

بهبود رفتار چرخه‌ای قاب‌های فاقد استاندارد لرزه‌ای بتن آرمه با استفاده از ورق‌های FRP

محمد حسین ثقفی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

چکیده

هدف این مقاله ارزیابی رفتار قاب‌های بتن آرمه آسیب‌پذیر (فاقد جزئیات لرزه‌ای)، بهسازی شده با روش تقویت برشی و خمشی اتصالات تیر-ستون با استفاده از ورق‌های FRP است. جهت ارزیابی روش بهسازی، رفتار قاب بهسازی شده با قاب‌های کنترلی با و بدون جزئیات لرزه‌ای ویژه مقایسه شده است. به این منظور در فاز اول تحقیق، با توجه به تمرکز عمده مطالعات پیشین بر اتصالات دو بعدی و عدم در نظر گرفتن شرایط واقعی شامل اثر دال و تیر عرضی در اتصالات، در راستای اعمال شرایط هندسی و محدودیت‌های اجرایی، در این تحقیق رفتار اتصالات با اثر دال و تیر عرضی، از طریق مطالعه آزمایشگاهی استخراج شده است. به این منظور ۲ نمونه آزمایشگاهی اتصال خارجی تیر-ستون بتنی با مقیاس ۱/۲ ساخته شده و تحت بارگذاری سیکلی با دامنه افزایشی واقع شده‌اند. نمونه‌ها شامل یک نمونه کنترلی بدون جزئیات لرزه‌ای ویژه و یک نمونه دیگر شامل اتصال فاقد جزئیات لرزه‌ای است که با ورق‌های FRP بهسازی شده است. در فاز دوم تحقیق، اتصالات مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی فاز اول تحقیق مقایسه و صحت‌سنجی شده و با استفاده از نتایج صحت‌سنجی و کالیبراسیون رفتار اتصالات، قاب‌های ۵ و ۱۰ طبقه کنترلی و بهسازی شده در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی شده و رفتار چرخه‌ای، شکل‌پذیری و استهلاک انرژی تمامی قاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج رفتار اتصالات و قاب‌های بهسازی شده، نشان‌دهنده عدم افت مقاومت، رفتار پایدار چرخه‌ای، کاهش اثرات پینچینگ، بهبود سختی و ظرفیت شکل‌پذیری ناشی از تغییر مود رفتاری از شکست برشی اتصالات به تشکیل مفاصل پلاستیک خمشی در تیرها، بوده است.

واژه‌های کلیدی: منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی، اتصالات خارجی تیر-ستون، اثر تیر عرضی و دال، مدل‌سازی عددی، تحلیل غیر خطی افزایشی.

* نویسنده مسئول: mh.saghafi@semnaniau.ac.ir

۱- مقدمه

مقاومت و استهلاک انرژی به دلیل افزایش سختی سازه سبب جذب نیروی بزرگتر در هنگام زلزله می‌گردد. از طرفی تداخل با کاربری و بزرگ شدن ابعاد المان‌ها از دیگر معایب این روش بهسازی است.

در دسته ای دیگر از مطالعات جهت بهسازی اتصالات از ورق‌های FRP، استفاده شده است [23-36]. ورق‌های FRP در بهسازی اتصالات بتنی به دلیل مزایایی مانند بالا بودن نسبت مقاومت به وزن، حداقل تغییر در ابعاد هندسی المان‌ها، حداقل دخالت در کاربری سازه، امکان تقویت خمشی و برشی به صورت جداگانه متناظر با جهت قرارگیری الیاف مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این مصالح در بهسازی لرزه‌ای اتصالات بتنی سبب ارتقای عملکرد چرخه ای گردیده است. از طرف دیگر، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های استفاده از مصالح FRP در مطالعات پیشین محققین مشکل جداشدگی FRP و چسبندگی آن به بتن است. با توجه به آنکه عمده مطالعات انجام شده در بهسازی اتصالات به صورت دوبعدی و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های هندسی و اجرایی در شرایط واقعی ناشی از وجود تیر عرضی و دال سقف بوده است لذا در این مقاله در راستای درک بهتر و انتخاب روش متناسب با شرایط اجرایی (اتصالات دارای تیر عرضی و دال) اقدام به بهسازی اتصالات فاقد جزئیات لرزه‌ای با ورق‌های FRP و تأثیر آن بر روی قاب‌های چند طبقه شده است. به این منظور در فاز اول تحقیق، جهت دستیابی به رفتار اتصالات بدون جزئیات لرزه‌ای و رفتار اتصالات بهسازی شده با اثر دال و تیر عرضی، ۲ نمونه آزمایشگاهی اتصال خارجی تیر-ستون بتنی با مقیاس ۱/۲ ساخته شده و تحت بارگذاری سیکلی با دامنه افزایشی واقع شده‌اند. در فاز دوم تحقیق، اتصالات کنترلی و بهسازی شده با استفاده از نرم افزار OpenSees مدل‌سازی و با نتایج آزمایشگاهی فاز اول تحقیق مقایسه و صحت‌سنجی انجام شده است. سپس با استفاده از نتایج صحت‌سنجی و کالیبراسیون اتصالات، قاب‌های ۵ و ۱۰ طبقه در سه حالت شامل ۱- با جزئیات لرزه‌ای ویژه ۲- فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه ۳- فاقد جزئیات لرزه‌ای ویژه و بهسازی شده با ورق‌های FRP در نرم افزار OpenSees مدل‌سازی شده است، جهت بررسی رفتار جانبی غیرخطی قاب‌های مذکور از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی چرخه‌ای افزاینده، استفاده شده است و رفتار چرخه ای و استهلاک انرژی تمامی قاب‌ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

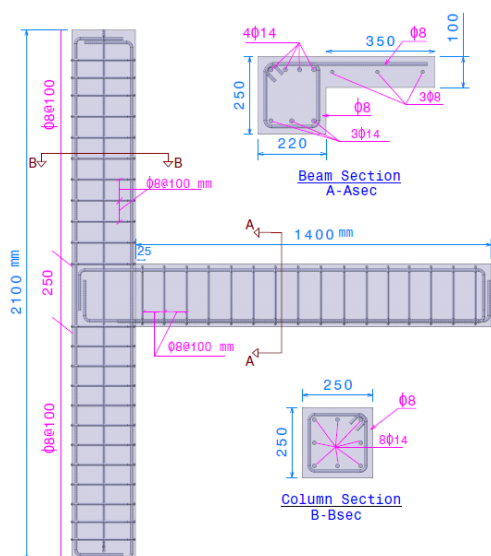
زلزله به‌عنوان یکی از بلاای طبیعی همواره سبب خسارت‌های جانی و مالی شده است. وقوع زمین لرزه‌های متعدد در سال‌های اخیر در کشورهای ایران، پاکستان، ترکیه، چین، اندونزی و ایتالیا سبب ایجاد حوادث غم‌انگیز و از دست رفتن جان انسان‌های زیادی شده است، به طوری که در بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ حدود ۴۰۰ هزار نفر جان خود را از دست داده‌اند. تجربیات بدست آمده از زلزله‌های گذشته و مطالعات آزمایشگاهی انجام شده موید آسیب‌پذیری اتصالات تیر-ستون و اهمیت نقش جزئیات آرماتورگذاری عرضی در افزایش محصورشدگی، بهبود مقاومت برشی، و جلوگیری از کماتش آرماتورهای طولی در اعضای خمشی قاب‌های بتنی است. به همین دلیل عملکرد اعضای خمشی بتنی به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر جزئیات و فواصل این آرماتورها در ناحیه اتصال قرار دارد. عدم توسعه آئین‌نامه‌های لرزه‌ای تا قبل از سال ۱۹۷۰ منجر به ساخت سازه‌های بتنی آسیب‌پذیر گردیده است. این سازه‌ها به دلیل عدم توجه به جزئیات لرزه‌ای شامل عدم اجرای آرماتورهای عرضی در ناحیه هسته اتصال، عدم رعایت طول مهاری آرماتورهای طولی پایین تیر و عدم رعایت فواصل آرماتورهای عرضی در ناحیه مفصل پلاستیک تیر و ستون‌ها همواره دچار فروریزش جزئی یا کلی در طی رخداد‌های لرزه ای شده‌اند علاوه براین با پیشرفت آئین‌نامه‌ها در جهت بهبود عملکرد لرزه ای سازه‌ها الزاماتی جدیدی در طرح و اجرای سازه‌های بتنی مطرح گردید. کاربرد این الزامات در نواحی اتصالات تیر و ستون سبب افزایش تراکم آرماتورها و مشکلات اجرایی در بتن‌ریزی می‌گردد که این موضوع موجب کیفیت پایین بتن ناحیه هسته اتصالات گردیده است. زلزله‌های اخیر در کشورهای در حال توسعه نشان داده است که سازه‌های جدید با وجود طراحی براساس آئین‌نامه‌های نوین به دلیل ضعف در اجرا ناشی از کیفیت پایین بتن در هسته اتصالات کماکان دچار آسیب‌های جدی شده است. بهسازی اتصالات نسبت به سایر اعضای سازه ای مانند تیر و ستون، به دلیل وجود دال‌ها و المان‌های مستعد آسیب در اطراف آن دارای محدودیت و پیچیدگی اجرایی بیشتری است. مطالعات متعددی در خصوص بهسازی اتصالات انجام شده است [1-22]. برخی از محققین با استفاده از ژاکت‌های بتنی و فولادی اقدام به بهسازی اتصالات نموده‌اند استفاده از این ژاکت‌ها با وجود افزایش

ها بزرگتر از تیرها در این اتصالات است (شکل ۱). نمونه بهسازی شده با نام RNSJ است، که مشخصات ابعاد و آرماتورگذاری آنها منطبق بر نمونه دارای نقص NSJ است. روش های متعددی برای طراحی و کاربرد ورق های FRP در تقویت خمشی و برشی اتصالات در تاریخچه تحقیقات ارائه شده است. روش طراحی مورد استفاده در این مقاله برای تقویت برشی اتصال روش ساده شده تسونو و همکاران [۳۷] است. در این تحقیق از الیاف کربن به صورت تک جهت با ویژگی های مکانیکی مطابق جدول ۲ ارائه شده است نحوه تقویت با FRP در (شکل ۱-ج) نمایش داده شده است.

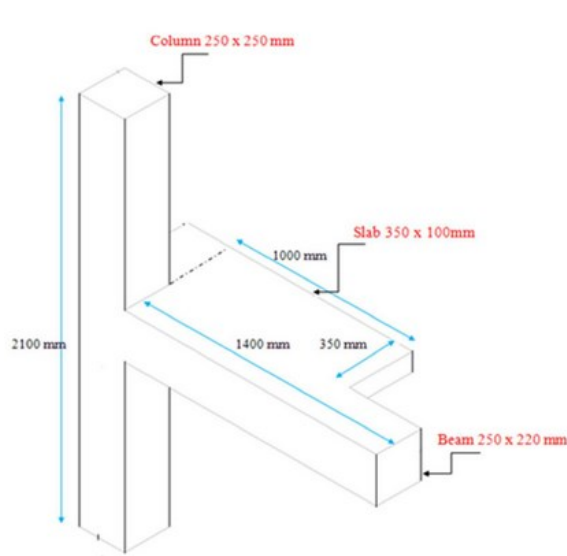
۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه های مورد آزمایش

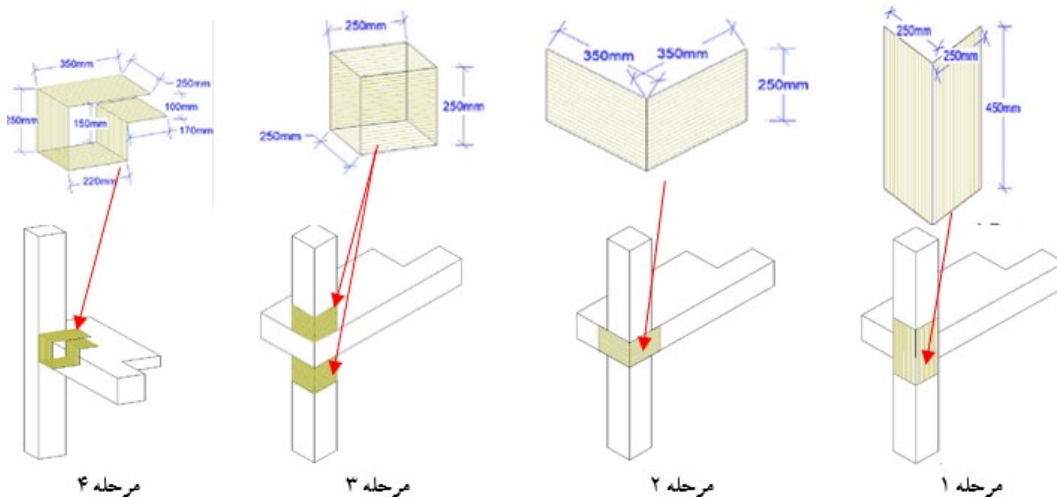
در این مطالعه مطابق با جدول ۱ و شکل ۱ در مجموع ۲ نمونه در مقیاس ۱/۲ ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. یک مورد از آنها، شامل نمونه ی "NSJ"، اتصال تیر-ستون RC بهسازی نشده است که به عنوان نمونه کنترلی در نظر گرفته شده است. این نمونه معرف اتصالات طراحی و ساخته شده قبل از ۱۹۷۰ است، که در آن هیچ گونه آرماتور عرضی در ناحیه هسته اتصال استفاده نشده و فواصل آرماتور عرضی در تیر و ستون نیز به مقدار $d/2$ (d ارتفاع موثر تیر) افزایش پیدا کرده است همچنین مقاومت خمشی ستون



ب- جزئیات آرماتورگذاری



الف- نمای سه بعدی اتصال مورد بررسی



ج- نحوه تقویت با FRP در نمونه بهسازی شده

شکل ۱- الگوی آرماتورگذاری اتصال فاقد جزئیات لرزه ای

جدول ۱- جزئیات نمونه های مورد آزمایش

نمونه	روش مقاوم سازی	فولاد عرضی هسته اتصال	فولاد طولی ستون	فولاد طولی تیر	فولاد عرضی تیر	فولاد عرضی ستون
NSJ	-	-	8Φ14 (ratio=1.97%)	4Φ14 top 3Φ14 bottom	Φ10@100	Φ10@100
RNSJ	ورق های FRP	-	-	-	-	-

جدول ۲- خصوصیات مصالح FRP

مدول الاستیسیته	مقاومت کششی نهایی	کرنش نهایی	ضخامت
(Gpa)	(Mpa)	(%)	(mm)
۲۴۰	۴۹۵۰	۱/۵	۰/۱۶۷

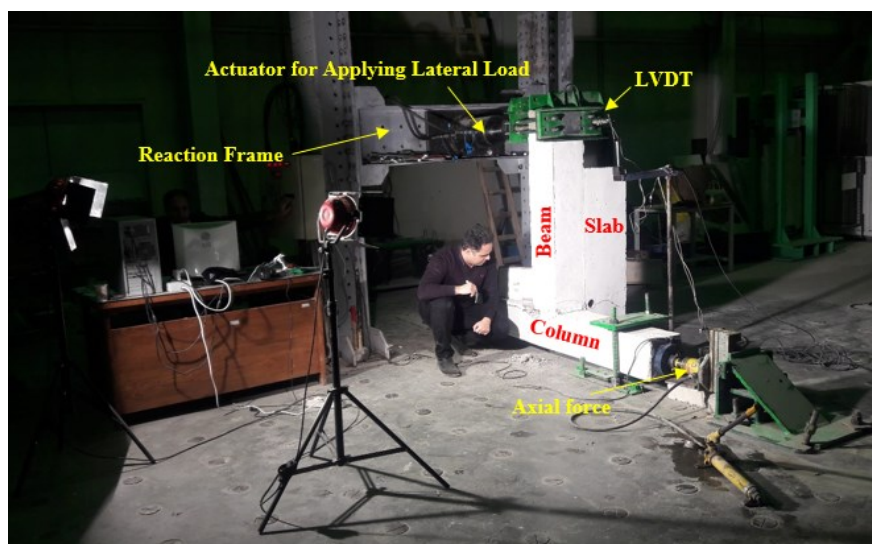
CFRP:QUANTOM* Wrap 300C

ارتفاع ستون ۲۱۰۰ میلی متر، طول تیر از بر ستون ۱۴۰۰ میلی متر، طول آنها بر اساس نقاط عطف در نظر گرفته شده است. برای همه نمونه ها بارگذاری محوری ثابت در طول آزمایش به اندازه ۲۰۰ کیلونیوتن معادل $0.1f_{cc} Ag$ با کنترل نیرو به ستون وارد می شود. بعد از اعمال بار محوری ثابت برای بارگذاری جانبی رفت و برگشتی از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن در انتهای تیر با کنترل تغییرمکان و تاریخچه بارگذاری چرخه ای مطابق شکل (۲-ج) استفاده شده است. فاصله محل اعمال نیروی جانبی به تیر تا بر ستون ۱۲۵۰ میلی متر است. تجهیزات مورد استفاده جهت ثبت نیرو و تغییرشکل در محل اعمال نیرو شامل یک نیرو سنج S شکل و یک عدد حسگر LVDT می باشد.

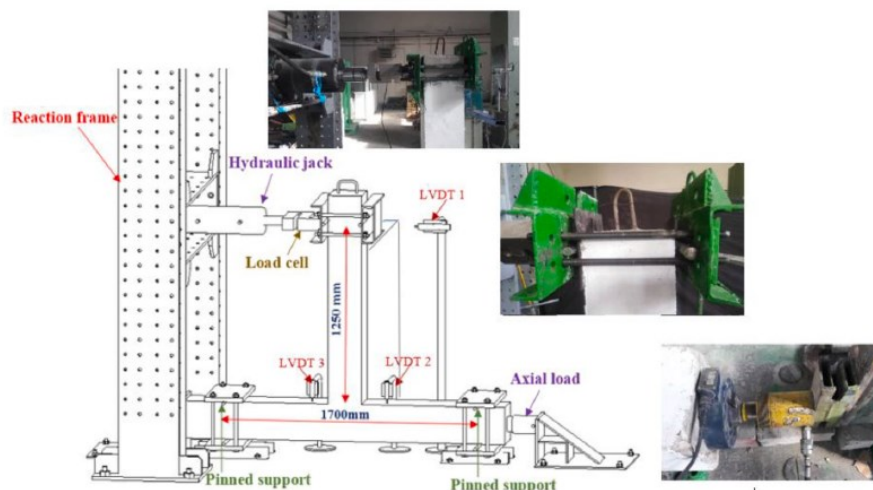
ارتفاع ستون ۲۱۰۰ میلی متر، طول تیر از بر ستون ۱۴۰۰ میلی متر، طول آنها بر اساس نقاط عطف در نظر گرفته شده است. برای همه نمونه ها ابعاد مقاطع و درصد آرماتورهای طولی تیر، ستون و دال یکسان است. مقاومت مشخصه بتن برابر با ۲۵ مگاپاسکال و میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه استوانه ای نمونه ها ۲۵/۴ مگاپاسکال اندازه گیری شده است. میانگین مقاومت تسلیم آرماتورهای با قطر ۸ و ۱۴ میلی متر به ترتیب ۳۷۰ و ۴۷۰ مگاپاسکال اندازه گیری شده است، همچنین میانگین مقاومت نهایی این آرماتورهای به ترتیب ۴۵۰ و ۶۹۰ مگاپاسکال اندازه گیری شده است.

۲-۲- چیدمان آزمایش و تجهیزات

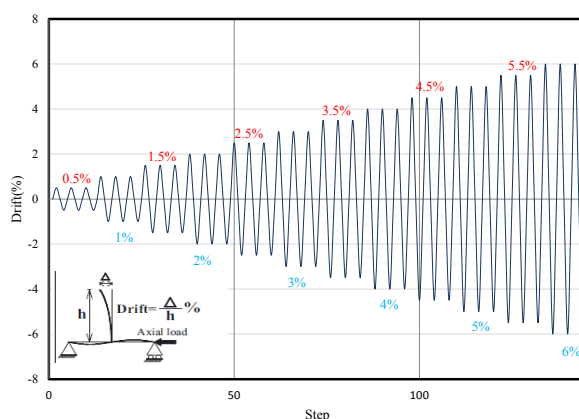
ست آپ و تجهیزات آزمایش در شکل (۲-الف و ب) آورده شده



الف- نمای کلی آزمایش



ب- جزئیات تجهیزات آزمایش



ج- تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای

شکل ۲- چگونگی آزمایش و شرایط تکیه گاهی نمونه‌ها

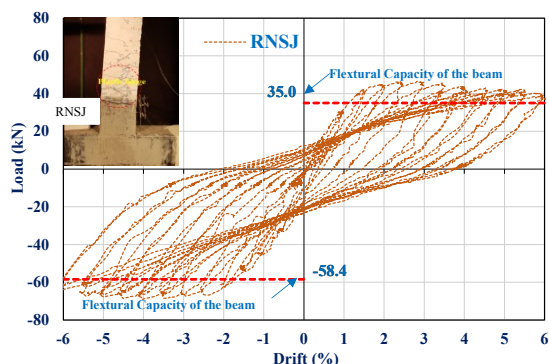
۳- بررسی و نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- نتایج بار-دریفت چرخه‌ای اتصالات

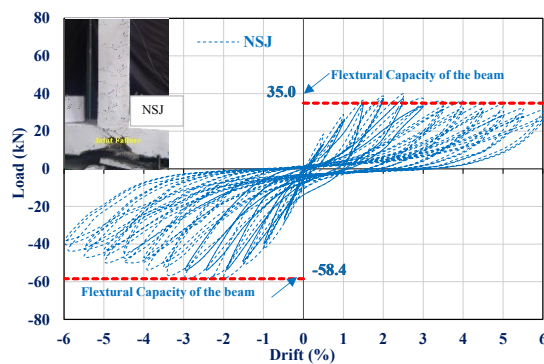
وقوع مکانیزم‌های غیرشکل‌پذیر شامل لغزش آرماتورها، ترک‌های قطری و جداشدگی ورق‌های FRP مکانیزم مفصل پلاستیک به صورت خمشی در تیر ایجاد شده است. رفتار شکل‌پذیر و بدون افت قابل ملاحظه مقاومت تا دریفت ۶٪ این نمونه به محصورشدگی کامل هسته اتصال نسبت داده می‌شود. در این نمونه به دلیل تقویت خمشی ناشی از قرارگیری ورق‌های FRP بر روی سطوح بالا و پایین تیر افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه کنترلی نیز مشاهده شده است. مشخصات بدست آمده از منحنی پوش برای اتصالات مورد آزمایش به تفکیک جهت بارگذاری در جدول ۳ ارائه شده است. جهت تعیین تغییر مکان‌های تسلیم و نهایی از روش پیشنهادی پائولی و پرستلی [۳۸] محاسبه شده است. بهبود مشخصات رفتاری نمونه بهسازی شده نسبت به نمونه‌های کنترلی در جدول ۳ قابل مشاهده است. به طوریکه کمترین ضریب

مهم‌ترین مشخصه برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اجزای سازه‌ای شامل اتلاف انرژی و ظرفیت شکل‌پذیری است که با استفاده از منحنی‌های چرخه‌ای نیرو-دریفت و منحنی پوش مطابق شکل‌های ۳ و ۴ به دست آمده است. لازم به توضیح است، در ترسیم منحنی پوش از نیروی متناظر با جابجایی حداکثر در سیکل اول هر دریفت استفاده شده است. همچنین در شکل ۳-د و ۳-ه مکانیزم شکست اتصالات نشان داده شده است. در نمونه NSJ به دلیل ضعف هسته اتصال ناشی از نبود آرماتورهای عرضی پدیده شکست برشی و بینجینگ در منحنی چرخه‌ای مشاهده شده است. در این نمونه رفتار غیرشکل‌پذیر با کاهش پیوسته سختی و مقاومت مشاهده شده است. در نمونه بهسازی شده RNSJ به دلیل جلوگیری از

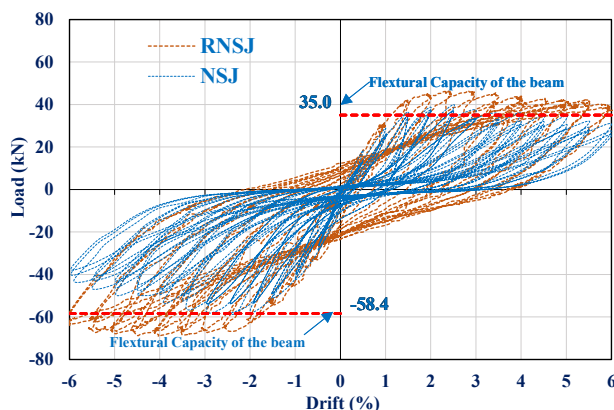
شکل پذیری برای نمونه بهسازی شده نسبت به نمونه غیر لرزه ای ۶۷٪ افزایش نشان داده است.



ب- نمونه بهسازی شده فاقد جزئیات لرزه ای (RNSJ)



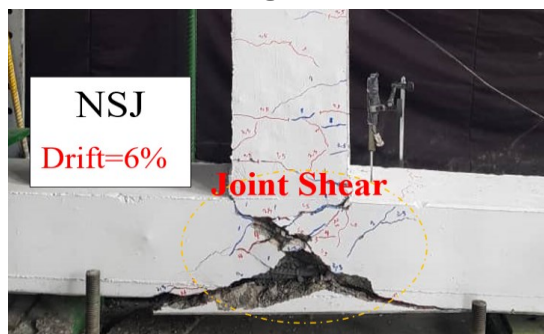
الف- نمونه کنترلی فاقد جزئیات لرزه ای (NSJ)



ج- مقایسه منحنی هیستریزس نمونه بهسازی شده با نمونه کنترلی

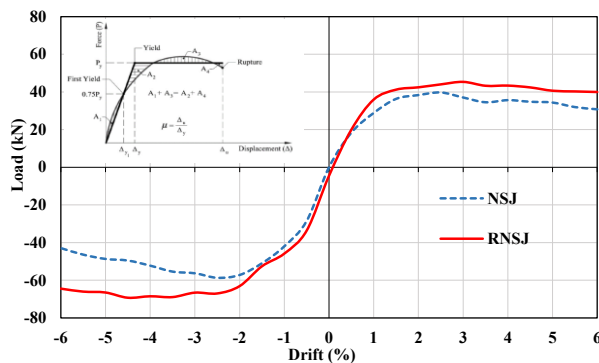


۵- مکانیزم شکست در نمونه کنترلی نمونه بهسازی شده



د- مکانیزم شکست در نمونه کنترلی

شکل ۳- منحنی هیستریزس و آسیب در نمونه ی کنترلی و بهسازی شده



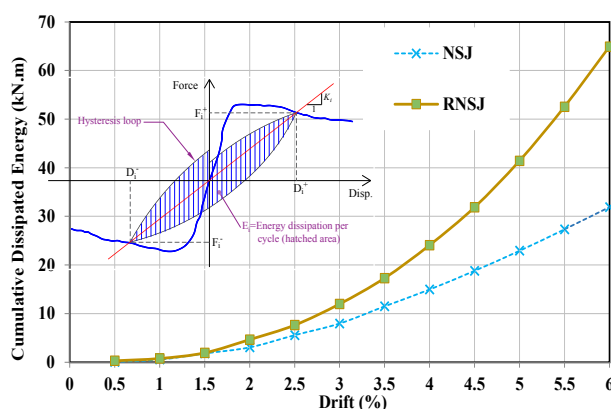
شکل ۴- مقایسه منحنی های پوش نیرو - جابه جایی نمونه های کنترلی و بهسازی شده

جدول ۳- بار حداکثر آزمایش چرخه‌ای و شکل‌پذیری در جهت مثبت و منفی بارگذاری

نام نمونه ها	بار حداکثر (kN)		تغیر مکان نقطه تسلیم (mm)		تغیر مکان نهایی متناظر با ۲۰٪ افت بار حداکثر (mm)		ضریب شکل‌پذیری	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
NSJ	۳۹/۶	۵۸/۴	۱۹/۶	۲۶/۱	۸۵/۰	۸۴/۰	۴/۳۳	۳/۲۳
RNSJ	۴۴/۳	۶۷/۸	۱۴/۹	۱۹/۲	۱۱۵/۷	۱۰۳/۹	۷/۷۶	۵/۴۰

۳-۲- ظرفیت استهلاک انرژی

برای محاسبه استهلاک انرژی در یک دریفتمشخص از سطح محصور داخل حلقه‌های چرخه‌ای آن استفاده شده است. مجموع انرژی مستهلک شده در سیکل‌های متوالی برابر با انرژی مستهلک شده تجمعی است. انرژی مستهلک شده نمونه کنترلی و بهسازی شده تجمعی نمونه‌های مورد آزمایش در شکل ۵ مقایسه شده است. انرژی مستهلک شده نمونه بهسازی شده نسبت به نمونه کنترلی غیرلرزه‌ای ۶۰٪ افزایش داشته است. در نمونه‌های بهسازی شده به دلیل تغییر مود گسیختگی از شکست برشی هسته اتصال به تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیر میزان انرژی مستهلک شده بالاتر از نمونه کنترلی است.



شکل ۵- ظرفیت استهلاک انرژی چرخه‌ای

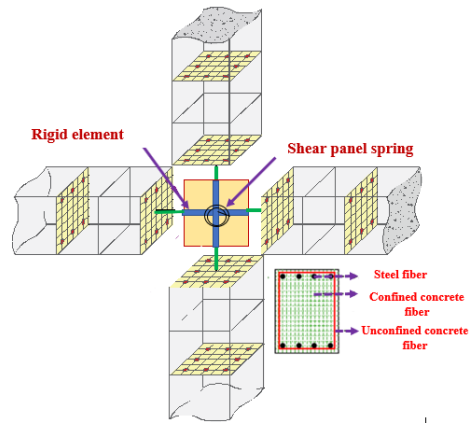
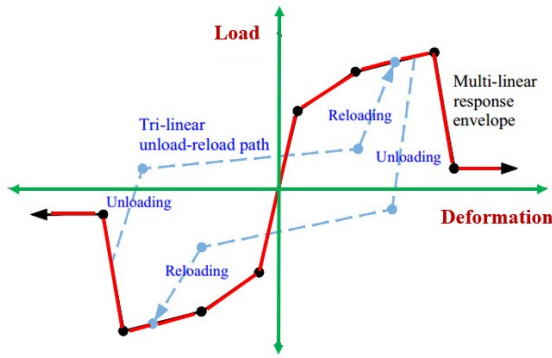
۴- مدل‌سازی و صحت‌سنجی اجزای محدود

برای مدل‌سازی رفتار چرخه‌ای نمونه‌ها از نرم‌افزار کد باز OpenSees استفاده شده است در این نرم‌افزار جهت مدل‌سازی از المان‌های غیرخطی dispBeamColumn، با مقطع فایبر برای تیرها و ستون‌ها و نیز از المان فنر غیرخطی با طول صفر و مدل‌های پیشنهادی مطالعات سیفی و همکاران برای مدلسازی نواحی

اتصالات مطابق شکل (۶-الف) استفاده شده است.

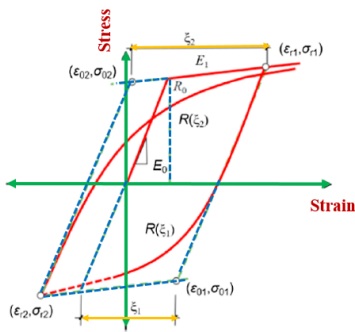
با توجه به آج‌دار بودن و طول مهارهای کافی با قلاب برای آرماتورهای طولی تیر در داخل هسته اتصال اثرات لغزش آرماتورها ناچیز بوده و در مدل عددی لحاظ نشده است. در مدل سازی FEA، برای المان فنر غیرخطی با طول صفر از مدل مواد "Pinching4" با قابلیت در نظر گرفتن کاهش سختی باربرداری، کاهش سختی بارگذاری مجدد و کاهش مقاومت مطابق شکل (۶-ب) استفاده شده است. برای مدل سازی رفتار مصالح بتن، از مدل مصالح «Concrete01» برای مدل سازی بتن غیرمحصور و محصور شده با آرماتور عرضی بر اساس مدل کنت اسکات پارک استفاده شده است [۱۹]، رابطه تنش- کرنش منوتونیک و چرخه‌ای این مدل به صورت تیپ در شکل‌های (۶-ج و ۶-د) نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی بتن محصور شده با ورق‌های FRP، از مدل مصالح ConfinedConcrete01 بر اساس مطالعات براگا و لترزا در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است [۲۰]. این مدل قادر است اثرات محصورشدگی بتن ناشی از دورپیچ شدن مقطع با کامپوزیت‌های FRP را در رفتار تنش- کرنش بتن در نظر بگیرد.

از مدل مصالح Steel02 جهت شبیه‌سازی رفتار مصالح آرماتورهای فولادی استفاده شده است. مطابق شکل (۶-ه) این مدل قابلیت در نظر گرفتن اثر پوشینگرو سخت‌شوندگی کرنش به صورت ایزوتروپیک را دارد. برای استخراج پارامترهای مدلسازی عددی از نتایج آزمایشات اتصالات تیر-ستون خارجی کنترلی و بهسازی شده استفاده شده است. نتایج منحنی‌های رفتار چرخه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی در شکل ۷ با یکدیگر مقایسه شده است. که بیانگر انطباق مناسب رفتار مدل عددی با آزمایشگاهی است.

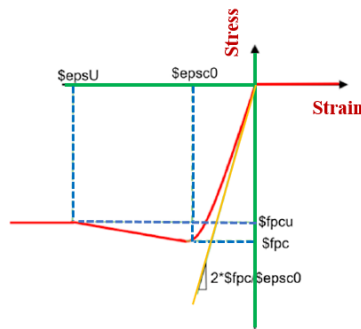


الف-مدل اجزای محدود

اتصالات

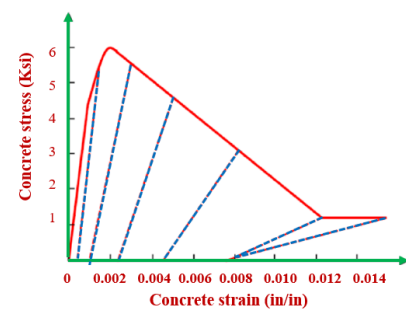


ه- پارامترهای مدل مصالح Steel02



د- پارامترهای مدل مصالح

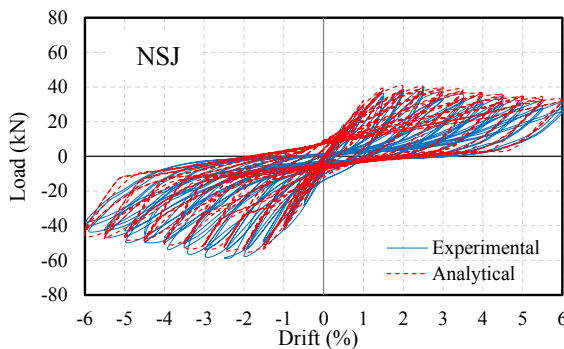
Concrete01



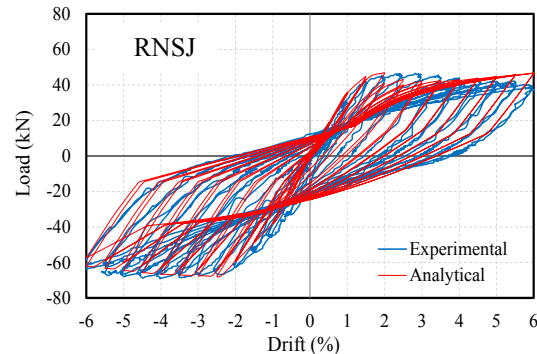
ج- تیب رفتار چرخه ای مصالح

Concrete01

شکل ۶-مدلسازی اجزای محدود



ب) نمونه کنترلی



الف) نمونه بهسازی شده

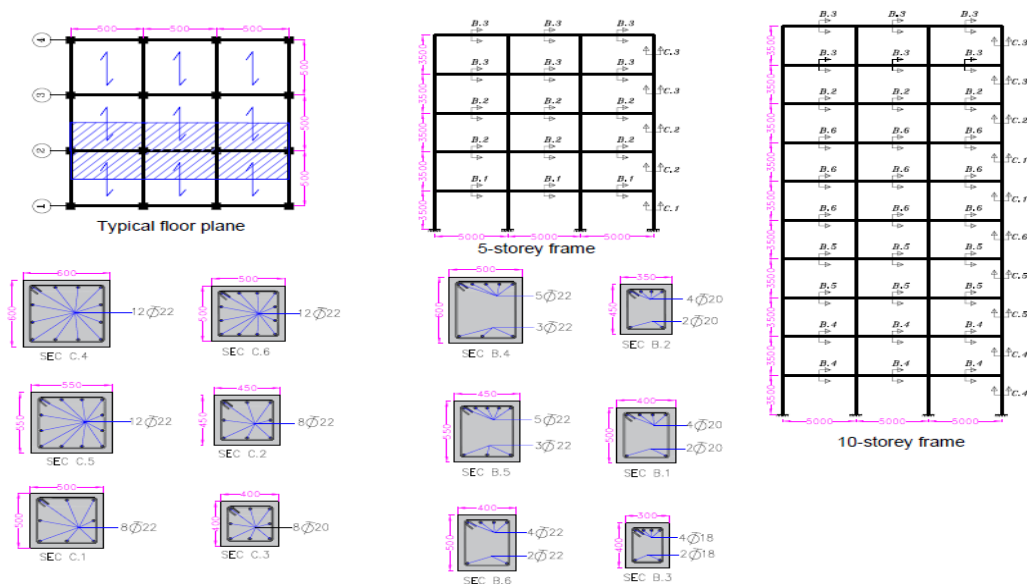
شکل ۷-مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی اتصالات تحت بار چرخه ای

سازی شده است، جهت بررسی رفتار جانبی غیرخطی قاب های مذکور از تحلیل های استاتیکی غیرخطی چرخه ای افزاینده، استفاده شده است و رفتار چرخه ای و استهلاک انرژی تمامی قاب ها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. مشخصات هندسی و مقاطع قاب های مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. سیستم سازه ای از نوع قاب خمشی بتنی با دیافراگم صلب است.

۵- بررسی نتایج تحلیل استاتیکی غیر خطی تحت بارگذاری جانبی چرخه ای

با استفاده از نتایج صحت سنجی و کالیبراسیون اتصالات، قاب های ۵ و ۱۰ طبقه در سه حالت شامل ۱- دارای جزئیات لرزه ای ویژه ۲- فاقد جزئیات لرزه ای ویژه ۳- فاقد جزئیات لرزه ای ویژه و بهسازی شده با ورق های FRP در نرم افزار OpenSees مدل

در جدول ۴ مشخصات و نحوه نام‌گذاری قاب‌های مختلف ارائه شده است.

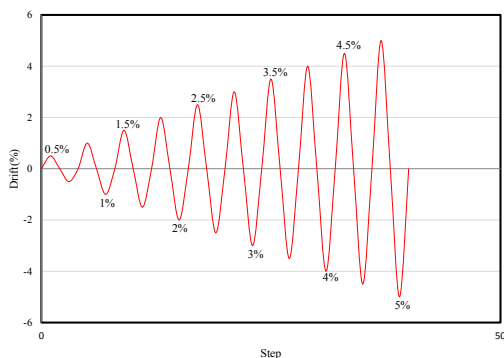


شکل ۸- پلان سازه و قاب‌های انتخاب شده و مقاطع آن

جدول ۴- فرضیات و جزئیات مدل سازی قاب‌ها

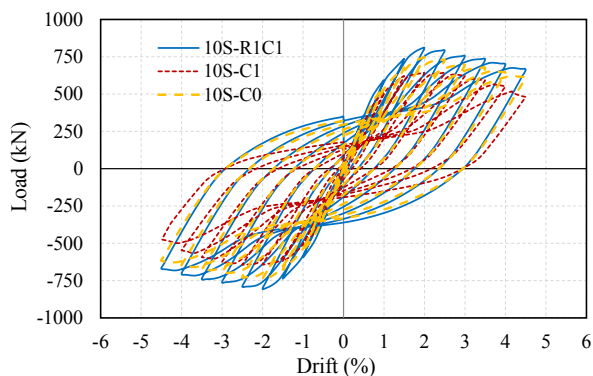
تعداد طبقات		نوع قاب	ردیف
۱۰ طبقه	۵ طبقه		
10S-C0	5S-C0	قاب بتنی با جزئیات لرزه ای ویژه	۱
10S-C1	5S-C1	قاب بتنی فاقد جزئیات لرزه ای (بدون آرماتور عرضی هسته اتصالات و با فاصله خاموت $d/2$ در تیرها و ستون‌ها)	۲
10S-R1C1	5S-R1C1	قاب بتنی فاقد جزئیات لرزه ای بهسازی شده با FRP در نواحی اتصالات	۳

تمامی طبقات صورت گرفته است در حالی که در قاب‌های ۱۰ طبقه توزیع یکنواخت مفاصل پلاستیک در تمام طبقات رخ نداده است توزیع یکنواخت آسیب در قاب‌های ۵ طبقه نسبت به قاب ۱۰ طبقه سبب بهبود موثرتر روش‌های بهسازی در این قاب‌ها بوده است.

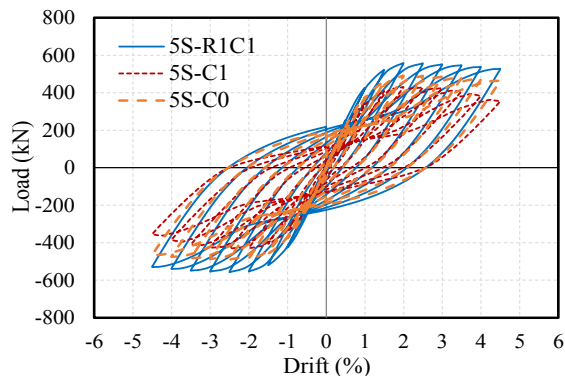


شکل ۹- تاریخچه بار چرخه‌ای وارد بر قاب‌ها

برای تحلیل استاتیکی غیرخطی چرخه‌ای با دامنه افزایشده قاب‌ها تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای با الگوی نشان داده شده در شکل ۹ قرار گرفته است. نتایج برش پایه-دریفت بام قاب‌های مورد مطالعه، تحت این بارگذاری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان داده است استفاده از ورق‌های FRP در ناحیه اتصالات، تاثیر بسیار مطلوبی در ارتقای عملکرد لرزه‌ای قاب‌های کنترلی ۵ و ۱۰ طبقه داشته است. عملکرد مطلوب در قاب‌های بهسازی شده به دلیل عدم تشکیل مفصل برشی و آسیب در هسته اتصالات و تغییر مود رفتاری قاب‌ها به تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیرها و پای ستون‌های طبقه اول بوده که موجب افزایش استهلاک انرژی و رفتار چرخه‌ای پایدار قاب‌ها شده است. در قاب‌های ۵ طبقه به دلیل تاثیر مود اول ارتعاش در رفتار جانبی توزیع مفاصل پلاستیک خمشی به صورت تقریباً یکنواخت در

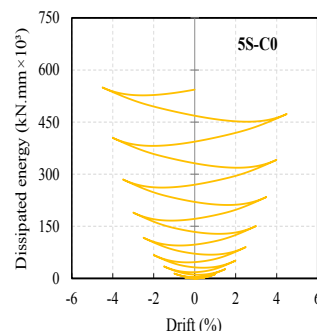
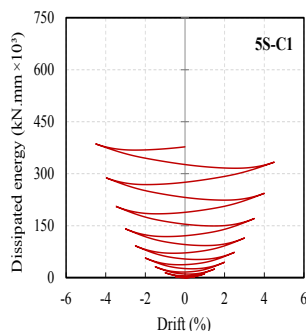
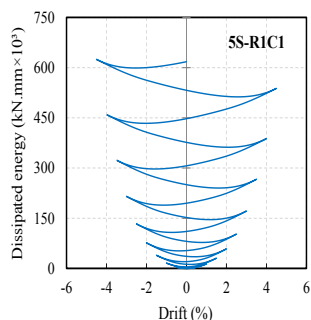


ب- قاب های ۱۰ طبقه

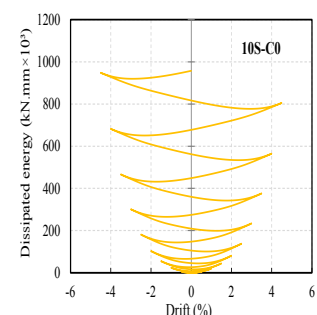
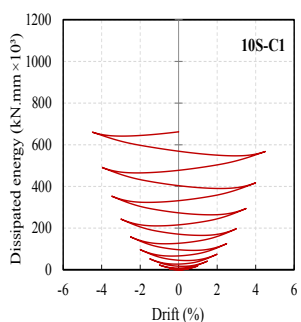
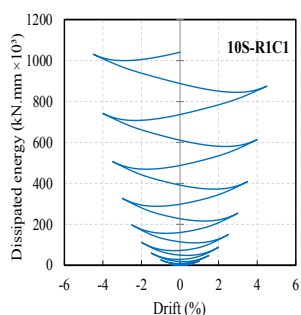


الف- قاب های ۵ طبقه

شکل ۱۰- مقایسه منحنی چرخه ای قاب های ۵ و ۱۰ طبقه با قاب های کنترلی



الف- قاب های ۵ طبقه



ب- قاب های ۱۰ طبقه

شکل ۱۱- میزان استهلاك انرژی در دريافت های مختلف برای قاب ها

در شکل ۱۱ میزان استهلاك انرژی تجمعی در دریافت های مختلف

برای قاب های ۵ و ۱۰ طبقه کنترلی و بهسازی شده با یکدیگر

مقایسه شده است. ملاحظه شده است در دریافت ۴٪ ظرفیت

استهلاك انرژی تجمعی قاب های ۵ و ۱۰ طبقه بهسازی شده با

ورق های FRP، به ترتیب به میزان ۶۳٪ و ۵۵٪ نسبت به قاب های

کنترلی متناظر فاقد جزئیات لرزه ای افزایش یافته است. همچنین

این پارامتر در قاب های بهسازی شده، ۵ و ۱۰ طبقه با ورق های

FRP به ترتیب به میزان ۱۴٪ و ۹٪ نسبت به قاب کنترلی دارای

جزئیات لرزه ای افزایش نشان داده است

۶- نتایج

در این مقاله، در راستای اعمال شرایط هندسی و محدودیت های

اجرایی، رفتار اتصالات با اثر دال و تیر عرضی، از طریق مطالعه

آزمایشگاهی استخراج شده است. نمونه های آزمایشگاهی با مقیاس

۱/۲ ساخته شده و تحت بارگذاری سیکلی با دامنه افزایشی واقع

شده اند. سپس با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به مطالعه عددی،

در قاب‌های بهسازی شده، ۵ و ۱۰ طبقه با ورق‌های FRP به ترتیب به میزان ۱۴٪ و ۹٪ نسبت به قاب کنترلی دارای جزئیات لرزه ای افزایش نشان داده است

۷- مراجع

- [1] 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.
- [2] han, 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.
- [3] Beschi, C., et al., HPFRC jacketing of non seismically detailed RC corner joints. *Journal of Earthquake Engineering*, 2015. 19(1): p. 25-47.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Tsonos, A.-D.G., Performance enhancement of R/C building columns and beam-column joints through shotcrete jacketing. *Engineering Structures*, 2010. 32(3): p. 726-740.
- [7] Wang, Y.-C. Reinforced concrete jacketing for seismic upgrading of RC frames with poor reinforcing details in beam-column joints. in *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2012. International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [8] 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*, 2014. 30(1): p. 04014192.
- [9] Arzeytoon, A., A. Hosseini, and A. Goudarzi, Seismic rehabilitation of exterior RC beam-column joints using steel plates, angles, and posttensioning rods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2014. 30(1): p. 04014200.
- [10] 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.
- [11] Adibi, M., et al., Seismic retrofit of external concrete beam-column joints reinforced by plain

قاب های ۵ و ۱۰ طبقه در نرم افزار OpenSees پرداخته شده است. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است.

-در اتصال کنترلی فاقد جزئیات لرزه ای NSJ به علت عدم وجود آرماتورهای عرضی ستون در ناحیه هسته اتصال پینچینگ در منحنی چرخه‌ای به وضوح قابل مشاهده بوده و مود شکست آن بصورت مفصل برشی در هسته اتصال است. در هنگام عملکرد ترکیبی تیر و دال به علت افزایش لنگر خمشی و برش وارده به هسته اتصال و نیز عدم مقاومت برشی کافی در هسته اتصال، کاهش ظرفیت باربری در سمت منفی منحنی چرخه ای نمونه NSJ مشاهده شده است.

-در نمونه (RNSJ) بهسازی شده با ورق‌های FRP به دلیل جلوگیری از وقوع مکانیزم‌های غیرشکل پذیر شامل لغزش آرماتورها، ترک های قطری و جدایشگی ورق های FRP مکانیزم مفصل پلاستیک به صورت خمشی در تیر ایجاد شده است. رفتار شکل پذیر و بدون افت قابل ملاحظه مقاومت تا دریافت ۶٪ این نمونه به محصورشدگی کامل هسته اتصال نسبت داده می شود. در این نمونه به دلیل تقویت خمشی ناشی از قرارگیری ورق های FRP بر روی سطوح بالا و پایین تیر افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه NSJ نیز مشاهده شده است.

-در اتصال بهسازی شده به دلیل تغییر مود گسیختگی از شکست برشی هسته اتصال به تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیر میزان انرژی مستهلک شده افزایش یافته است به طوریکه این پارامتر در نمونه‌های بهسازی شده RNSJ نسبت به نمونه کنترلی غیرلرزه ای NSJ، ۶۰٪ افزایش داشته است

-مدل‌های عددی ساخته شده در نرم‌افزار OPENSEES انطباق مناسبی شامل سختی بارگذاری، باربرداری و پینچینگ در رفتار چرخه ای با مدل آزمایشگاهی نشان داده است.

-عملکرد مطلوب در قاب های بهسازی شده به دلیل عدم تشکیل مفصل برشی و آسیب در هسته اتصالات و تغییر مود رفتاری قاب‌ها به تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیرها و پای ستون‌های طبقه اول بوده که موجب افزایش استهلاک انرژی و رفتار چرخه‌ای پایدار قاب‌ها شده است. بطوریکه در دریافت ۴٪ ظرفیت استهلاک انرژی تجمعی قاب های ۵ و ۱۰ طبقه بهسازی شده با ورق های FRP، به ترتیب به میزان ۶۳٪ و ۵۵٪ نسبت به قاب های کنترلی متناظر فاقد جزئیات لرزه ای افزایش یافته است. همچنین این پارامتر

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Garcia, R., et al., Seismic strengthening of severely damaged beam-column RC joints using CFRP. *Journal of composites for construction*, 2013. 18(2): p. 04013048.
- [27] 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. 521-543.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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 bars using steel angles prestressed by cross ties. *Engineering Structures*, 2017. 148: p. 813-828.
- [12] 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.
- [13] Zabihi, A., et al., Seismic retrofit of exterior RC beam-column joint using diagonal haunch. *Engineering Structures*, 2018. 174: p. 753-767.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Ruiz-Pinilla, J.G., et al., Experimental tests on retrofitted RC beam-column joints underdesigned to seismic loads. General approach. *Engineering Structures*, 2014. 59: p. 702-714.
- [17] 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).
- [18] Nouri, A., M.H. Saghafi, and A. Golafshar, Evaluation of beam-column joints made of HPRCC composites to reduce transverse reinforcements. *Engineering Structures*, 2019. 201: p. 109826.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.

loading. *Construction and Building Materials*, 2019. 198: p. 313-322.

[35] 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.

[36] 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.

[37] Tsonos, A. and K. Stylianidis. Pre-seismic and post-seismic strengthening of reinforced concrete structural sub-assemblages using composite materials (FRP). in *Proc., 13th Hellenic Concrete Conference*. 1999.

[38] Paulay, T. and M.N. Priestley, *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. 1992.

Improving the cyclic behavior of reinforced concrete non-standard seismic frames using FRP sheets

Mohammad Hossein Saghafi*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

Abstract

The purpose of this paper is to evaluate the behavior of vulnerable joints of substandard RC frames, improved by Shear and flexural retrofit of beam-column joints using FRP sheets. For this purpose, the behavior of the retrofitted joints is compared with the control joints with and without special seismic details. Considering the main focus of previous studies on two-dimensional joints and not considering the real conditions including the effect of slab and transverse beam in the joints, in order to apply geometric conditions and constructional limitations, in this study the behavior of joints with slab and transverse beam effect has been extracted by experimental study. For this purpose, 2 experimental specimens of concrete exterior beam-column joint with a scale of 1/2 are made and subjected to a cyclic load. The specimens include one control specimen, without special seismic details, and the other retrofitted specimen include a joint without seismic detail, which has been improved with FRP sheets. Finally, the studied joints were modeled using OpenSees software and compared with the experimental results of the research. The results of the retrofitted joint behavior show no strength drop, stable cyclic behavior, reduced pinching effects, improved cyclic behavior due to change of the failure mode from shear failure of the joints to the formation of flexural plastic hinges in the beam. This performance can be attributed to the effectiveness of the proposed retrofit methods in promoting the behavior of vulnerable joints with real geometric conditions.

Keywords: Cyclic curve, beam-column external connections, transverse beam and slab effect, numerical modeling, incremental nonlinear analysis.

* Corresponding Author: mh.saghafi@semnaniau.ac.ir