رشته‌های الیاف را ندارد. با استفاده از مش‌های پارچه‌ای یا شبکه‌های FRP که در ملات سیمانی جاسازی شده اند می‌توان پیوند را تقویت کرد. تقویت ذکر شده تحت عنوان تقویت با مواد پایه سیمانی مسلح الیافی<sup>۲</sup> (FRCM) مورد

رفت و برگشتی و تغییرمود شکست از برشی در هسته اتصال به خمشی در تیر پرداخته شده است.

با توجه به محصورشدگی کمتر و آسیب پذیری بیشتر اتصالات خارجی نسبت به اتصالات داخلی تحت زلزله‌های گذشته، در این مقاله به‌طورکلی ۳ نمونه اتصال خارجی تیر-ستون تحت بارهای چرخه‌ای مورد آزمایش واقع شده است. شایان ذکر است نمونه‌های مطالعه شده شامل ۲ نمونه کنترلی و ۱ نمونه احیاء و بهسازی شده است. نمونه‌های کنترلی شامل یک نمونه با جزئیات لرزه‌ای ویژه (محصور) و یک نمونه دیگر فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه (غیرمحصور) است. برای بهسازی نمونه فاقد جزئیات لرزه‌ای آسیب‌دیده ابتدا نمونه کنترلی فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه را تا رسیدن به سطح آسیب شدید تحت بارهای چرخه‌ای قرار گرفته است، سپس بتن‌های آسیب‌دیده نمونه کنترلی فاقد جزئیات لرزه‌ای با مصالح HPCFRCC جایگزین شده است و در مرحله بعد سیستم‌های بهسازی ثانویه شامل FRCM برای بهبود ظرفیت خمشی تیرها و دور نمودن ناحیه مفصل پلاستیک

تیر از بر ستون استفاده شده است. نتایج منحنی‌های چرخه‌ای، الگوی ترک‌خوردگی و استهلاک انرژی برای نمونه بهسازی شده با نمونه‌های کنترلی مقایسه شده است.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- تعیین ویژگی‌های مکانیکی مصالح

برای دستیابی به مصالح HPCFRCC با رفتار سخت‌شوندگی کرنش کششی به عنوان جایگزین بتن آسیب دیده از مطالعات تقفی و همکارانش [71] استفاده شده است. دو طرح اختلاط مصالح HPCFRCC و بتن معمولی مورد استفاده در جدول (۱) ارائه شده است. مصالح مورد استفاده در ساخت مصالح HPCFRCC شامل فوق روان کننده، میکرو سیلیس، ماسه سلیسی و سیمان به همراه الیاف فولادی دو انتها قلاب به میزان ۲٪ حجمی است. به منظور ایجاد کارایی بهتر از ۰/۱۶٪ فوق روان کننده پایه پلی کربوکسیلاتی استفاده شده است

استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از این مصالح و روش‌های تقویت در بهسازی لرزه‌ای اتصالات بتنی موجب ارتقای مقاومت، سختی، استهلاک انرژی و شکل پذیری شده است. همچنین با استفاده از این مصالح امکان دور کردن محل مفصل پلاستیک تیر از بر ستون ایجاد می‌شود.

مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه بهسازی اتصالات فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه نشان می‌دهد بیشتر تحقیقات انجام شده روی اتصالات تیر-ستون بتن مسلح روی اتصالات فاقد آسیب بوده است و بررسی اتصالات با آسیب دیدگی بسیار محدود بررسی شده است [69-66, 13]. همچنین در تحقیقات انجام شده روی اتصالات آسیب دیده روش‌های پیشنهادی مقاوم‌سازی پژوهشگران نتوانسته است سبب احیاء و بهسازی مطلوب لرزه‌ای اتصالات شود. در سازه‌های آسیب دیده انتخاب روش بهسازی اتصالات به میزان آسیب بستگی دارد. به طوری که در اتصالات با آسیب‌های محدود می‌توان از تزریق اپوکسی رزین در ترک‌ها و جایگزینی جزئی بتن آسیب دیده با ملات سیمانی پر مقاومت استفاده کرد و در حالت اتصالات با آسیب شدید به دلیل از بین رفتن پیوستگی بین آرماتورها و بتن و عدم انتقال نیروها جایگزین کردن بتن آسیب دیده با مصالح توانمند قبل از نصب سیستم بهسازی لازم است. نقش این مصالح حفظ یکپارچگی، انتقال نیرو و ایجاد پیوستگی تحت اثر نیروها و تغییر شکل‌های لرزه‌ای است. یکی از گزینه‌ها برای دستیابی به این هدف استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند<sup>۳</sup> (HPCFRCC) در اتصالات تیر به ستون می‌باشد. HPCFRCC یک نوع خاص از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی هستند که علامت مشخصه آن‌ها رفتار سخت‌شوندگی کرنش بر مبنای شکل منحنی تنش-کرنش کششی آن به همراه ترک‌های مضاعف ناشی از پل زدگی الیاف و ایجاد محصورشدگی ذاتی این مصالح است [70]. پس در تحقیق حاضر به ارائه روشی برای احیاء و بهسازی اتصالات آسیب دیده شدید به وسیله خارج و جایگزینی کردن بتن آسیب دیده ناحیه اتصال با مصالح HPCFRCC و سپس بهسازی آنها با FRCM تحت اثر بارهای

جدول ۱. جزئیات مواد و طرح اختلاط کامپوزیت‌های مورد استفاده در مطالعه

Material type	Uniaxial compressive test		Additives (super plasticizer)	Cement	Micro silica	Water	Sand	Coarse aggregate
	$f_c$ (MPa)							
HPFRCC	55		0.0016	1	0.1	0.28	1	-
NC	30		-	1	-	0.45	1.72	1.72

Table 1. Details of materials and mixture design used in the study

لازم به ذکر است که در تقویت با ملات پایه سیمانی نمی‌توان از ورق‌های CFRP رایج استفاده نمود، چرا که ملات امکان عبور از ورق‌های CFRP و چسبیدن به لایه زیرین را ندارد؛ بنابراین در تقویت با ملات پایه سیمانی از شبکه‌های الیاف CFRP استفاده می‌شود تا بتوان چسبندگی مناسبی بین شبکه الیاف و ملات ایجاد نمود. در شکل (۱) شبکه‌های CFRP استفاده شده برای تقویت با FRCM نشان داده شده است.

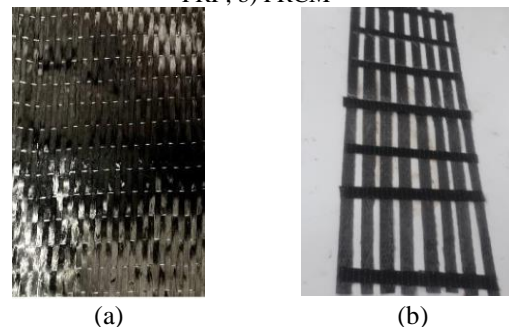
## ۲-۲- نمونه اتصال تیر به ستون و انجام آزمایش

برای انجام این پژوهش آزمایشگاهی نمونه اتصال خارجی تیر-ستون با مقیاس ۱/۲ استفاده شده است. برای هماهنگی ابعاد و شرایط نمونه‌های آزمایشگاهی با موارد واقعی در ساختمان‌ها، اتصال تیر-ستون خارجی در حالت واقعی از یک ساختمان ۵ طبقه موجود به ارتفاع طبقه ۳/۵ متر و دهانه مؤثر تیر ۵ متر بوده که از داخل یکی از قاب‌های این ساختمان انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در طراحی اتصالات تیر-ستون فرض شده است که نقطه عطف خمش در وسط ارتفاع هر ستون و تیر رخ می‌دهد. همچنین ضابطه تیر ضعیف ستون قوی در طراحی اتصالات لحاظ شده است. در اتصالات مورد آزمایش ستون با مقطع مربعی و به ابعاد ۲۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و تیر نیز با مقطع مستطیلی به عرض و ارتفاع به ترتیب برابر ۲۲۰ و ۲۵۰ میلی‌متر، در نظر گرفته شده است. پوشش بتن برای تیر و ستون برابر ۲۰ میلی‌متر است. از ۷ و ۸ عدد آرماتور طولی با قطر ۱۴ میلیمتر برای مسلح کردن تیرها و ستون‌ها استفاده شده است. درصد فولاد کششی و فشاری تیر به ترتیب  $0.33\rho_b$  و  $0.45\rho_b$  محاسبه شد. تنش تسلیم فولاد طولی و عرضی به طور میانگین به ترتیب برابر ۴۶۵ و ۳۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد انجام آزمایش روی نمونه‌ها با استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی و چیدمان آزمایش به همراه شرایط تکیه‌گاهی و چگونگی بارگذاری در شکل (۲) به صورت

همچنین ماسه به کار برده شده ماسه سلیسی با قطر میانگین ۰/۱ میلی‌متر، سیمان مورد استفاده از نوع پرتلند و تیپ دو بوده و الیاف مصرفی دارای طول ۳۵ میلی‌متر، قطر ۰/۸ میلی‌متر، مدول الاستیسیته ۲۱۲ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۱۱۰۰ مگاپاسکال می‌باشد. برای ساخت بتن معمولی از سیمان پرتلند، مصالح درشت دانه با حداکثر اندازه ۲۰ میلی‌متر و ماسه رودخانه‌ای به عنوان ریزدانه استفاده شده است. در ساخت مصالح HPFRCC، نسبت آب به سیمان برابر ۰/۲۸ و در ساخت بتن معمولی ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. برای تعیین ویژگی‌های فشاری مصالح، از استاندارد ASTM C39/C39M-10 [72] استفاده شده است. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه استاندارد نمونه HPFRCC و بتن معمولی به ترتیب ۵۵ و ۳۰ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است.

به منظور تقویت اتصالات با مصالح FRCM از ورق‌های CFRP تک جهته با نام تجاری QUANTOM Wrap 300C مقاومت کششی ۵۴۰۰ مگاپاسکال، مدول ارتجاعی ۲۴۰ گیگاپاسکال و کرنش پارگی ۱/۵٪ استفاده شد. در تقویت از ملات پایه سیمانی استفاده شده است. مصالح مورد استفاده در مطالعه حاضر برای ساخت ملات پایه سیمانی مطابق ملات مصالح HPFRCC جدول (۱) استفاده شده است

Fig. 1. Sheets and grids used in strengthening method: a) FRP; b) FRCM



شکل ۱. ورق و شبکه‌های استفاده شده در بهسازی (الف) ورق FRP (ب) شبکه‌های CFRP استفاده شده در روش FRCM

ناکافی در ناحیه اتصال است و بیانگر ساخت سازه بتن مسلح با جزییات معیوب است (شکل ۳-ب). این نمونه دارای دو نقص است به طوری که علاوه بر عدم وجود آرماتورهای عرضی در هسته اتصال فواصل آرماتورهای عرضی تیر و ستون نیز افزایش پیدا کرده است و اتصال دارای آرماتورهای عرضی تیر و ستون به فاصله  $d/2$  (ارتفاع موثر تیر:  $d$ ) است. نمونه‌ها DNSJ-FRCM اتصالات آسیب‌دیده هستند که الگوی آرماتورگذاری مشابه NSJ دارند به طوری که این نمونه‌ها آسیب شدید تا دریافت ۶٪ و شکست برشی در ناحیه هسته اتصال را تجربه نموده‌اند. باهدف احیای اتصالات برای انتقال نیرو و ایجاد پیوستگی تحت اثر نیروها و تغییر شکل‌های لرزه‌ای اقدام به خارج کردن بتن آسیب‌دیده و جایگزینی مصالح HPFRCC در نواحی آسیب‌دیده شده است (شکل ۴-الف). با توجه به ویژگی‌های مصالح HPFRCC پیش‌بینی می‌شود این مصالح جایگزین در هسته اتصال بتواند به‌تنهایی سبب جلوگیری از آسیب هسته و شکست برشی شود. اما از سوی دیگر با توجه به اینکه این اتصالات تجربه یکبار آسیب‌دیدگی شدید و خستگی آرماتورها را در حین آزمایش اولیه داشته‌اند؛ پس گسیختگی و پارگی آرماتورها در حین آزمایش مجدد محتمل است، بدین دلیل سیستم بهسازی ثانویه شامل FRCM برای بهبود ظرفیت خمشی تیرها و دور نمودن ناحیه مفصل پلاستیک تیر از بر ستون مورد استفاده قرار گرفته است. در این نمونه برای نصب ورق‌های FRP، قبل از ایجاد لایه ملات اولیه، شیارهای با ابعاد معین روی سطح بتن ایجاد می‌شوند (شکل ۴-ب). سپس این شیارها توسط یک لایه ملات اولیه پر می‌شود و بعد از آن نوارهای FRP روی ملات نصب می‌شود. ایجاد این شیارها موجب افزایش سطح تماس چسب با بتن می‌شود و در نتیجه مقاومت چسبندگی ورق‌های FRP با سطح بتن بیشتر می‌شود. جهت شیارها موازی جهت الیاف ورق انتخاب شده است تا چسبندگی و مقاومت پیوستگی الیاف بیشتر شود؛ زیرا در این حالت، موجب هم جهت شدن انتقال تنش‌ها بین شیارها و الیاف می‌شود و توزیع تنش بهتری را بین شیارها، ملات و الیاف ایجاد می‌کند. مطابق شکل عرض هر شیار ۴ میلی‌متر و عمق آن ۸ میلی‌متر است فاصله مرکز تا مرکز هر شیار ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

شماستیک نشان داده شده است. در هنگام انجام آزمایش، تیر و ستون به اندازه ۹۰ درجه چرخش داشته و بارگذاری روی تیر انجام می‌شود. شرایط مرزی در دو انتهای ستون به صورت مفصلی در نظر گرفته شده، پس در برابر دوران آزاد هستند. برای در نظرگیری بارمحوری ستون، باری به اندازه  $18/75 kN$  که معادل  $(0.10 f_c A_g)$  به صورت کنترل نیرویی به ستون وارد می‌شود. و سپس بار چرخه‌ای به صورت رفت و برگشتی با استفاده از یک جک هیدرولیکی به ظرفیت  $60 kN$  در انتهای تیر اعمال می‌شود. برای تعیین مقدار بار وارد شده از یک نیرو سنج S شکل که توانایی ثبت نیروی کششی و فشاری را دارد استفاده می‌شود و نتایج آن به سیستم رایانه ارسال می‌شود. لازم به ذکر است فاصله محل اعمال نیروی افقی به تیر تا آکس ستون ۱۲۵۰ میلی‌متر است. برای ثبت تغییر مکان‌های انتهای تیر از یک عدد LVDT با ظرفیت جابه‌جایی تا ۱۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. پارامتر دریافت از حاصل تقسیم تغییر مکان افقی در محل اعمال بار بر فاصله محل اعمال بار تا بر ستون به دست می‌آید. نیروی افقی اعمالی بر تیر به صورت کنترل تغییر مکان و تاریخچه آن شامل سه چرخه در هر زاویه دریافت است. این تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای با زاویه دریافت

شکل ۲. چگونگی آزمایش اتصال تیر به ستون

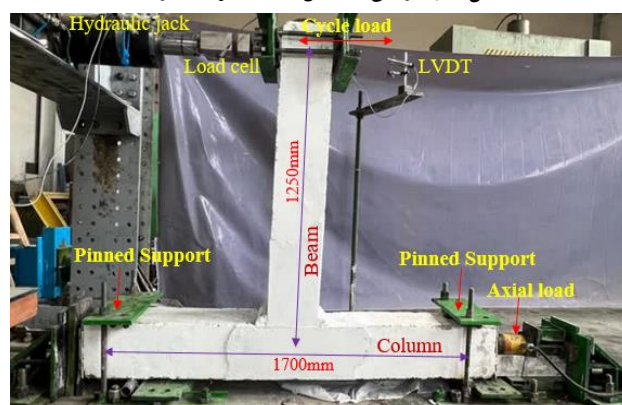


Fig. 3. Beam-column connection testing procedure

بررسی نمونه‌ها شامل دو نمونه کنترلی و یک نمونه آسیب‌دیده بهسازی شده است. مطابق شکل (۳-الف)، نمونه SJ منطبق بر ضوابط شکل‌پذیری ویژه آیین‌نامه ACI 318M-14 [74] می‌باشد و دارای پتانسیل ایجاد مفصل پلاستیک در ناحیه تیر و ستون است. نمونه NSJ اتصال با جزییات آرماتورگذاری

شکل ۳. ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها الف) نمونه دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه ب) نمونه فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه (ابعاد بر حسب میلی‌متر).

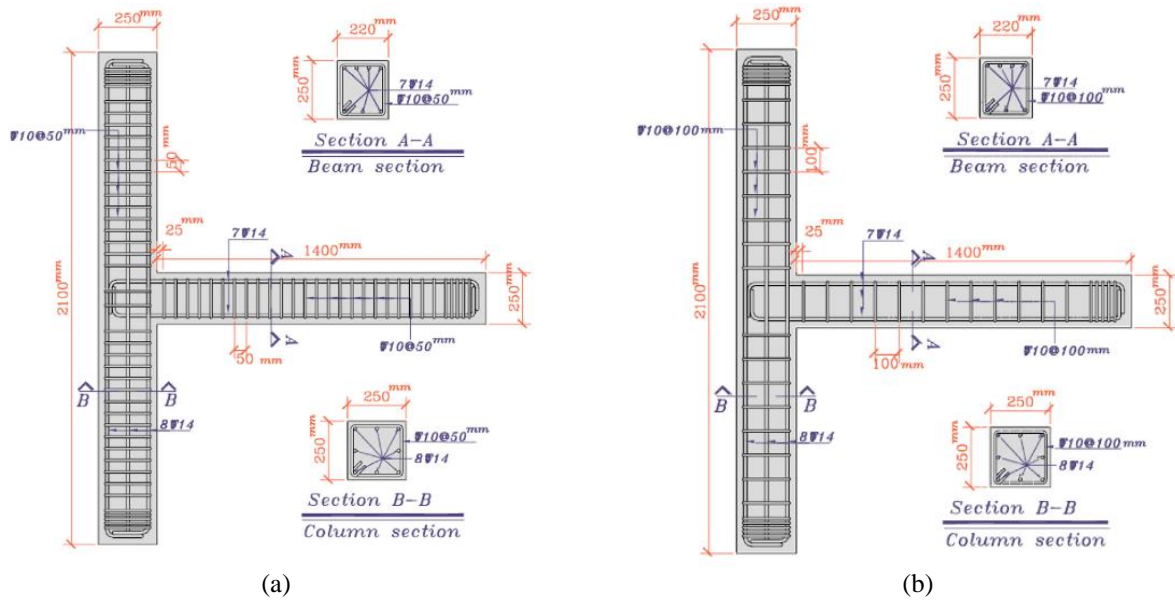


Fig. 3. Dimensions and reinforcement details of control specimens (dimensions in millimeters): a) Control specimen with special seismic details; b) Control specimen without special seismic details

شکل ۴. چگونگی احیاء و نصب سیستم بهسازی الف) احیا نمونه‌های آسیب‌دیده ب) آماده‌سازی سطح و ایجاد شیار برای نصب سیستم بهسازی ج) مراحل نصب FRCM

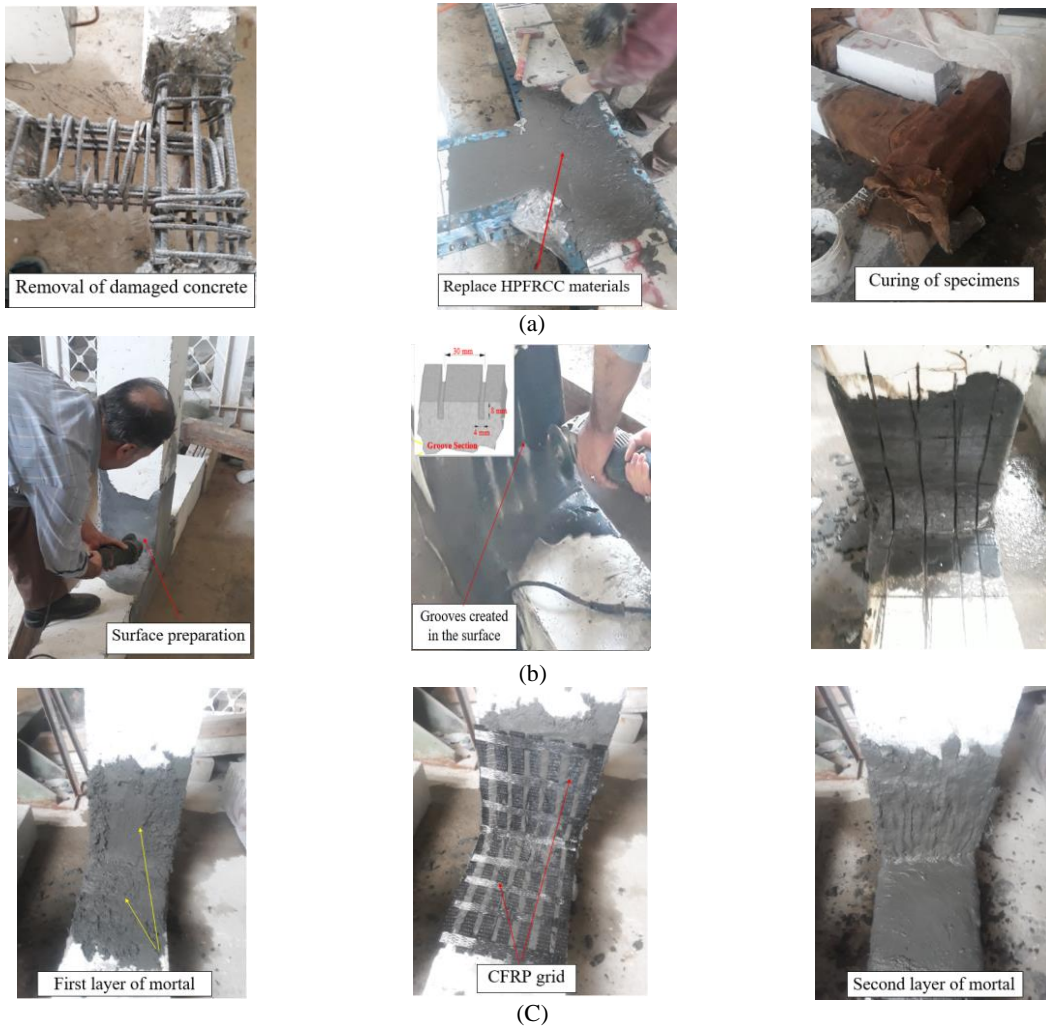


Fig. 4. Installation Method of Rehabilitation System: a) Rehabilitation of damaged specimens; b) Surface preparation and groove creation for installation of the rehabilitation system; c) Installation stages of FRCM

شکل ۵. الگوی آسیب نمونه‌ها: الف) نمونه SJ (ب) نمونه NSJ (ج) نمونه

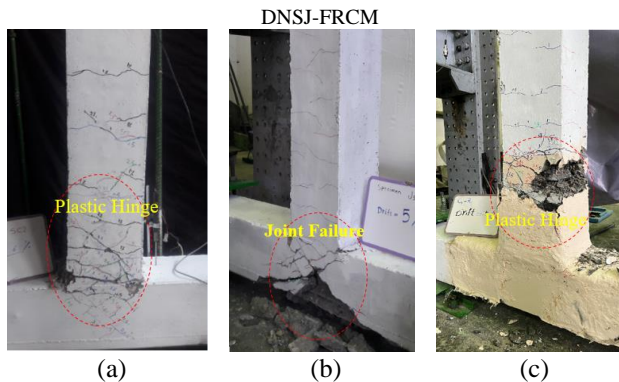


Fig. 5. Damage pattern of specimens.: a) SJ sample; b) NSJ sample ; c) DNSJ-FRCM sample

شکل ۶. منحنی چرخه ای بار-دریفت نمونه‌ها الف) نمونه SJ (ب) نمونه

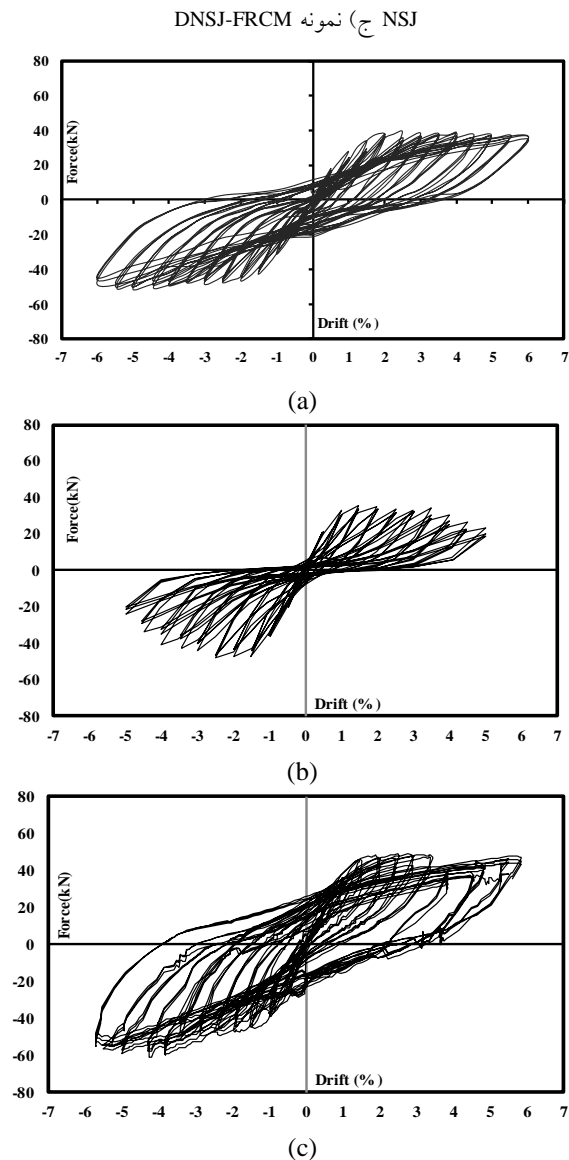


Fig. 6. Load-drift hysteresis curve of specimens: a) SJ sample; b) NSJ sample ; c) DNSJ-FRCM sample

### ۳- مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی

در این قسمت، بر اساس نتایج آزمایشگاهی موجود برای نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده، تأثیر روش بهسازی در بهبود عملکرد چرخه‌ای اتصالات تیر-ستون بررسی شده است و پارامترهای الگوی ترک‌خوردگی، منحنی‌های هیستریزس، منحنی‌های پوش و ظرفیت اتلاف انرژی ارائه شده است.

#### ۳-۱- الگوی ترک‌خوردگی و گسترش آسیب نمونه‌ها

مشاهدات الگوی ترک‌خوردگی و آسیب در هر آزمایش به ترتیب در شکل (۵) برای نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده نشان داده شده است. از مشاهدات آزمایش‌ها رفتار مقایسه‌ای و سازوکار گسیختگی نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده به صورت بحث شده در ذیل، ارزیابی شده است.

الگوی آسیب نمونه کنترلی SJ در شکل (۵-الف) نمایش داده شده است همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل کفایت آرماتور برشی و طول مهاری آرماتورهای طولی تیر در ناحیه اتصال پاسخ نیرو-دریفت در رفتار چرخه‌ای دارای شکل‌پذیری، بدون فشردگی قابل‌ذکر یا افت مقاومت تا پایان آزمایش بوده است (شکل ۶-الف). شرایط محصورشدگی در ناحیه اتصال از لغزش زود هنگام آرماتورهای مدفون تیر جلوگیری نموده و سبب تقلیل نرخ کاهش بار پس از حداکثر ظرفیت می‌شود. به دلیل عدم تقارن آرماتورهای طولی کششی و فشاری تیر در دو جهت مثبت و منفی متفاوت است. نمونه‌های NSJ دارای ضعف برشی در ناحیه هسته اتصال به دلیل عدم وجود آرماتور عرضی در این ناحیه هستند. سازوکار رفتاری این نمونه به صورت شکست برشی در ناحیه هسته اتصال و عدم تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیر است (شکل ۵-ب). به دلیل عدم اجرای آرماتورهای عرضی در ناحیه هسته اتصال و شکل‌گیری ترک‌های قطری کششی سازوکار تشکیل دستک‌های قطری فشاری تحت تأثیر قرار گرفته و هسته اتصال به دلیل عدم وجود سازوکار مقاوم در برابر تنش‌های وارد شده دچار شکست گوه‌ای هسته در دریفت ۴٪ شده است. مشاهدات نتایج نشان می‌دهد در این نمونه اکثر اتلاف انرژی در ناحیه هسته اتصال رخ می‌دهد.

در این نمونه نیز با وجود آسیب اولیه پارگی و کماتش آرماتورها اتفاق نیفتاده است. مقایسه منحنی چرخه‌ای نمونه بهسازی شده با نمونه کنترلی دارای جزئیات لرزه‌ای در شکل (۷) نشان می‌دهد.

### ۳-۲- منحنی‌های پوش نیرو - جابه‌جایی

منحنی‌های پوش نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده در شکل (۸) نشان داده شده‌اند. بار حداکثر، دررفت نهایی و ظرفیت شکل‌پذیری برای نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده برای جهت مثبت و منفی بارگذاری در جدول (۲) ارائه شده است. دررفت نهایی متناظر با نقطه افت بار ۲۰٪ نسبت به بار حداکثر یا کماتش آرماتور طولی یا شکست آرماتور عرضی یا طولی (هرکدام زودتر رخ دهد)، است. نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشانگر بهبود مقادیر شکل‌پذیری و ظرفیت باربری در نمونه بهسازی شده نسبت به نمونه‌های کنترلی است. کمترین ضریب شکل‌پذیری در هر دو جهت بارگذاری فشاری و کششی، شکل‌پذیری حقیقی اتصال تیر-ستون مدل‌ها را کنترل می‌کند. کمترین ضریب شکل‌پذیری برای نمونه احیاء و بهسازی شده DNSJ-FRCM به میزان ۱۰۷٪ و ۱۶٪ به ترتیب نسبت به نمونه‌های کنترلی فاقد و دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه افزایش یافته است. همچنین میانگین بار حداکثر برای نمونه DNSJ-FRCM به علت استفاده از سیستم تقویت خمشی تیر به ترتیب ۲۸٪ و ۱۶٪ نسبت به نمونه‌های کنترلی NSJ و SJ افزایش داشته است.

شکل ۸. مقایسه منحنی‌های پوش نیرو - جابه‌جایی نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده

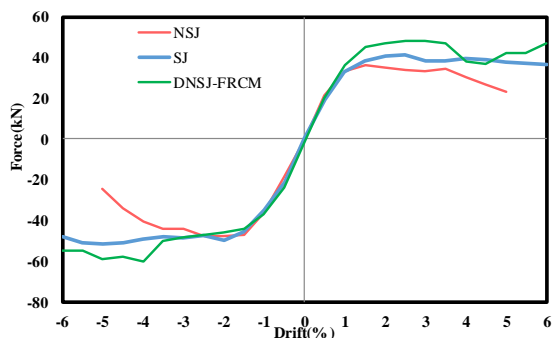


Fig. 8. Comparison of force-drift curves of control and rehabilitated specimens

در نمونه DNSJ-FRCM سازوکار رفتار به صورت شکل‌گیری مفصل پلاستیک خمشی در ناحیه انتهای FRCM و در مرز HPFRCC و بتن معمولی است (شکل ۵-پ). استفاده از مصالح HPFRCC سبب بهبود ظرفیت باربری و ایجاد حلقه‌های با سطح بزرگ‌تر و پایدارتر و بدون زوال ظاهری مقاومت و کاهش سختی در مقایسه با نمونه کنترلی SJ شده است. این بهبود رفتار می‌تواند ناشی از اثر پل زدگی الیاف فولادی به صورت مانعی برای ایجاد و گسترش ترک برای بهبود مقاومت پیوستگی آرماتورهای تیر و مصالح HPFRCC باشد. رفتار پایدار تا دررفت ۶٪ در این نمونه مشاهده شده است. افزایش ظرفیت باربری در این نمونه ناشی از دورشدن مفصل پلاستیک از بر ستون و تقویت خمشی تیر ناشی از FRCM مشاهده شده است. در ناحیه هسته اتصال تا انتهای آزمایش بدون آسیب باقی مانده است.

شکل ۷. مقایسه منحنی هیستریزس بار-دررفت نمونه بهسازی شده و نمونه‌های کنترلی الف - نمونه کنترلی دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه ب - نمونه کنترلی فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه

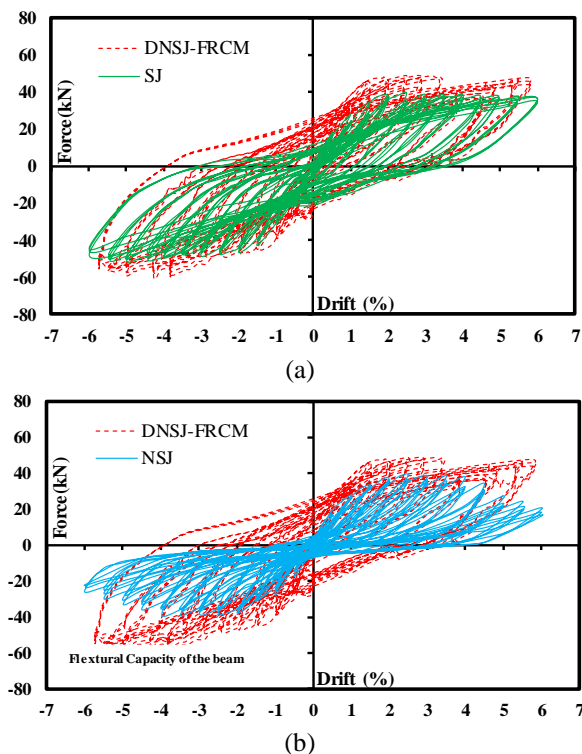


Fig. 7. Comparison of Hysteretic Load-Drift Curves of Rehabilitated Sample and Control Sample a) With Special Seismic Details b) Non-Seismic Details



جدول ۲. بار حداکثر آزمایش و شکل پذیری در جهت مثبت و منفی

ID	Max Load (kN)		Average Max Load (kN)	Displacement at yield point (mm)		Displacement at 20% drop of peak load (mm)		Ductility factor	
	Push (+)	Pull (-)		Push (+)	Pull (-)	Push (+)	Pull (-)	Push (+)	Pull (-)
NSJ	35.95	47.29	41.62	18.85	20.08	56.25	62.50	2.98	3.11
SJ	41.00	51.22	46.11	19.21	20.63	110.00	110.00	5.72	5.33
DNSJ-FRCM	47.13	60.10	53.61	15.05	17.80	110.00	110.00	6.64	6.17

Table 2. Maximum test load and deformability in positive and negative directions.

#### ۴- نتیجه گیری

رفتار اتصالات خارجی تیر-ستون غیرلرزه‌ای با آسیب دیدگی شدید بهسازی شده با استفاده از روش FRCM مورد تحقیق قرار گرفته است. سه نمونه اتصال خارجی تیر-ستون بتن مسلح با مقیاس  $1/2$  تحت اعمال بار چرخه‌ای جانبی با دامنه افزایش یافته قرار گرفته‌اند. پارامترهای وابسته به رفتار لرزه‌ای که شامل، الگوی ترک خوردگی، منحنی چرخه‌ای، مقاومت، شکل پذیری و انرژی مستهلک شده تعیین شدند. نتایج با نمونه‌های کنترلی مقایسه گردیدند. یافته‌های کلیدی آزمایش‌ها به شرح زیر است:

۱- نمونه کنترلی SJ اتصال تیر-ستون بتن معمولی دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه پاسخ نیرو-جابجایی چرخه‌ای شکل پذیر بدون فشردگی قابل ذکر یا افت مقاومت تا پایان آزمایش، از خود نشان داده است که این عملکرد مطلوب به کفایت آرماتور برشی و طول مهار آرماتورهای طولی تیر در ناحیه اتصال نسبت داده می‌شود و لزوم ACI 318M-14 برای طراحی اتصالات تیر-ستون سازه‌های بتن مسلح را در بردارد. شرایط محصورشدگی در ناحیه اتصال از لغزش زود هنگام گیرداری آرماتورهای تیر جلوگیری نموده و سبب تقلیل نرخ کاهش بار پس از حداکثر ظرفیت می‌شود.

۲- نمونه کنترلی غیرلرزه‌ای NSJ دارای ضعف برشی در هسته اتصال به دلیل عدم وجود آرماتور عرضی در این ناحیه تحت تأثیر گسترش و باز شدن ترک‌های قطری در هسته اتصال و شکست برشی قرار گرفته است. همچنین این نمونه به دلیل عدم مقاومت برشی کافی هسته اتصال، عدم شرایط محصورشدگی بتن در ناحیه هسته اتصال، در منحنی هیستریزس اثر باریک‌شدگی مشاهده می‌گردد...

#### ۳-۳- ظرفیت اتلاف انرژی

انرژی اتلاف شده در هر سیکل برابر سطح محصور توسط یک حلقه چرخه‌ای کامل در آن سیکل و با جمع مساحت‌های زیر منحنی‌های چرخه‌ای نیرو-دریافت، ظرفیت اتلاف انرژی چرخه‌ای تجمعی محاسبه می‌شود. با تعیین سطح محصور در هر یک از حلقه‌های هیستریزس برای زاویه‌های دریافت متفاوت از منحنی رفتار سیکلی، مقدار انرژی مستهلک شده هر یک از نمونه‌ها محاسبه شده است. مقایسه انرژی اتلاف شده تجمعی توسط نمونه‌های کنترلی و بهسازی شده در برابر دریافت در شکل (۹) نشان داده شده است انرژی اتلاف شده از شروع آزمایش تا نسبت دریافت  $\pm 5\%$  برای نمونه‌های SJ، NSJ و نمونه بهسازی شده، DNSJ-FRCM به ترتیب برابر  $1/14$ ،  $2/31$  و  $5/50$  کیلو نیوتن متر است. انرژی مستهلک شده نمونه DNSJ-FRCM در این دریافت  $61\%$  نسبت به نمونه کنترلی دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه بدون آسیب اولیه (SJ) افزایش یافته است.

شکل ۹. مقایسه اتلاف انرژی تجمعی برای همه نمونه‌ها

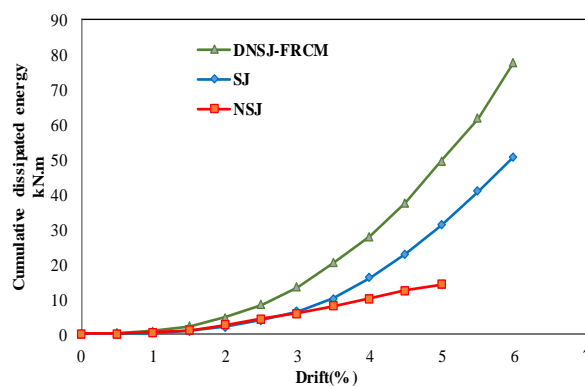


Fig. 9. Comparison of the cumulative dissipation of energy for all specimens

Structural Concrete (ACI 318R-14), an ACI Report. 2012. American Concrete Institute.

[6] Bedirhanoglu, I., et al. Retrofit of concrete panels with prefabricated HPFRCC plates. in 14th World Conference on Earthquake Engineering. 2008.

[7] hossein Saghafi, M. and H. Shariatmadar, Enhancement of seismic performance of beam-column joint connections using high performance fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 2018. 180: p. 665-680.

[8] Nouri, A., M.H. Saghafi, and A. Golafshar, Evaluation of beam-column joints made of HPFRCC composites to reduce transverse reinforcements. *Engineering Structures*, 2019. 201: p. 109826.

[9] Saghafi, M.H., et al. The effect of high-performance fiber-reinforced cementitious composites on the lateral behavior of reinforced concrete frames without seismic details. in *Structures*. 2020. Elsevier.

[10] Saghafi, M.H., et al. Application of HPFRCC in beam-column joints to reduce transverse reinforcements. in *Structures*. 2021. Elsevier.

[11] Saghafi, M.H., H. Shariatmadar, and A. Kheyroddin, Seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composites beam-column connection with high damage tolerance. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019. 13(1): p. 1-20.

[12] Al-Rousan, R.Z. and A. Sharma. Integration of FRP sheet as internal reinforcement in reinforced concrete beam-column joints exposed to sulfate damaged. in *Structures*. 2021. Elsevier.

[13] Sharma, R. and P.P. Bansal, Behavior of RC exterior beam column joint retrofitted using UHP-HFRC. *Construction and Building Materials*, 2019. 195: p. 376-389.

[14] Saghafi, M., H. Shariatmadar, and A. Kheyroddin, Experimental evaluation of mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites. *Concrete Research*, 2017. 9(2): p. 29-42.

[15] Davodikia, B., M.H. Saghafi, and A. Golafshar. Experimental investigation of grooving method in seismic retrofit of beam-column external joints without seismic details using CFRP sheets. in *Structures*. 2021. Elsevier.

[16] Behzad, S., M.H. Saghafi, and A. Golafshar, Optimum percentage of steel fibres of HPFRCC for reduction of transverse reinforcement in beam-column joints. *MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH*, 2022.

[17] Del Vecchio, C., et al., Seismic retrofit of real beam-column joints using fiber-reinforced cement composites. *J. Struct. Eng*, 2018. 144(5): p. 04018026.

[18] Khan, M.I., et al., Seismic behavior of beam-column joints strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 2018. 200: p. 103-119.

[19] Shaaban, I.G. and O.A. Seoud, Experimental behavior of full-scale exterior beam-column space joints retrofitted by ferrocement layers under cyclic loading. *Case studies in construction materials*, 2018. 8: p. 61-78.

[20] Shafaei, J., et al., Rehabilitation of earthquake damaged external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles. *Earthquake*

۳- استفاده از مصالح HPFRCC و FRCM در نمونه آسیب دیده فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه DNSJ-FRCM ضمن ایجاد محصورشدگی ذاتی هسته اتصال و بهبود مقاومت پیوستگی آرماتورهای طولی تیر سبب تغییر مود گسیختگی از شکست برشی به مفصل خمشی شده است.

۴- در نمونه بهسازی شده بهبود ظرفیت باربری و ایجاد حلقه‌های با سطح بزرگتر، پایدارتر و بدون زوال ظاهری مقاومت و کاهش سختی در مقایسه با نمونه های کنترلی مشاهده شده است. به طوری که میانگین بار حداکثر برای نمونه بهسازی شده به ترتیب ۲۸٪ و ۱۶٪ نسبت به نمونه‌های متناظر کنترلی با و بدون جزئیات لرزه‌ای ویژه افزایش داشته است. همچنین کمترین ضریب شکل‌پذیری برای نمونه بهسازی شده، نسبت به نمونه‌های کنترلی متناظر با و بدون جزئیات لرزه‌ای ویژه به ترتیب ۱۶٪ و ۱۰۷٪ افزایش یافته است. همچنین انرژی مستهلک در نمونه بهسازی شده به طور متوسط به میزان ۶۱٪ نسبت به نمونه کنترلی دارای جزئیات لرزه‌ای ویژه افزایش یافته است.

## ۵- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد

## ۶- مراجع

[1] Tapan, M., et al., Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 2013. 34: p. 606-628.

[2] Ates, S., et al., Damages on reinforced concrete buildings due to consecutive earthquakes in Van. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013. 53: p. 109-118.

[3] Augenti, N. and F. Parisi, Learning from construction failures due to the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2010. 24(6): p. 536-555.

[4] A.C. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19): An ACI Standard; Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19). 2020. American Concrete Institute.

[5] Institute, A.C. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard; Commentary on Building Code Requirements for

- joints retrofitted by stiffened angles and bars. *Earthquakes and Structures*, 2021. 20(5): p. 557.
- [36] Shoukry, M.E., A.M. Tarabia, and M.Z. Abdelrahman, Seismic retrofit of deficient exterior RC beam-column joints using steel plates and angles. *Alexandria Engineering Journal*, 2022. 61(4): p. 3147-3.۱۶۴
- [37] Shen, X., et al., Relocating plastic hinges in reinforced concrete beam-column joints by mechanically anchored diagonal bars. *Engineering Structures*, 2022. 251: p. 113468.
- [38] Kanchana Devi, A.K., et al., Novel non-invasive seismic upgradation strategies for gravity load designed exterior beam-column joints. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018. 18: p. 479-489.
- [39] Mosallam, A., Strength and ductility of reinforced concrete moment frame connections strengthened with quasi-isotropic laminates. *Composites Part B: Engineering*, 2000. 31(6-7): p. 481-497.
- [40] Ghobarah, A. and A. Said, Shear strengthening of beam-column joints. *Engineering Structures*, 2002. 24(7): p. 881-888.
- [41] D'Ayala, D., A. Penford, and S. Valentini. Use of FRP fabric for strengthening of reinforced concrete beam-column joints. in 10th Int. conference on structural faults and repair. London: July. 2003.
- [42] Ghobarah, A. and T. El-Amoury, Seismic rehabilitation of deficient exterior concrete frame joints. *Journal of composites for construction*, 2005. 9(5): p. 408-416.
- [43] Tsonos, A.G., Effectiveness of CFRP jackets in post-earthquake and pre-earthquake retrofitting of beam-column subassemblages. *Structural Engineering and Mechanics*, 2007. 27(4): p. 393-408.
- [44] Karayannis, C.G. and G.M. Sirkelis, Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing and epoxy resin injection. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008. 37(5): p. 769-790.
- [45] Le-Trung, K., et al., Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites. *Composites Part B: Engineering*, 2010. 41(1): p. 76-85.
- [46] Realfonzo, R., A. Napoli, and J.G.R. Pinilla, Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems. *Construction and Building Materials*, 2014. 54: p. 282-297.
- [47] Hadi, M.N. and T.M. Tran, Retrofitting nonseismically detailed exterior beam-column joints using concrete covers together with CFRP jacket. *Construction and Building Materials*, 2014. 63: p. 161-173.
- [48] Hadi, M.N. and T.M. Tran, Seismic rehabilitation of reinforced concrete beam-column joints by bonding with concrete covers and wrapping with FRP composites. *Materials and Structures*, 2016. 49(1-2): p. 467-485.
- [49] Agarwal, P., A. Gupta, and R.G. Angadi, Effect of FRP wrapping on axial behavior of concrete and cyclic behavior of external RC beam column joints. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014. 18(2): p. 566-573.
- [50] Garcia, R., et al., Seismic strengthening of severely damaged beam-column RC joints using CFRP. *Journal Engineering & Structural Dynamics*, 2017. 46(2): p. 291-316.
- [21] Torabi, A. and M.R. Maheri, Seismic repair and retrofit of RC beam-column joints using stiffened steel plates. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2017. 41(1): p. 13-26.
- [22] Devi, A.K.K., et al., Novel non-invasive seismic upgradation strategies for gravity load designed exterior beam-column joints. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2018. 18(2): p. 479-489.
- [23] Adibi ,M., et al., Seismic retrofit of external concrete beam-column joints reinforced by plain bars using steel angles prestressed by cross ties. *Engineering Structures*, 2017. 148: p. 813-828.
- [24] Sasmal, S. and S. Voggu, Strut-relieved single steel haunch bracing system for mitigating seismic damage of gravity load designed structures. *Journal of Structural Engineering*, 2018. 144(10): p. 04018167.
- [25] Zabihi, A., et al., Seismic retrofit of exterior RC beam-column joint using diagonal haunch. *Engineering Structures*, 2018. 174: p. 753-767.
- [26] Dang, C.-T. and N.-H. Dinh, Experimental study on structural performance of RC exterior beam-column joints retrofitted by steel jacketing and haunch element under cyclic loading simulating earthquake excitation. *Advances in Civil Engineering*, 2017. 2017.
- [27] Yang, Y., et al., Experimental and numerical study on seismic performance of deficient interior RC joints retrofitted with prestressed high-strength steel strips. *Engineering Structures*, 2019. 190: p. 306-318.
- [28] Campione, G., L. Cavaleri, and A. Failla, Flexural Behavior of External Beam-Column Reinforced Concrete Assemblages Externally Strengthened with Steel Cages. *ACI Structural Journal*, 2016. 113(5).
- [29] De Risi, M.T. and G.M. Verderame, Experimental assessment and numerical modelling of exterior non-conforming beam-column joints with plain bars. *Engineering Structures*, 2017. 150: p. 115-134.
- [30] Bindhu, K., N. Mohana, and S. Sivakumar, New Reinforcement Detailing for Concrete Jacketing of Nonductile Exterior Beam-Column Joints. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016. 30(1): p. 04014192.
- [31] Ruiz-Pinilla, J.G., et al., RC columns strengthened by steel caging: Cyclic loading tests on beam-column joints with non-ductile details. *Construction and Building Materials*, 2021. 301: p. 124105.
- [32] Khodaei, M., M.H. Saghafi, and A. Golafshar, Seismic retrofit of exterior beam-column joints using steel angles connected by PT bars. *Engineering Structures*, 2021. 236: p. 112111.
- [33] Shafaei, J., A. Hosseini, and M.S. Marefat, Seismic retrofit of external RC beam-column joints by joint enlargement using prestressed steel angles. *Engineering Structures*, 2014. 81: p. 265-288.
- [34] Maddah, A., A. Golafshar, and M.H. Saghafi, 3D RC beam-column joints retrofitted by joint enlargement using steel angles and post-tensioned bolts. *Engineering Structures*, 2020. 220: p. 110975.
- [35] Morshedijoo, G., A. Golafshar, and M. hossein Saghafi, Experimental investigation of damaged RC

- [66] Engindeniz, M., L.F. Kahn, and Z. Abdul-Hamid, Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art. *ACI structural journal*, 2005. 102(2): p. 1.
- [67] Barmi, C.G., M.H. Saghafi, and A. Golafshar. Seismic retrofit of severely damaged beam-column RC joints using HPFRCC. in *Structures*. 2023. Elsevier.
- [68] Garcia, R., et al., Seismic strengthening of severely damaged beam-column RC joints using CFRP. *Journal of Composites for Construction*, 2014. 18(2): p. 04013048.
- [69] Faleschini, F., et al., Repair of severely-damaged RC exterior beam-column joints with FRP and FRCM composites. *Composite Structures*, 2019. 207: p. 352-363.
- [70] Naaman, A. Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. in *Proc. 4th Int. RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Ann Arbor, University of Michigan. 2003.
- [71] Saghafi, M.H., H. Shariatmadar, and A. Kheyroddin, Experimental Study and Application of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites for Retrofitting Beam-Column Joints in Rigid-Framed Railway Bridges. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 2016. 2(1): (p. 33-51.
- [72] ASTM, A., C39/C39M-10 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. 2010. ASTM International: West Conshohocken, PA.
- [73] JSCE, Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC). , in *Concrete engineering series no. 82*. 2008.
- [74] , ۳۱۸ A.c. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard; Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14). 2014. American Concrete Institute.
- [75] Paulay, T. and M.N. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. 1992.
- of composites for construction, 2013. 18(2): p. 04013048.
- [51] zğür Yurdakul, Ö. and Ö. Avşar, Structural repairing of damaged reinforced concrete beam-column assemblies with CFRPs. *Structural Engineering and Mechanics*, 2015. 54(3): p. 521.۰۴۳-
- [52] Beydokhti, E.Z. and H. Shariatmadar, Strengthening and rehabilitation of exterior RC beam-column joints using carbon-FRP jacketing. *Materials and Structures*, 2016. 49(12): p. 5067-5083.
- [53] Lee, W.-T., Y.-J. Chiou, and M. Shih, Reinforced concrete beam-column joint strengthened with carbon fiber reinforced polymer. *Composite Structures*, 2010. 92(1): p. 48-60.
- [54] Esmaeeli, E., et al., A combination of GFRP sheets and steel cage for seismic strengthening of shear-deficient corner RC beam-column joints. *Composite Structures*, 2017. 159: p. 206-219.
- [55] Mostofinejad, D. and M. Hajrasouliha, 3D beam-column corner joints retrofitted with X-shaped FRP sheets attached via the EBROG technique. *Engineering Structures*, 2019. 183: p. 987-998.
- [56] Mostofinejad, D., et al., Innovative warp and woof strap (WWS) method to anchor the FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction and Building Materials*, 2019. 218: p. 351-364.
- [57] Ilia, E. and D. Mostofinejad, Seismic retrofit of reinforced concrete strong beam-weak column joints using EBROG method combined with CFRP anchorage system. *Engineering Structures*, 2019. 194: p. 300-319.
- [58] Tajmir-Riahi, A., et al., Effect of the EBROG method on strip-to-concrete bond behavior. *Construction and Building Materials*, 2019. 220: p. 701-711.
- [59] Obaidat, Y.T., G.A. Abu-Farsakh, and A.M. Ashteyat, Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 2019. 198: p. 313-322.
- [60] Allam, K., A.S. Mosallam, and M.A. Salama, Experimental evaluation of seismic performance of interior RC beam-column joints strengthened with FRP composites. *Engineering Structures*, 2019. 196: p. 109308.
- [61] Mahini, S.S. and H.R. Ronagh, Web-bonded FRPs for relocation of plastic hinges away from the column face in exterior RC joints. *Composite Structures*, 2011. 93(10): p. 2460-2472.
- [62] Kheyroddin, A., M. Saghafi, and S. Safakhah. Strengthening of historical masonry buildings with fiber reinforced polymers (FRP). in *Advanced Materials Research*. 2010. Trans Tech Publ.
- [63] Wang, G.-L., J.-G. Dai, and Y.-L. Bai, Seismic retrofit of exterior RC beam-column joints with bonded CFRP reinforcement: An experimental study. *Composite Structures*, 2019. 224: p. 111018.
- [64] Saghafi, M., Seismic performance of URM panels reinforced by FRP. MSc Structural thesis, Department of Civil Engineering, University of Semnan, 2009.
- [65] Ombres, L., Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material. *Composite Structures*, 2011. 94(1): p. 143-155.

# Rehabilitation of damaged RC exterior beam-column joints with the HPFRCC and FRCM materials

Pouya Elahi<sup>a</sup> and Mohammad Hossein Saghafi<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> M.Sc, Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

<sup>b</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

\*E-mail addresses: mh.saghafi@semnaniau.ac.ir and saghafimh@yahoo.com

## Abstract:

The reconstruction and modernization of impaired external beam-column connections in reinforced concrete constructions is presently a significant predicament for scholars and experts in the field. This predicament necessitates comprehensive research in order to formulate viable solutions and methodologies for the seismic restoration and retrofitting of these connections. Consequently, the main focus of this research lies in proposing a solution to improve the seismic performance of impaired connections under earthquake-induced loading. Within this specific context, it is of utmost importance to consider a comprehensive analysis of a total of three beam-column connections that were strategically positioned externally and scaled down to half their original size. These connections were then subjected to a series of cyclic lateral loading, which can be characterized by its repetitive nature and a distinct feature of an increasing amplitude. The objective of this experimental study was to evaluate the response and behavior of these connections under such loading conditions. Additionally, in order to establish a reliable basis for comparison, two control specimens were included in the testing program. These control specimens, which were meticulously preserved and remained undamaged, served as benchmarks against which the subjected specimens were compared and evaluated. One of these control samples possessed seismic details that were of a unique and distinctive nature, while the other control specimen lacked the presence of such special seismic details. It is of utmost importance to note that the purpose of conducting these tests was to evaluate and assess the efficacy and effectiveness of the seismic details in their ability to withstand and resist lateral loading under cyclic conditions. Furthermore, in addition to the aforementioned control specimens, one supplementary specimen was also included in the testing process. This additional specimen experienced a preliminary stage during which it was exposed to significant harm, following which it was subsequently exposed to the restoration of connections. This process of restoration involved the application and execution of materials known as High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC) and alongside the retrofitting of the specimens with Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and. The results and findings that were derived from the examination and analysis of the data obtained from these tests demonstrate and illustrate that the replacement and substitution of deteriorated concrete with HPFRCC substances leads to the transfer of the plastic hinge from the core of the connection, thereby establishing a flexural plastic hinge within the beam. The utilization of this methodology does not yield any unfavorable outcomes on the underlying connections, all the while enhancing the bond between the concrete and longitudinal reinforcement. As a result, the incorporation of these particular materials introduces a practical and feasible approach for amplifying the capacity of load-bearing, flexibility, energy dissipation, and stiffness of the individual components. Additionally, the average maximum load, ductility factor and energy dissipation for the rehabilitated specimen increased by an average of 16%, 17% and 56%, respectively, compared to the undamaged control specimen with special seismic detailing. This particular method exhibits a significant potential for enhancing the overall structural soundness and stability of constructions.

**Keywords:** Restored joints, Cyclic behavior, Beam-column connection, Damaged connections, Plastic hinge relocation.