

بررسی آزمایشگاهی اتصالات خارجی تیر به ستون بتنی با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی و فولادی تحت تاثیر بارهای چرخه‌ای

حسین رضایی آذریانی، هاشم شریعتمدار*، محمدرضا اصفهانی
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶-۱۰-۲۰
بازنگری: ۱۳۹۶-۱۱-۱۸
پذیرش: ۱۳۹۶-۱۲-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶-۱۲-۲۱

کلمات کلیدی:

میلگردهای پلیمری مسلح الیافی
بتن مسلح
اتصال تیر به ستون
تغییر مکان نسبی
بارگذاری چرخه‌ای

خلاصه: در این پژوهش، رفتار اتصال خارجی تیر به ستون بتنی تحت تاثیر بارگذاری چرخه‌ای با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی (GFRP) مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش ۸ نمونه آزمایشگاهی اتصال خارجی تیر به ستون بتنی ساخته و آزمایش شد. هم‌چنین از دو نوع بتن، با مقاومت‌های ۳۰ و ۴۵ مگاپاسکال استفاده شده‌است. در ۴ نمونه از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی و در ۴ نمونه از میلگردهای فولادی، برای اتصال تیر به ستون استفاده شده‌است. میزان محصورشدگی میلگردهای طولی تیر در محل اتصال نمونه‌ها، متفاوت در نظر گرفته شده‌است. نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش شدند. نتایج پژوهش نشان داد که میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، دارای جذب انرژی مناسب بودند اما این مقدار جذب انرژی در مقایسه با میلگردهای فولادی کمتر بود. گرچه مقدار جذب انرژی در میلگردهای پلیمری مسلح الیافی کمتر از میلگردهای فولادی بود اما مقاومت در برابر خوردگی می‌تواند به عنوان جانشینی برای میلگردهای فولادی یا ترکیبی با میلگردهای فولادی باشد. نمودار پوش منحنی‌های بار- تغییر مکان نسبی در نمونه‌های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در نمونه‌های با مقاومت بالا شرایط پذیرش اتصال را به عنوان عضوی از یک قاب خمشی در شرایط لرزه‌ای اقلان نمود. گرچه با بررسی رفتار نمونه‌ها در میلگردهای فولادی مشخص شد تمام نمونه‌های شرایط پذیرش اتصال را داشتند. در نمونه‌هایی با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، در بتن‌های معمولی و مقاومت بالا، با افزایش بار چرخه‌ای شکست در محل اتصال تیر به ستون به صورت خمشی در تیر ایجاد گردید.

۱- مقدمه

اتصال در حالتی که تنش‌های اعضای تیر و ستون در محدوده مجاز باشند، دارای هسته‌ای ضعیف و مهم‌ترین قسمت سازه در هنگام زلزله بوده و می‌بایست در طراحی آن‌ها تجدیدنظر شود. Ehsani و Alameddine [۳] به منظور بررسی معیارهای موجود طراحی اتصالات، آزمایش‌هایی را بر روی نمونه‌های ساخته شده از بتن با مقاومت بالا انجام دادند. در این پژوهش ۱۲ نمونه تحت اثر بارهای چرخه‌ای غیرخطی، آزمایش شدند. آن‌ها نتیجه گرفتند که معادلات کمیته مشترک ACI-ASCE 352 [۴] برای تنش برشی مجاز، در اتصالات دارای بتن با مقاومت بالا، محافظه‌کارانه بوده و پیشنهاد‌های ارائه شده برای محصور کردن اتصال نمی‌تواند در حالت بتن با مقاومت بالا قابل استفاده باشد. Paultre و همکاران [۵] مقایسه‌ای بین رفتار سازه‌های دارای بتن با مقاومت معمولی و سازه‌های دارای بتن با

بررسی خسارت‌های وارده در اثر زلزله به قاب‌های بتن مسلح بیانگر آن است که بیشتر خسارت‌های وارده به این نوع قاب‌ها در ناحیه اتصال تیر به ستون رخ می‌دهند. Park و Paulay [۱] مطالعات جامعی درباره رفتار اتصال تیر به ستون ارائه نمودند. آن‌ها هسته اتصال را خطرناک‌ترین قسمت سازه در هنگام زلزله دانستند و ضرورت تجدید نظر در طراحی آن را بیان نمودند. Paulay و Priestley [۲] به تشریح وقوع لغزش در میلگردهای طولی تیر ناشی از ضعف مقاومت پیوستگی میلگردها و شکست برشی در هسته اتصال که موجب شکست اتصال می‌شود پرداختند. آن‌ها نشان دادند که اتصال‌های طراحی‌شده با فرض عدم نیاز به کنترل تنش

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shariatmadar@um.ac.ir



مقاومت بالا انجام دادند. هم‌چنین دو اتصال خارجی که بر اساس آیین‌نامه بتن کانادا طراحی شده بودند با یکدیگر مقایسه شدند. در نمونه اول از بتن معمولی و در نمونه دوم از بتن با مقاومت فشاری بالا استفاده شده بود. نمونه‌ها به نحوی ساخته شدند که مقاومت خمشی تیرها در آن‌ها یکسان باشند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نمونه ساخته شده از بتن معمولی دارای شکل‌پذیری بیشتر نسبت به نمونه دیگر بود. Elmenshawi و Brown [۶] در پژوهش آزمایشگاهی تاثیر مقاومت بتن بر رفتار چرخه‌ای نمونه‌های اتصال با بتن معمولی، بتن مقاومت بالا و بتن فوق‌مقاوم را بیان کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش مقاومت بتن موجب بروز رفتار تردتر و تشکیل ترک‌های بیشتر در اتصال می‌شود گرچه اثر سایر عوامل مانند کاهش نسبت دهانه به عمق مقطع نیز ممکن است علت بروز این رفتار باشد. آن‌ها بیان کردند که میزان انرژی جذب شده به طور قابل‌ملاحظه‌ای با کم کردن تاثیرپذیری برشی نمونه‌ها و در درجه کمتری با افزایش میلگردهای عرضی افزایش می‌یابد. هم‌چنین نسبت میلگردهای بالا و پایین تیر به میزان زیاد و نسبت میلگردهای عرضی اتصال نسبت دهانه به عمق نمونه‌های به مقدار کمتری بر میرایی اتصال تاثیر می‌گذارد. Moehle و Mahin [۷] از وقوع شکست در اتصال تیر به ستون، از مهم‌ترین عوامل در وارد آمدن خسارت و تخریب کامل سازه‌ای نام بردند. Hanson و Conner [۸] نتایج حاصل از آزمایش بر روی هفت نمونه اتصال تیر به ستون با بارگذاری چرخه‌ای را با هدف بررسی تأثیر جزئیات میلگردگذاری بر شکل‌پذیری اتصال منتشر کردند و ابراز داشتند که طراحی و میلگردگذاری مناسب می‌تواند موجب بهبود رفتار اتصال تیر به ستون شود.

اخیرا بتن خودتراکم به علت روانی و قابلیت اجرا در نقاط پر میلگرد، کاربرد بیشتری در سازه‌های بتنی پیدا کرده‌است. این نوع بتن تحت اثر وزن خود و بدون نیاز به ویبره، متراکم شده و به این دلیل استفاده از بتن خودتراکم در اعضای با تراکم میلگرد زیاد، مانند ستون‌ها و اتصالات، مناسب می‌باشد. Lin و همکاران [۹] نشان دادند که بتن خودتراکم در ستون‌های بتن مسلح دارای عملکرد بهتر نسبت به بتن معمولی در کنترل ترک‌ها است. Said [۱۰] در پژوهش آزمایشگاهی در اتصالات ساخته شده از بتن معمولی و خودتراکم نتیجه گرفت که تغییرشکل برشی هسته در هر دو نوع بتن مشابه بوده ولی با توجه به ریزدانه بودن بتن خودتراکم، ظرفیت باربری در

اتصالات در تغییرشکل‌های زیاد، کمتر از اتصال با بتن معمولی است. تاثیر جزئیات میلگردهای طولی تیر بر رفتار اتصالات خارجی توسط Scott [۱۱] انجام شد. Abdel-Fattah و Wight [۱۲] تاثیر میلگردهای کلاهک‌دار^۱ را در اتصالات داخلی مورد بررسی قرار دادند که موجب افزایش عملکرد و شکل‌پذیری نمونه‌ها شد. Wallace و همکاران [۱۳] آزمایش‌هایی را با استفاده از میلگردهای کلاهک‌دار بر روی اتصالات خارجی انجام دادند. این میلگردها مانع از لغزش میلگردهای تیر شدند. Kang و همکاران [۱۴] پژوهش‌هایی را بر روی اتصالات خارجی انجام دادند و اثر اندازه، شکل و نحوه اتصال میلگردها را بررسی نمودند. Choudhury و Barbhuiya [۱۵] به بررسی اثر اندازه اتصالات تیر به ستون بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط مدل‌های آزمایشگاهی، در سه نوع اتصال تیر به ستون پرداختند و اثر اندازه و ابعاد نمونه را بر اساس مکانیک شکست بررسی نمودند. تعدادی از محققان مانند Megget و Park [۱۶] تلاش‌های قابل‌توجهی را برای بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات بتنی اختصاص دادند. Bariola [۱۷] نشان داد که اتصالات سازه‌های بتنی برای سازه‌هایی که از نظر ارتفاع در رده سازه‌های متوسط هستند، بیشتر در اثر بار لرزه‌ای خسارت می‌بینند. Engindeniz و همکاران [۱۸] به تاثیر قابل‌توجه رفتار کلی اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی بتن مسلح تحت بارگذاری‌های جانبی پرداختند. اخیرا مواد کامپوزیت در مقاوم‌سازی سازه‌ها کاربرد بسیاری یافته‌اند و جایگزینی برای رفع نقص سازه‌های بتن مسلح شده‌اند. یکی از موادی که کاربرد وسیعی در مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح دارند، پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) می‌باشند. از دهه ۱۹۴۰ پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) به طور گسترده‌ای در هوافضا، کشتی‌سازی، خودرو و صنایع مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است. در سال‌های اخیر، FRP به نوع جدیدی از تقویت‌کننده برای مهندسی عمران با مقاومت بالا، وزن سبک و عملکرد ضد خوردگی تبدیل شده‌است [۱۹]. با پیشرفت فن‌آوری، آرماتورهای پلیمری مسلح الیافی تولید شده و مورد استفاده قرار گرفته‌است. میلگرد FRP از نظر شکل ظاهری مشابه میلگردهای متداول هستند، ولی در تولید آن‌ها به جای فولاد از رزین پلیمری مخصوص و الیاف استفاده می‌شود. میلگردهای کامپوزیتی FRP متشکل از دو بخش پلیمری FRP و رزین هستند.

در مقایسه با میلگردهای فولادی بیان کردند. مطالعات متعددی در مورد استفاده از میلگردهای FRP در تیرها توسط آنان انجام شد. هم‌چنین مطالعاتی در مورد استفاده از میلگردهای FRP توسط Grira و Saatcioglu [۲۷] و Choo [۲۸] در ستون‌ها، توسط Udhayakumar و همکاران [۲۹] در دال‌ها و توسط Fukuyama Morphy و همکاران [۳۰] در قاب‌های سازه‌های بتنی انجام شد. Morphy و همکاران [۳۱] و Nehdi و همکاران [۳۲] برای میلگردهای FRP با خم، کاهش مقاومت ۶۰ درصدی را توصیه کردند که باعث کاهش سختی در میلگردهای عرضی FRP گردید. Sharbatdar و Saatcioglu [۳۳] بیان نمودند که میلگردهای FRP در سازه‌های بتنی در بارهای لرزه‌ای به دلیل کم بودن شکل‌پذیری از ایمنی کافی برخوردار نیست. جهت تامین حاشیه ایمنی بیشتر در سازه‌های بتنی با میلگردهای FRP رفتار الاستیک تحت بار سرویس می‌بایست تامین گردد تا از گسستگی میلگردهای FRP جلوگیری شود و نیازهای میلگردگذاری فراهم شود. Vijay [۳۴] مطالعاتی را بر روی دوام میلگردهای GFRP انجام داد و تاثیر سختی و مقاومت نهایی میلگردهای GFRP را بر مودهای شکست بررسی نمود. Zou [۳۵]-۳۷ مطالعات زیادی بر روی شکل‌پذیری، خیز کوتاه مدت و دراز مدت تیرهای پیش‌تنیده با میلگردهای CFRP انجام داد. میلگردهای FRP دارای مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت کششی بسیار بالا و مدول الاستیسیته کمتر از مدول الاستیسیته فولاد هستند. Achillides و Pilakoutas [۳۸] نشان دادند که مقاومت پیوستگی میلگردهای FRP در بتن‌های با مقاومت بالا تحت تاثیر مقاومت برشی بین الیاف و رزین قرار دارد. Lee و همکاران [۳۹] یک مدل تحلیلی را برای پیش‌بینی برش اتصالات مقاوم‌سازی شده با CFRP پیشنهاد نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که اتصالات تیر به ستون مقاوم‌سازی شده توسط CFRP می‌تواند سختی، مقاومت و ظرفیت اتلاف انرژی آن‌ها را افزایش دهد. Castro [۴۰] آزمایش‌هایی را بر روی تعداد ۹ اتصال تیر به ستون با مقیاس دوسوم انجام دادند. مشخص گردید که نمونه‌های تشکیل شده از بتن پیش‌ساخته، می‌توانند متحمل تغییرشکل‌های غیرخطی شوند و دارای شکل‌پذیری مناسبی بودند. Alcocer و همکاران [۴۱] آزمایش‌هایی را بر روی دو اتصال بتنی پیش‌ساخته شده تیر به ستون با مقیاس کامل انجام دادند که در آن تحت بارگذاری یک‌طرفه و دوطرفه مشابه بارهای لرزه‌ای اعمال شد. نمونه‌ها رفتار شکل‌پذیری را نشان دادند.

بر اساس نوع رزین یا نوع الیاف پلیمری FRP که می‌تواند یکی از انواع کربن، الیاف شیشه و یا آرامید باشد، سه نوع میلگرد کامپوزیتی FRP در بازار موجود است. از انواع میلگردهای پلیمری مسلح الیافی می‌توان به میلگردهای شیشه^۱، کربن^۲ و آرامید^۳ اشاره نمود. میلگردهای کامپوزیت GFRP رفتار متفاوتی با میلگردهای فولادی دارند. به دلیل مقاومت طبیعی در برابر خوردگی، این میلگردها برای سازه‌هایی که در معرض خوردگی قرار دارند مانند سازه‌های دریایی، اسکله‌ها، عرشه پل‌ها و سازه‌هایی که در معرض نمک‌های یخ‌زدا قرار دارند بسیار مناسب می‌باشند. با توجه به خاصیت غیرمغناطیسی این میلگردها کاربرد آن‌ها در تجهیزات حساس مانند میدان‌های الکترومغناطیس و بخش‌های MRI بیمارستان‌ها مناسب‌تر از میلگردهای فولادی می‌باشد. میلگردهای فولادی دارای یک رفتار تقریباً ایزوتروپیک می‌باشند ولی میلگردهای GFRP دارای مقاومت کششی بالا در جهت اصلی الیاف می‌باشند. این میلگردها دارای رفتار الاستیک خطی می‌باشند و از خود رفتار جاری شدن (وارد شدن به مرحله پلاستیک) مانند فولاد نشان نمی‌دهند.

پژوهشی توسط Mady و همکاران [۲۰] نشان داد که میلگردهای مسلح الیافی شیشه‌ای (GFRP) قادر به بهبود ویژگی‌های رفتار الاستیک خطی در تیرها در مواردی که نیاز به مقاومت و تغییر شکل بدون لغزش میلگردها مدنظر است می‌باشند. Afifi و همکاران [۲۱] نشان دادند که ستون مسلح شده با میلگردهای GFRP مدور رفتاری شکل‌پذیر مطابق ستون مسلح شده با میلگردهای فولادی از خود نشان می‌دهند. Hasaballa و El-Salakawy [۲۲] نشان دادند که اتصالات قاب‌های خمشی با میلگردهای GFRP می‌توانند تا مقدار $\sqrt{f_c}$ ۸۵٪ تنش برشی تحمل نمایند. Brown و Bartholomew [۲۳] نشان دادند تیر با میلگردهای فولادی و با میلگردهای FRP بر اساس خواص مکانیکی به صورت مشابه عمل می‌کنند. گرچه معیارهای شکل‌پذیری و خیز در طراحی با میلگردهای FRP با میلگردهای فولادی متفاوت است. Said و Nehdi [۲۴] شکل‌پذیری و جذب انرژی کمتر FRP در سازه‌های با میلگردهای FRP را دغدغه اصلی در سازه‌ها در برابر در بارهای لرزه‌ای دانستند.

Toutanji و Saafi [۲۵]، Salib و Sayed [۲۶] استفاده از میلگردهای FRP را به علت مقاومت خوردگی بالا در سازه‌های بتنی

- 1 Glass fiber-Reinforced Polymer (GFRP)
- 2 Carbon fiber-Reinforced Polymer (CFRP)
- 3 Aramid Fiber-Reinforced Polymer (AFRP)

استاتیک با میلگردهای AFRP آزمایش کردند. گرچه رفتار قاب تحت تاثیر تغییرشکل‌های پسماند بزرگ گزارش نشد اما آن‌ها استدلال کردند که بازسازی قاب تحت تاثیر تغییرشکل‌های پسماند کوچک در مقایسه با میلگردهای فولادی راحت‌تر بود. Kobayashi و همکاران [۵۱] نیز بعدها این موضوع را تایید کردند. Shehata [۵۲]، Nagasaka و همکاران [۵۳] و Sugita [۵۴] افزایش استفاده از میلگردهای FRP را به علت دوام، وزن سبک و خاصیت غیرمغناطیسی در سازه‌ها را مطرح نمود. Ahmed و همکاران [۵۵] و Benmokrane و همکاران [۵۶] استفاده از میلگردهای FRP را در پل‌های بتنی موجب افزایش توان بالقوه طول عمر خستگی و مزیت‌های اقتصادی و زیست محیطی را مطرح نمودند. Mohamed و Benmokrane [۵۷] استفاده از میلگردهای GFRP با مدول الاستیسیته بالا را به عنوان میلگردهای اصلی برای پی، دیوارها و دال فوقانی مخازن بتن مسلح مطرح نمودند. شبکه‌های FRP دارای کاربردهای وسیعی مانند عرشه‌های پل، دیواره‌های حائل، مخازن آب، دال‌ها، لاینینگ تونل‌های زیرزمینی می‌باشند. Dutta و همکاران [۵۸] از مزایای شبکه‌های FRP جهت مقابله با مشکلات ورقه ورقه شدن، برابری عمق یکسان در میلگردهای طولی و عرضی و فراوانی ساخت با میلگردهای FRP را برشمرد. Lemaitre و Desmorat [۵۹] به بررسی شاخص خسارت در نمونه‌های اتصال با میلگردهای FRP پرداختند. Corley [۶۰] تغییرشکل نسبی در برابر بار در اتصالات بتنی با میلگردهای FRP را رضایت بخش دانست.

در پژوهش حاضر تاثیر استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در مقایسه با میلگردهای فولادی، با استفاده از دو نوع بتن با مقاومت‌های متفاوت، در اتصالات خارجی تیر به ستون بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین با توجه به اثر محصورشدگی بتن توسط میلگردهای عرضی و تغییر در جزئیات میلگردگذاری، رفتار میلگردهای پلیمری مسلح الیافی با میلگردهای فولادی مقایسه شده اند.

۲- برنامه آزمایش

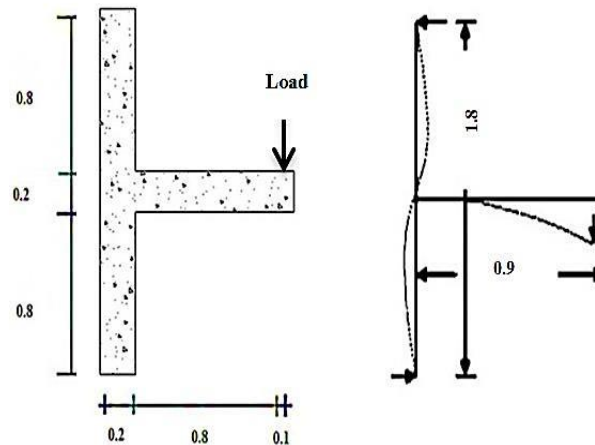
۲-۱- جزئیات نمونه‌ها

نمونه اتصال تیر به ستون شکل ۱ را می‌توان بخشی از قاب در نظر گرفت که با جدا کردن آن در نقاط عطف خمشی تیر و ستون از قاب به دست می‌آید. نقاط عطف خمشی تیرها و ستون‌ها، لزوماً در وسط دهانه نیستند و با وجود بارهای دینامیکی در سازه‌ها موقعت

شبکه‌های FRP تشکیل شده از مواد کامپوزیتی الیافی جدید برای سازه‌های بتن مسلح^۱ می‌توانند مشکل کاهش مقاومت ناشی از خم نمودن در میلگردهای FRP را برطرف کنند. Rahman و همکاران [۴۲] دوام بالا و مقاومت در برابر خستگی را از مزایای شبکه‌های FRP نام بردند. آنان به همراه Yost و Schmeckpeper [۴۳] و Banthia و همکاران [۴۴]، FRP را در دال‌ها به عنوان شبکه‌های کامپوزیتی بررسی کردند و مناسب بودن آن را به جز عدم کفایت در برابر مقاومت برشی پانچ را نتیجه‌گیری کردند. Alsayed و همکاران [۴۵] استفاده از GFRP در میلگردهای عرضی در ستون‌های کوتاه را بررسی نمودند و کاهش ظرفیت بار محوری بدون توجه به نوع میلگرد طولی را مشاهده کردند. Mirmiran و همکاران [۴۶] بیان کردند که سختی کم میلگردهای FRP باعث کاهش سختی و شکست ناپایدار در ستون‌های سازه‌های بتنی می‌شود و موجب محدود شدن لاغری در ستون‌های با میلگردهای FRP در مقایسه با میلگردهای فولادی گردید. Aiello و Ombres [۴۷] نمونه‌هایی از تیرها با میلگردهای فقط از نوع FRP و نمونه‌هایی از تیرها با ترکیب میلگردهای فولادی و FRP به عنوان میلگرد طولی و استفاده از میلگردهای فولادی به عنوان میلگردهای عرضی را آزمایش کردند. نتایج شکل‌پذیری و کاهش خیز بیشتری را در نمونه‌های هیبریدی نسبت به نمونه‌هایی که فقط از میلگردهای FRP استفاده شده بود را نشان داد.

در پژوهش دیگری توسط Leung و Balendran [۴۸] نشان داده شد که در تیرهای هیبریدی^۲ میلگردها به صورت موثرتری تا حد جاری شدن عمل کرده و پس از آن میلگردهای GFRP نقش مقاومتی را دارند. Saikia و همکاران [۴۹]، Nehdi و Said [۵۰] میلگردهای FRP را در اتصالات تیر-ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای معکوس آزمایش نمودند. نتایج نشان داد استفاده از میلگردهای FRP موجب انسجام و حفظ اتصال گردید اما شکست در تیر به صورت شکست ترد بود. ولی در اتصال هیبریدی با استفاده از میلگردهای فولادی و GFRP ظرفیت اتلاف انرژی بیشتری در مقایسه با اتصال فقط با میلگردهای GFRP را نشان داد. Fukuyama و همکاران [۳۰] سازه‌ای سه طبقه با مقیاس ۱ به ۲ تحت بارگذاری شبه

1 New Fiber Composite Material for Reinforcing Concrete (NEFMAC)
2 Hybrid



شکل ۱. جزئیات اتصال تیر به ستون خارجی

Fig. 1. Details of exterior beam-column connection

جدول ۱. جزئیات نمونه‌ها و علائم اختصاری برای میلگردهای فولادی و پلیمری مسلح الیافی

Table 1. Details of samples and abbreviation signs of steel rebars and Fiber Reinforced Polymers (FRP)

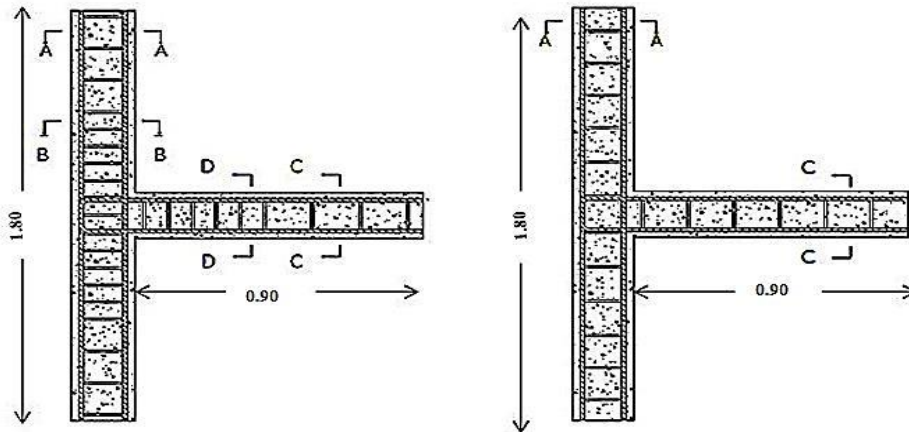
| Specimens | Names |
|-----------|----------------------|
| 1 | CONF – STEEL – C30 |
| 2 | UNCONF – STEEL – C30 |
| 3 | CONF – STEEL – C45 |
| 4 | UNCONF – STEEL – C45 |
| 5 | CONF – FRP – C30 |
| 6 | UNCONF – FRP – C30 |
| 7 | CONF – FRP – C45 |
| 8 | UNCONF – FRP – C45 |

(از بتن معمولی) و بتن با مقاومت بالا (از بتن خودتراکم) استفاده شده‌است. از بتن خودتراکم جهت سهولت اجرا و افزایش مقاومت بتن استفاده شده‌است. جزئیات نمونه‌ها و علائم اختصاری برای نمونه‌ها با میلگردهای فولادی و پلیمری مسلح الیافی در جدول ۱ نشان داده شده‌است. در این جدول ردیف‌های ۱ تا ۴، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای فولادی و ردیف‌های ۵ تا ۸، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی می‌باشد.

شکل‌های ۲ و ۳، مربوط به نمونه‌های ۱ تا ۴ با میلگردهای فولادی و شکل‌های ۴ و ۵، مربوط به نمونه‌های ۵ تا ۸ با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) می‌باشند. نام CONF معرف محصورشدگی بتن در اتصال است و نشان‌دهنده آن است که خاموت‌ها در تیرها و ستون‌ها از بر اتصال و به فاصله $2h$ (دو برابر عمق مقطع) [۶۱] دارای فاصله ۷۵ میلی‌متر می‌باشند. نام UNCONF معرف عدم

نقاط عطف تغییر می‌کند. اما این تغییر با توجه به جابجایی کم موقعیت نقاط عطف تیر و ستون تاثیر چندانی در رفتار هسته اتصال نخواهد داشت [۱۵]. در این پژوهش، نمونه‌های اتصال خارجی تیر به ستون بتنی از یک قاب دو بعدی با دهانه ۴ متر و ارتفاع ۳/۶ متر انتخاب شده‌اند. ابعاد مقطع اتصال 200×200 (برحسب میلی‌متر) می‌باشد. نمونه‌ها با مقیاس مقیاس ۱ به ۲ ساخته و آزمایش شدند. جزئیات اتصال شامل دیگرام آزاد و ابعاد هندسی در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

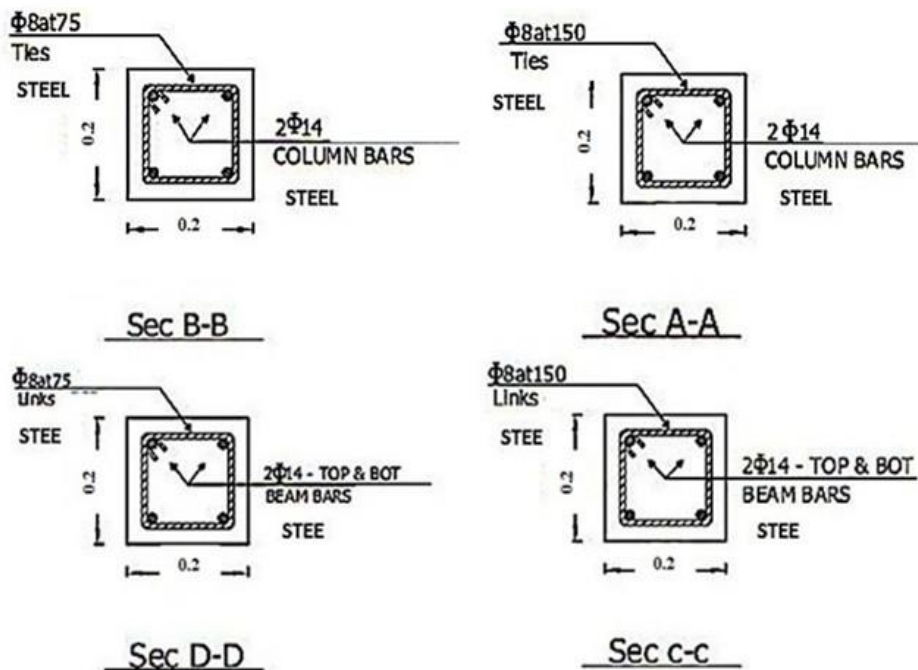
نمونه اتصال خارجی تیر به ستون ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. در ۴ نمونه از میلگردهای فولادی و ۴ نمونه از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) برای تیر استفاده شد. جنس میلگردهای FRP با توجه به در دسترس بودن آن از نوع GFRP انتخاب گردید. جهت ساخت نمونه‌ها، از دو نوع بتن با مقاومت پایین



(الف) برای نمونه‌های ۲ و ۴ (ب) برای نمونه‌های ۱ و ۳

شکل ۲. نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 2. Samples reinforced by steel rebars in exterior connection (Dimensions in meter)

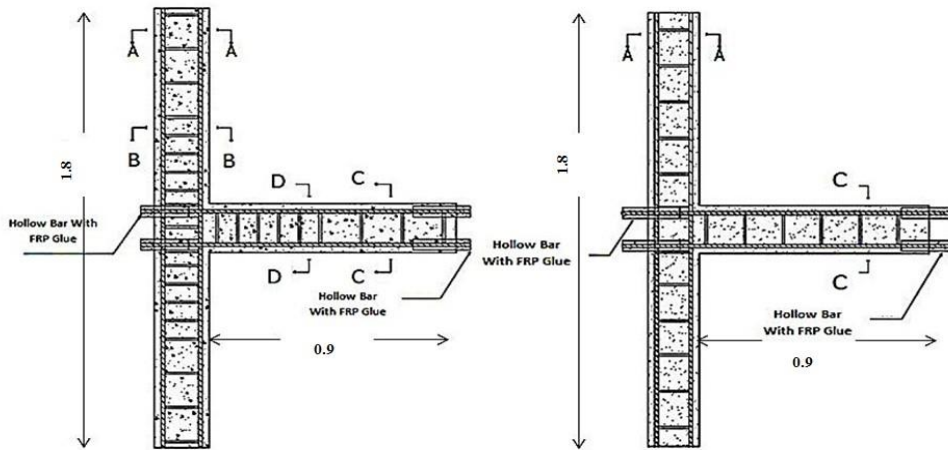


شکل ۳. مقاطع نمونه‌های مسلح شده با میلگرد فولادی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 3. Sections of samples reinforced by steel rebars in exterior connection (Dimensions in meter)

با مقاومت‌های فشاری استوانه‌های ۳۰ و ۴۵ مگاپاسگال در اتصال است. جزئیات نمونه‌ها شامل آرایش آرماتورگذاری، مقادیر و فواصل میلگردها و مقاطع آن‌ها در شکل‌های ۲ و ۳، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای فولادی و در شکل‌های ۴ و ۵، مربوط به نمونه‌های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) نشان داده شده‌است.

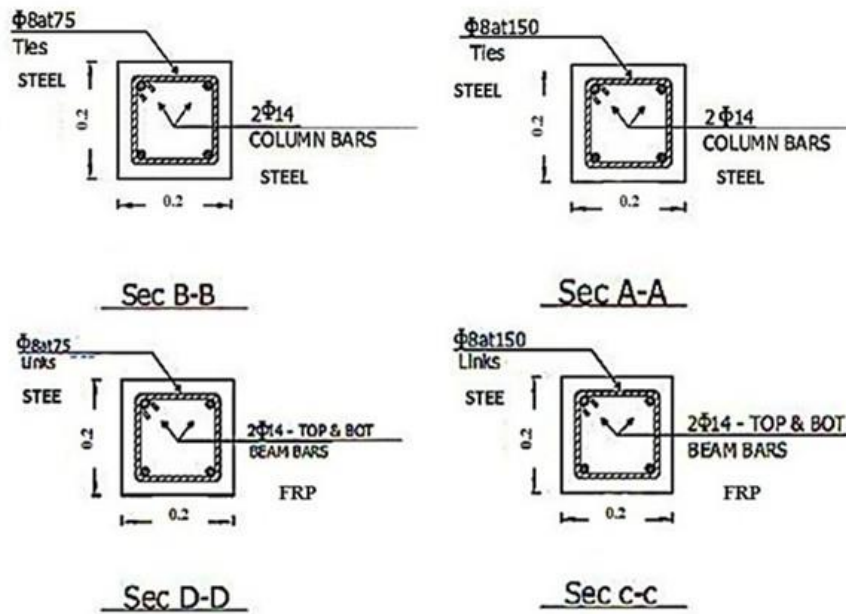
محصورشدگی بتن و نشان‌دهنده آن است که فاصله خاموت‌ها در تیرها و ستون‌ها در تمام نقاط به فاصله ۱۵۰ میلی‌متر باشد. نام Steel معرف استفاده از میلگردهای فولادی و FRP معرف استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در تیر اتصال است. C30 و C45 به ترتیب معرف استفاده از بتن معمولی و بتن خودمتراکم



(الف) برای نمونه‌های ۶ و ۸ (ب) برای نمونه‌های ۵ و ۷

شکل ۴. نمونه‌های مسلح شده با میلگرد پلیمری مسلح الیافی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 4. Samples reinforced by Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars in exterior connection (Dimensions in meter)



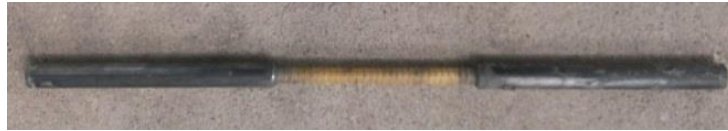
شکل ۵. مقاطع نمونه‌های مسلح شده با میلگرد پلیمری مسلح الیافی در اتصال خارجی برای نمونه‌ها (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 5. Sections of samples reinforced by Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars in exterior connection (Dimensions in meter)

انتهای میلگردهای GFRP از اتصال‌دهنده مکانیکی به همراه چسب مخصوص به طول ۵۰ سانتی‌متر استفاده گردید. چسب مورد استفاده برای اتصال میلگردهای GFRP در درون اتصال‌دهنده‌های مکانیکی از نوع Memo Hot می‌باشد. در این پژوهش نیز با استفاده از دستگاه کشش، نمونه‌ها آماده‌سازی و مورد آزمایش قرار گرفتند تا مشخصات مکانیکی میلگردها استخراج شوند. نمونه مورد آزمایش جهت آزمایش

۲-۲- مشخصات مصالح

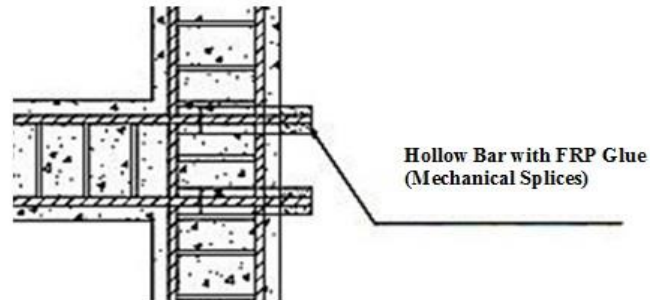
میلگردهای فولادی مورد استفاده در نمونه‌ها از نوع A3 و آجدار بودند و دارای قطر ۸ (برای میلگردهای عرضی) و قطر ۱۴ میلی‌متر (برای میلگردهای طولی) بودند. میلگردهای پلیمری مسلح الیافی (FRP) مورد استفاده دارای قطر ۱۴ میلی‌متر (برای میلگردهای طولی تیر) و آجدار و از نوع GFRP بودند. جهت جلوگیری از لغزش دو



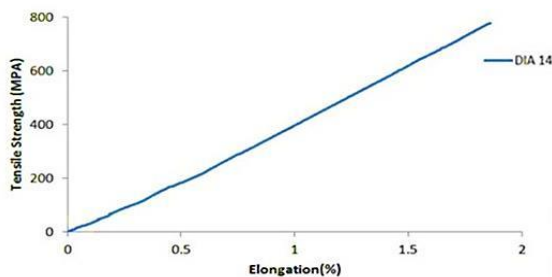
شکل ۶. نمونه میلگرد GFRP مورد آزمایش کشش
Fig. 6. Rebar sample of GFRP in tension test



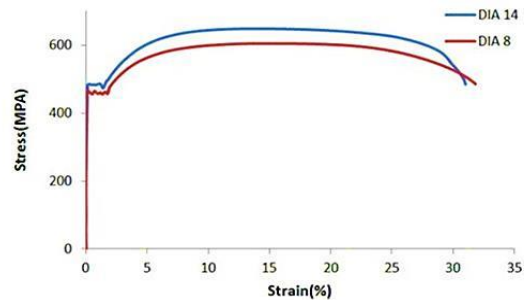
شکل ۸. میلگردهای GFRP با اتصال دهندهها قبل از قالببندی
Fig. 8. GFRP rebars and connectors before formatting



شکل ۷. جزئیات اتصال دهنده های مکانیکی با میلگردهای GFRP
Fig. 7. Details of mechanical connectors with GFRP rebars



(ب) میلگردهای پلیمری مسلح الیافی



(الف) میلگردهای فولادی

شکل ۹. نمودار تنش-کرنش در میلگردها

Fig. 9. Stress-Strain curve of rebars

با توجه به تنوع نوع و مقاومت بتن، ساخت نمونه ها و بتن ریزی آن‌ها در دو مرحله انجام شد و از هر مرحله بتن ریزی، چهار نمونه استوانه‌ای گرفته شد. این نمونه ها هم‌زمان با آزمایش اتصالات تحت آزمایش فشاری قرار گرفتند. در هر بار نمونه گیری، متوسط نتایج نمونه‌های استوانه‌ای به عنوان مقاومت مشخصه بتن اتصالات در نظر گرفته شده‌اند. هر یک از انواع بتن با هدف دستیابی به دو مقاومت $f'_c = 30\text{MPa}$ و $f'_c = 45\text{MPa}$ ساخته شده‌اند. در جدول‌های ۲ و ۳ جزئیات هندسی خواص و مواد نمونه ها نشان داده شده‌است.

کشش در شکل ۶ نشان داده شده‌است. در نمونه های بتنی مورد آزمایش جهت جلوگیری از لغزش دو انتهای میلگردهای GFRP از اتصال دهنده مکانیکی به طولی برابر ۳۰ سانتی‌متر استفاده شد. جزئیات اتصال دهنده های مکانیکی با میلگردهای GFRP و استفاده از این میلگردهای قبل از قالببندی نمونه ها به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌است. هم‌چنین نمودار تنش-کرنش میلگردها برای میلگردهای فولادی و پلیمری مسلح الیافی، در شکل ۹ نشان داده شده‌است. سانتی‌متر سانتی‌متر

جدول ۲. جزئیات هندسی نمونه ها
Table 2. Geometric details of samples

| میلگردهای پلیمری مسلح الیافی | | میلگردهای فولادی | | جزئیات هندسی |
|------------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------|
| ۸ و ۶ | ۷ و ۵ | ۴ و ۲ | ۳ و ۱ | نمونه ها |
| تیرها: | | | | |
| ۲۰۰×۲۰۰ | | ۲۰۰×۲۰۰ | | ابعاد (mm) |
| 4Φ14-FRP | | 4Φ14-Steel | | میلگردهای طولی (بالا و پائین) |
| Φ8 @150 Steel | Φ8 @75-150 Steel | Φ8 @150 Steel | Φ8 @75-150 Steel | میلگردهای عرضی |
| ستون ها: | | | | |
| ۲۰۰×۲۰۰ | | ۲۰۰×۲۰۰ | | ابعاد (mm) |
| 4Φ14-Steel | | 4Φ14-Steel | | میلگردهای طولی (در دو جهت) |
| Φ8 @150 Steel | Φ8 @75-150 Steel | Φ8 @150 Steel | Φ8 @75-150 Steel | میلگردهای عرضی |

جدول ۳. خواص مواد نمونه ها
Table 3. Material properties of samples

| میلگردهای پلیمری مسلح الیافی | | میلگردهای معمولی | | جزئیات مصالح |
|-------------------------------|--------|------------------|---------|--------------------------------|
| ۸ و ۷ | ۶ و ۵ | ۴ و ۳ | ۲ و ۱ | نمونه ها |
| بتن: | | | | |
| SCC | NC | SCC | NC | نوع بتن |
| ۴۵/۴ | ۳۰/۱ | ۴۵/۴ | ۳۰/۱ | مقاومت فشاری (MPa) |
| میلگردهای فولادی (طولی): | | | | |
| - | - | ۴۸۴ | - | مقاومت جاری شدن (MPa) |
| - | - | ۶۴۹ | - | مقاومت نهایی (MPa) |
| - | - | ۲۰۲/۴ | - | مدول الاستیسیته (GPa) |
| میلگردهای فولادی (عرضی): | | | | |
| ۴۶۳ | - | ۴۶۳ | - | مقاومت جاری شدن (MPa) |
| ۶۰۵ | - | ۶۰۵ | - | مقاومت نهایی (MPa) |
| ۲۰۲/۴ | - | ۲۰۲/۴ | - | مدول الاستیسیته (GPa) |
| میلگردهای پلیمری مسلح الیافی: | | | | |
| ۸۰۰ | - | - | - | مقاومت کششی نهایی (MPa) |
| ۴۳ | - | - | - | مدول الاستیسیته (GPa) |
| 1.8E-5 | 1.8E-5 | 7.85E-5 | 7.85E-5 | وزن مخصوص (N/mm ³) |



شکل ۱۱. جزئیات LVDT ها در گره اتصال
Fig. 11. LVDTs in connection node Details of



شکل ۱۰. دستگاه آزمایش به همراه تغییرمکان سنجها
Fig. 10. Test setup and strain gauges

از تغییرمکان سنج های شماره 3 و 4، بر روی ستون استفاده شده است. برداشت تغییرمکان قائم Δ_5 توسط LVDT5 نصب شده در بر هسته اتصال و تغییرمکان های افقی Δ_3 و Δ_4 توسط LVDT3 و LVDT4 نصب شده در بر ستون انجام گردید. شکل ۱۰ دستگاه آزمایش به همراه تغییرمکان سنج ها و شکل ۱۱ جزئیات LVDT ها در گره اتصال را نشان می دهد.

بارگذاری رفت و برگشتی^۳ به صورت کنترل تغییرمکان^۴ نمونه اعمال شده است. تغییرمکان نسبی^۵ اعمال شده روی تیر اتصال، براساس تغییرشکل جانبی اتصال تیر به ستون مطابق شکل ۱۲ محاسبه شده است. شکل های ۱۲-الف و ۱۲-ب به ترتیب تغییرشکل یافته ی اتصال تیر- ستون خارجی در یک قاب خمشی چند طبقه تحت بار جانبی را در نمونه آزمایش و در سازه ایده آل نشان می دهند. θ زاویه جابجایی نسبی بین طبقه ای، حاصل تقسیم δ (جابجایی نسبی طبقه)، بر H (ارتفاع ستون)، تعریف شده است.

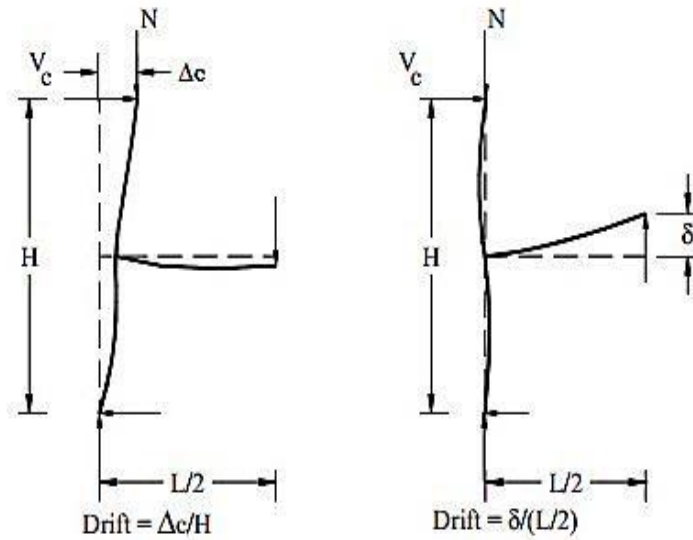
در حالتی که دوران جسم آزاد تیر امکان پذیر باشد، زاویه جابجایی نسبی را می توان با استفاده از تغییرمکان قائم نوک تیر محاسبه کرد. با توجه به بازوی ۹۰۰ میلی متری اعمال بار، تغییرمکان انتهایی تیر برای رسیدن به تغییرمکان نسبی برای هر ۱ درصد تغییرمکان نسبی، برابر ۹ میلی متر خواهد بود.

۳-۲- دستگاه آزمایش

جهت بارگذاری رفت و برگشتی در انتهای تیر از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۶۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. برای اندازه گیری اعمال بار وارد بر نمونه ها از یک نیروسنج^۱ با ظرفیت حداکثر ۲۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. جهت حفظ تعادل نمونه ها و عدم تغییرمکان مکان های جانبی، از صفحات فلزی مناسب در انتهای تیر و دو انتهای ستون مطابق شکل ۱۰ استفاده شد. ثبت تغییرمکان قائم انتهایی تیر، توسط تغییرمکان سنج^۲ شماره ۱ که متصل به رایانه بود انجام شد. جهت بررسی رفتار اتصال در فاصله دو برابر عمق مقطع (2h) [۶۱] در جهت قائم از تغییرمکان سنج شماره ۲، بر روی تیر استفاده شد. در این پژوهش آزمایشگاهی، مقدار تغییرمکان قائم تیر اتصال Δ_2 ، در ناحیه بحرانی تیر (به فاصله 2h از بر هسته اتصال) توسط LVDT2 در طول آزمایش توسط انتقال به رایانه برداشت شد. هم چنین جهت محاسبه تغییرمکان در جهت قائم گره اتصال از تغییرمکان سنج شماره 5 بر روی تیر و جهت تعیین دوران گره اتصال

3 Cyclic Load
4 Displacement Control
5 Drift

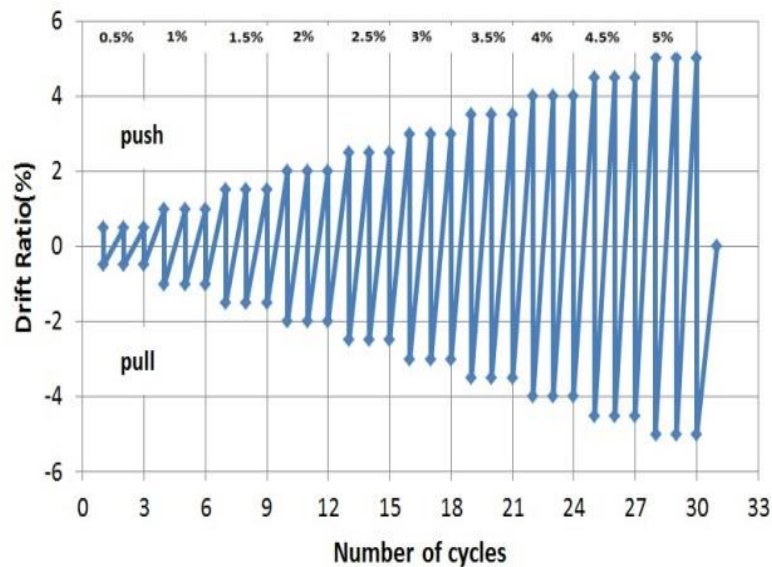
1 Load cell
2 LVDT(Linear Variable Differential Transforme)



(الف) در نمونه آزمایش (ب) در سازه ایده آل

شکل ۱۲. نحوه محاسبه تغییرمکان نسبی انتهای تیر (ابعاد بر حسب متر)

Fig. 12. Calculation method of relative displacement at the end of beam (Dimensions in meter)



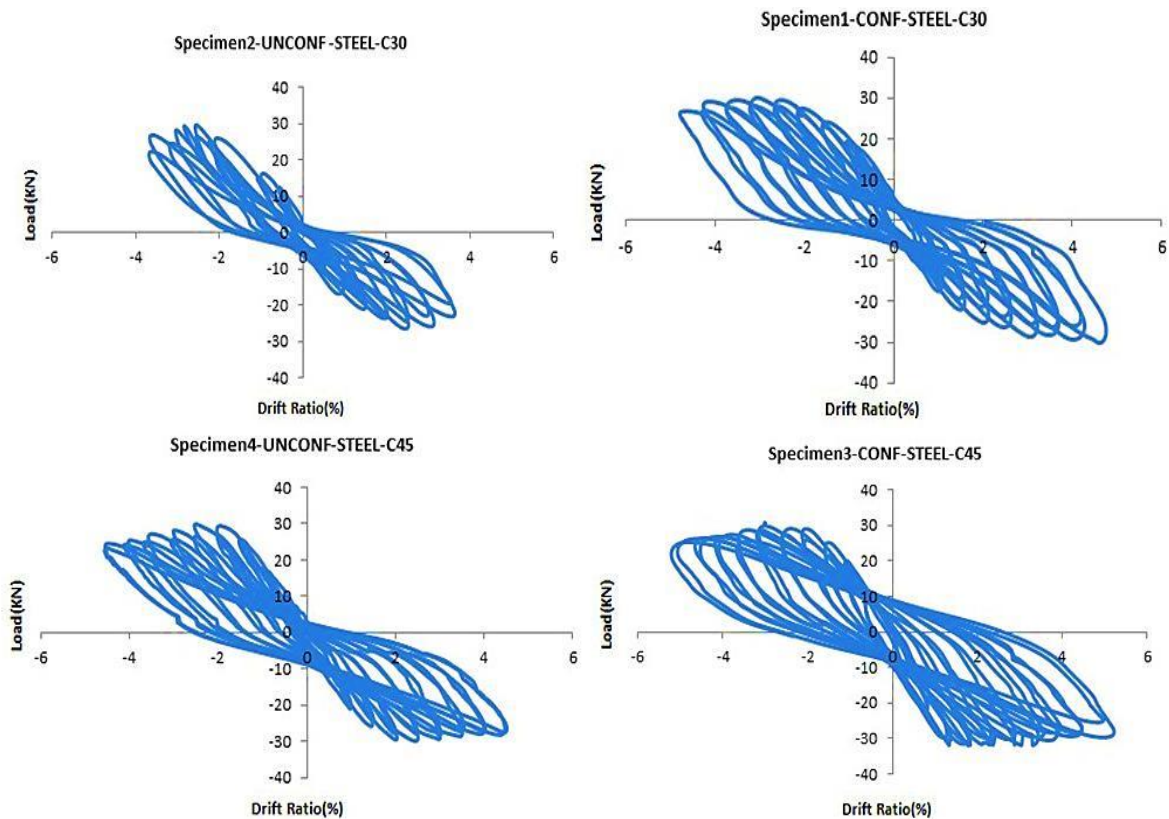
شکل ۱۳. الگوی بارگذاری رفت و برگشتی

Fig. 13. Cyclic loading pattern

نمونه در حالت الاستیک ثابت شد و پس از آن تا انتهای آزمایش، بار به صورت کنترل تغییرمکان تا تغیی مکان نسبی ۵ درصد به نمونه ها اعمال شد. بارگذاری وارد به نمونه ها صورت پذیرفت و در طی آن هر جابجایی در سه سیکل جهت هر چرخه به نمونه اعمال گردید. مقدار نیروی محوری اعمال شده به ستون معادل $0.10f_c A_g$ اعمال شد

به منظور شبیه سازی نیروی زلزله در نمونه ها، از بارگذاری رفت و برگشتی مطابق شکل ۱۳ با چرخه های محدود استفاده شده است. بارگذاری در دو مرحله به سازه اعمال گردید. در مرحله نخست بار تا لحظه ترک خوردگی نمونه به صورت کنترل بار وارد گردید و رفتار

1 Force Control



شکل ۱۴. نمودار بار- تغییرمکان نسبی انتهای تیر در نمونه های با میلگردهای فولادی

Fig. 14. Load- Relative displacement curve at the end of beam in samples reinforced by steel rebars

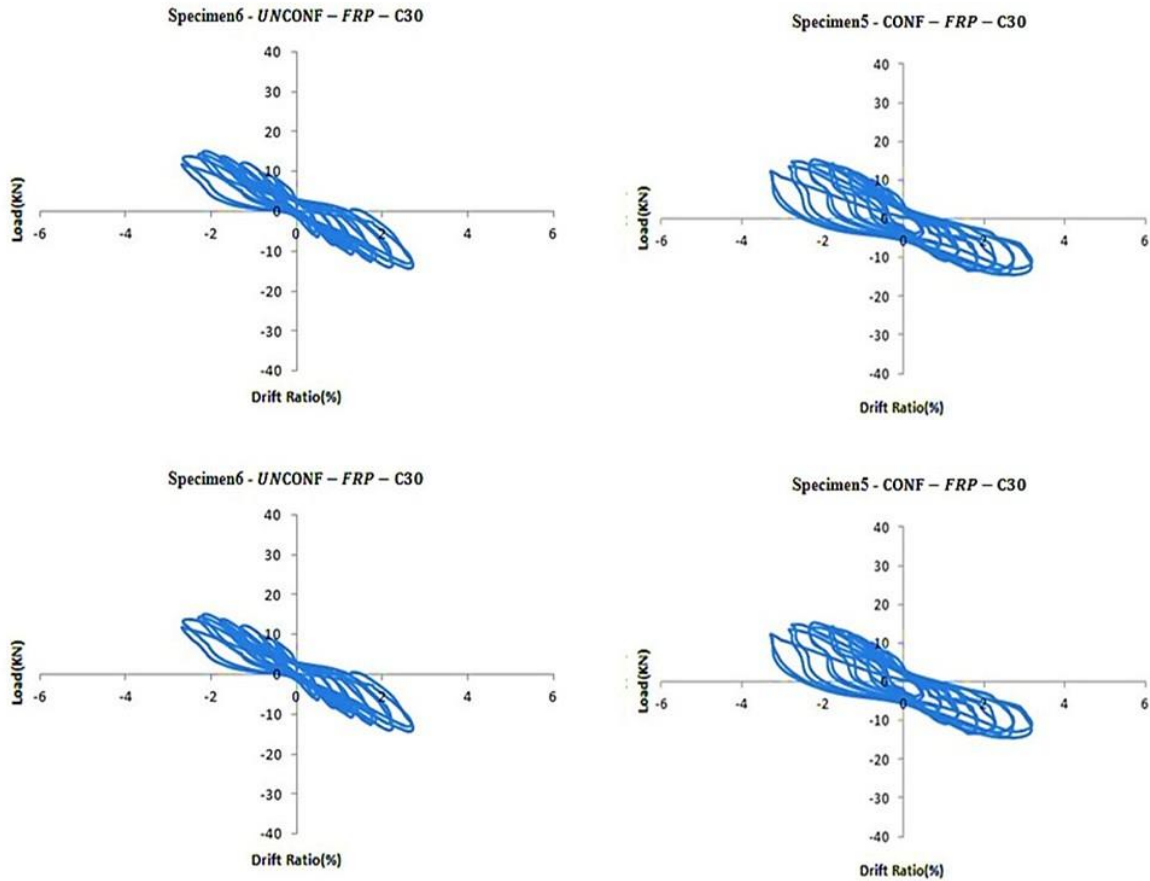
مرکزی^۱ در نمونه با مقاومت بالا و محصور شده قابل ملاحظه نیست (نمونه ۳). مقدار جمع شدگی مرکزی در نمونه با مقاومت معمولی و محصور نشده بیشترین مقدار را دارا می باشد (نمونه ۲). نمودارهای بار- تغییرمکان نسبی انتهای تیر در تمام نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در نمونه های ۵ الی ۸ سختی و مقاومت در هر چرخه بارگذاری تغییر کرده است اما تغییرات آن قابل ملاحظه نیست. گرچه در یک تغییرمکان نسبی مشخص، بار انتهای تیر در نمونه ها به بیشترین مقدار خود رسیده است اما این مقدار در چرخه های بعدی به مرور تقلیل یافته است. ظرفیت باربری نهایی در تمام نمونه ها در محدوده ۱۵ تا ۲۵ کیلونیوتن بوده و در تغییرمکان نسبی ۲ تا ۳ درصد رخ داده اند. از مقایسه حلقه های پسماند می توان نتیجه گرفت که مقدار جمع شدگی مرکزی در نمونه ۷ با مقاومت بالا و محصور شده کمتر و در نمونه ۶ با مقاومت معمولی و محصور نشده بیشترین مقدار را دارا می باشد.

و در تمام چرخه های بارگذاری کنترل گردید تا در صورت کاهش به علت تغییر شکل نمونه، اصلاح لازم جهت تصحیح بار صورت گیرد.

۳- نتایج آزمایش

۳-۱- نمودار های بار- تغییرمکان نسبی در نمونه ها

نمودارهای بار- تغییرمکان نسبی انتهای تیر در نمونه های با میلگردهای فولادی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مقدار تغییرمکان نسبی در این نمودارها بر حسب درصد بیان شده است. در نمونه های ۱ الی ۴ در شکل ۱۴ سختی و مقاومت در حلقه های پسماند در هر چرخه بارگذاری تغییر کرده است و در یک تغییرمکان نسبی مشخص، بار انتهای تیر در نمونه ها به بیشترین مقدار خود رسیده است و این مقدار در چرخه های بعدی کاهش می یابد. ظرفیت باربری نهایی نمونه ها در محدوده ۳۰ کیلونیوتن بوده و در تغییرمکان نسبی ۲ تا ۳ درصد رخ داده اند. مقایسه حلقه های پسماند نشان می دهد که مقدار جمع شدگی



شکل ۱۵. نمودار بار - تغییرمکان نسبی انتهای تیر در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی

Fig. 15. Load- Relative displacement curve at the end of beam in samples reinforced by Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars

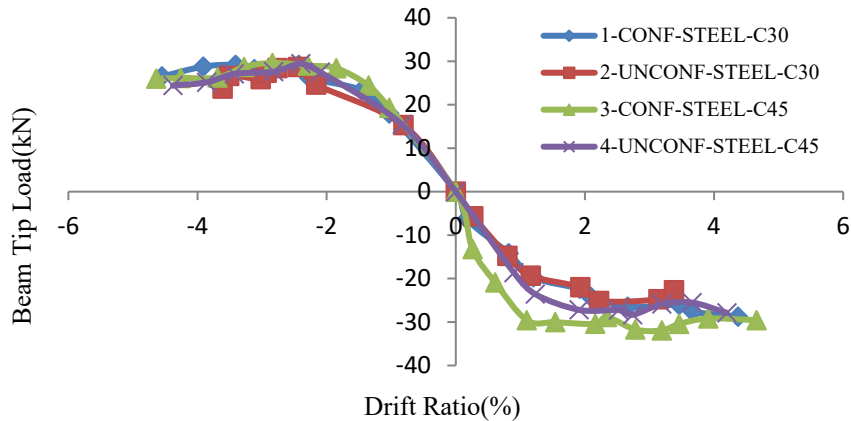
۰/۳۵- تا ۰/۳۵+ بر حسب درصد) نباید کمتر از ۰/۰۵ سختی اولیه در اولین چرخه در همان جهت باشد. با توجه به شکل های ۱۶ و ۱۷ و کنترل معیار های پذیرش آیین نامه ACI 374.1-05، رفتار لرزه ای نمونه ها ارزیابی گردید و مشخص شد عملکرد نمونه ها با میلگرد فولادی در حد قابل قبول می باشند. برای نمونه های با میلگرد پلیمری مسلح الیافی نیز کنترل معیار های پذیرش آیین نامه ACI 374.1-05 انجام گردید و عملکرد نمونه های ۷ و ۸ با مقاومت بالای بتن قابل قبول می باشند. نمونه های ۵ و ۶ به علت نداشتن شرط جابجایی نسبی ۳/۵ درصد مورد تایید قرار نگرفتند. همچنین پس از کنترل نمونه های ۵ و ۶ با توجه به پیشنهاد Corley [۶۰] مشخص شد که این نمونه ها عملکرد رضایت بخشی نداشتند. Corley [۶۰] سومین چرخه تکرار جابجایی نسبی ۳ درصد را جهت تامین معیار شکست مطرح نمود به نحوی که در این جابجایی نسبی اتصال می بایست دارای رفتار پایدار باشد. نمونه های ۵ و ۶ نتوانستند تحمل جابجایی نسبی ۳ درصد را

۳-۲- پوش منحنی های بار- تغییرمکان نسبی

نمودار پوش منحنی های بار- تغییرمکان نسبی^۱ با متصل کردن نقاط جابجایی نسبی حداکثر هر سطح جابجایی نسبی رسم شده است. شکل های ۱۶ و ۱۷ نمودار پوش منحنی های بار- تغییرمکان نسبی را در نمونه های با میلگرد فولادی و میلگرد پلیمری مسلح الیافی نشان می دهند. آیین نامه ACI 374.1-05 [۶۲] برای نمونه ها جهت پذیرش اتصال به عنوان عضوی از یک قاب خمشی در شرایط لرزه ای و بدست آوردن عملکرد رضایت بخش الزاماتی را مطرح می کند. طبق این آیین نامه، جهت تامین معیار شکست در سومین چرخه تکرار جابجایی نسبی ۳/۵ درصد، حداکثر نیروی اعمالی در هر جهت بارگذاری نباید کمتر از ۷۵ درصد حداکثر مقاومت جانبی در همان جهت باشد. نسبت انرژی جذب شده نسبی نباید کمتر از ۱/۲۵ باشد و سختی سکانتی^۲ حدود صفر (سختی سکانتی بین جابجایی نسبی

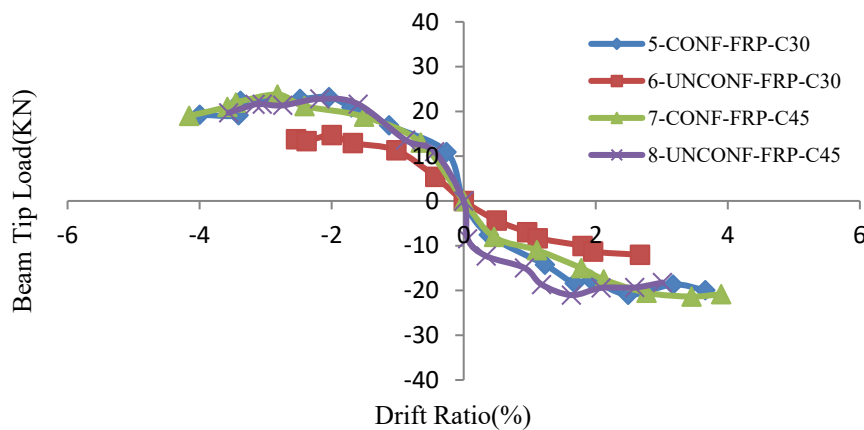
1 Load-Story Drift Envelope

2 Secant Stiffness



شکل ۱۶. پوش نمودارهای بار- تغییرمکان نسبی در نمونه های با میلگردهای فولادی

Fig. 16. Envelope curves of Load- Relative displacement in samples reinforced by steel rebars



شکل ۱۷. پوش نمودارهای بار- تغییرمکان نسبی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی

Fig. 17. Envelope curves of Load- Relative displacement in samples reinforced by Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars

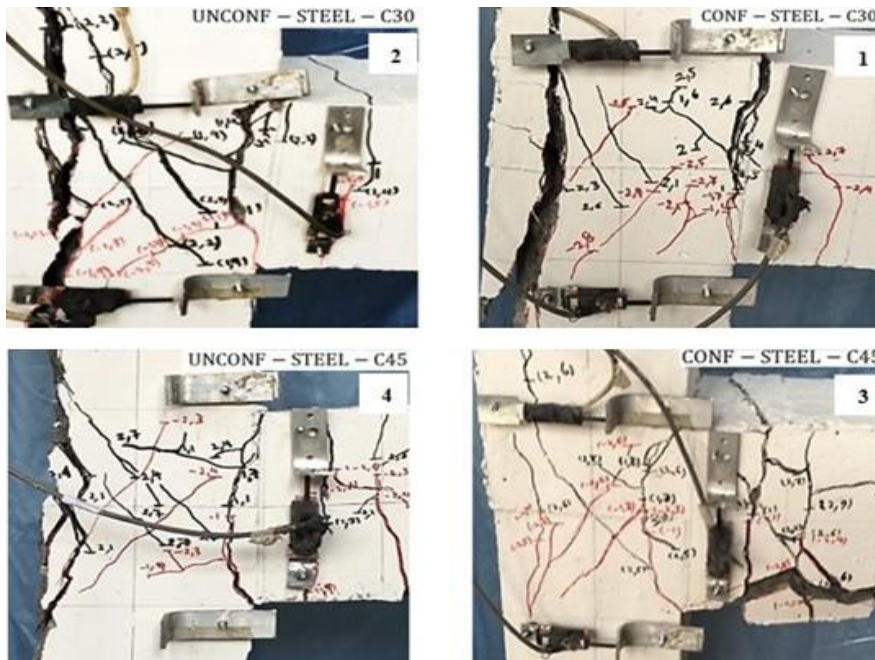
۱) و محصور نشده (نمونه ۲) شکست برشی در هسته اتصال ایجاد شده است. با افزایش مقاومت بتن در نمونه های محصور شده (نمونه ۳) و محصور نشده (نمونه ۴) شکست در خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر صورت گرفته است. عرض ترک ها در نمونه های محصور شده با بتن های معمولی و مقاومت بالا (نمونه های ۱ و ۳) نسبت به نمونه های محصور نشده (نمونه های ۲ و ۴) کمتر است. همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می شود در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در جابجایی های اولیه، ترک هایی مویی در محل اتصال تیر به ستون مشاهده شدند. پس از آن و با اعمال جابجایی بیشتر، ترک ها در مقطع نمونه پیشروی کرده و بازتر شدند و از محل اتصال تیر به ستون گسترش یافتند. در نمونه های ۶

داشته باشند گرچه نمونه ۵ توانست در بارهای چرخه ای فشاری و در جابجایی نسبی فراتر از ۳ درصد نیز پایدار بماند.

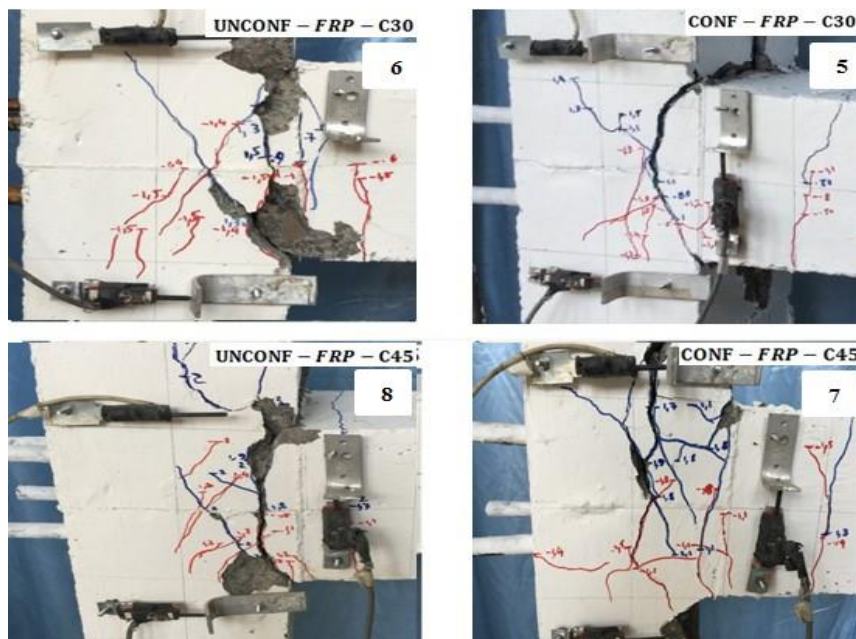
۴- تحلیل نتایج آزمایش

۴-۱- الگوهای ترک خوردگی

الگوهای ترک خوردگی^۱ در تغییرمکان نسبی ۵ درصد جهت نمونه های با میلگردهای فولادی در شکل ۱۸ و برای نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در شکل ۱۹ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می شود در اتصال تیر به ستون با میلگرد های فولادی، در نمونه با بتن معمولی محصور شده (نمونه



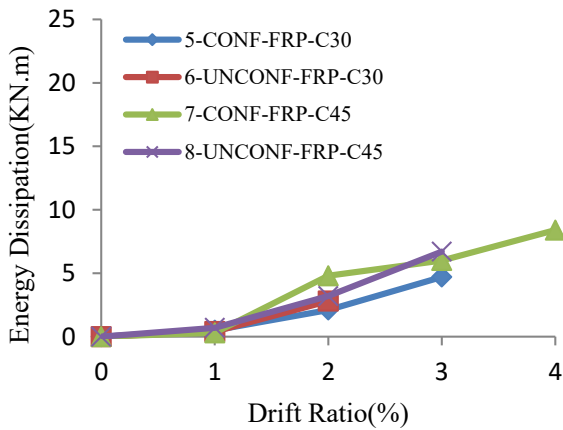
شکل ۱۸. الگوی ترک خوردگی در نمونه های با میلگردهای فولادی
 Fig. 18. Cracking pattern in samples with steel rebars



شکل ۱۹. الگوی ترک خوردگی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی
 Fig. 19. Cracking pattern in samples with Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars

شده و از مقطع جدا شدند و در جابجایی های بیشتر از ۳۵ میلی متر قسمت هایی از پوسته بتنی مقطع در محل اتصال تیر به ستون جدا شدند. در نمونه های ۵ و ۷ در بتن های معمولی و مقاومت بالا افزایش

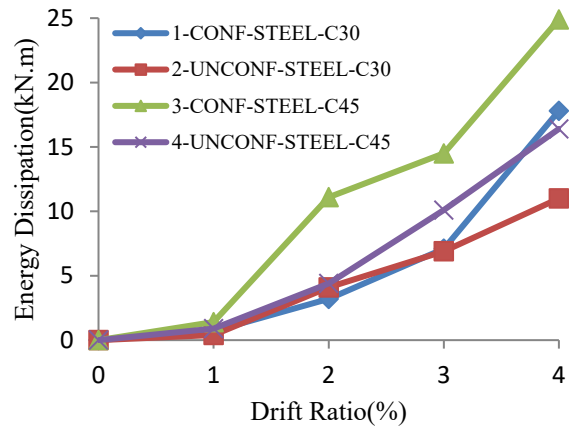
و ۸ با بتن های معمولی و مقاومت بالا، ترک ها در محل اتصال تیر به ستون گسترش یافتند و با افزایش بار چرخه ای، قسمت هایی از محل اتصال تیر به ستون که تحت فشار قرار گرفته بود از مقطع خرد



شکل ۲۱. نمودار انرژی جذب شده - تغییر مکان نسبی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی

Fig. 21. Cumulative absorbed energy-relative displacement diagram in samples reinforced by Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars

پسماند می باشد. افزایش مقاومت بتن موجب بهبود در حلقه های پسماند شده و بیشترین جذب انرژی در نمونه ۳ اتفاق افتاده است. قابلیت جذب انرژی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، رفتاری مشابه نمونه های با میلگردهای فولادی داشته است. در نمونه های ۵ و ۸ بیشترین مقدار جذب انرژی تا تغییر مکان نسبی ۳ درصد اتفاق افتاده است ولی در نمونه ۶ بیشترین مقدار جذب انرژی تا تغییر مکان نسبی ۲ درصد و در نمونه ۷ بیشترین مقدار جذب انرژی تا تغییر مکان نسبی ۴ درصد اتفاق افتاده است. در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، افزایش محصورشدگی باعث افزایش جذب انرژی خواهد شد (در نمونه های ۵ و ۷) مقدار جذب انرژی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی نسبت به نمونه های با میلگردهای فولادی در بتن با مقاومت بالا و محصور شده (در نمونه ۷) کاهش ۳۴ درصدی را نشان می دهد. همچنین مقدار جذب انرژی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی نسبت به نمونه های با میلگردهای فولادی در بتن معمولی و محصور شده (در نمونه ۵) کاهش ۲۶ درصدی را نشان می دهد. گرچه مقدار جذب انرژی در میلگردهای پلیمری مسلح الیافی کمتر از میلگردهای فولادی است ولی با توجه به مقاومت بالای میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در برابر خوردگی یکی از مهم ترین دلایل استفاده از این میلگردها به عنوان جایگزینی برای میلگردهای فولادی یا ترکیبی با میلگردهای فولادی به خصوص در سازه های دریایی است.



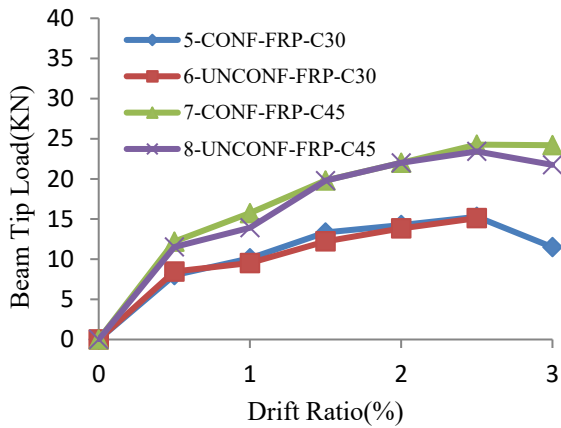
شکل ۲۰. نمودار انرژی جذب شده - تغییر مکان نسبی در نمونه های با میلگردهای فولادی

Fig. 20. Cumulative absorbed energy-relative displacement diagram in samples reinforced by steel rebars

محصور شدگی تیر باعث کاهش عرض ترک گردید اما پیشروی و گسترش ترک ها هم چنان در محل اتصال تیر به ستون بود ولی در جابجایی های بیشتر از ۴۰ میلی متر جداشدگی در پوسته بتنی مقطع در محل اتصال تیر به ستون مشاهده نشد.

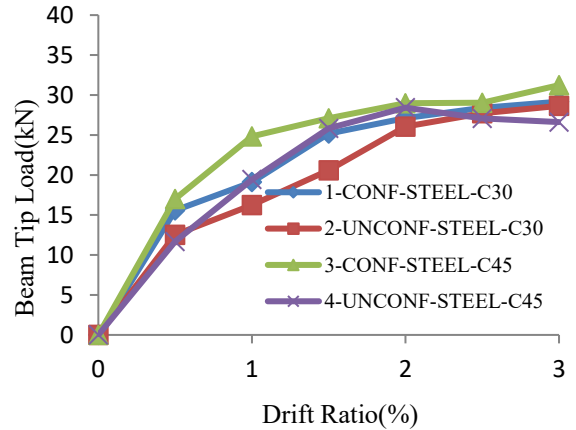
۲-۴- قابلیت جذب انرژی

قابلیت جذب انرژی از مهم ترین عامل ها در طراحی لرزه ای سازه ها می باشد. هرچه سازه بیشتر بتواند انرژی زلزله را بدون فروریزش جذب کند، شانس بیشتری برای دوام آوردن در زلزله خواهد داشت. ظرفیت انرژی سازه باید بیشتر از تقاضای انرژی باشد. در نمودارهای ۲۰ و ۲۱ انرژی تجمعی جذب شده در برابر تغییر مکان نسبی در نمونه های با میلگرد های فولادی و میلگردهای پلیمری مسلح الیافی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود قابلیت جذب انرژی در نمونه های با میلگرد فولادی، بیشتر از نمونه های با پلیمری مسلح الیافی می باشد. علت آن بیشتر بودن سطوح محصور شده در چرخه های هیستریسیس در این نمونه ها است. بالابودن مقاومت فشاری بتن و محصورشدگی نمونه را می توان دلیلی بر توانمندی نمونه در جذب بیشتر انرژی و جمع شدگی کمتر آن دانست [۳]. کمترین مقدار قابلیت جذب انرژی در این نمونه های با میلگرد های فولادی، در نمونه ۲ رخ داده است که دارای بیشترین جمع شدگی در چرخه ها بوده و دارای کمترین سطح در حلقه های



شکل ۲۳. نمودار پوش بار انتهایی تیر - تغییرمکان نسبی در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی

Fig. 23. Envelope curves of Load at the end of beam -Relative displacement of samples reinforced by Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars



شکل ۲۲. نمودار پوش بار انتهایی تیر - تغییرمکان نسبی در نمونه های با میلگردهای فولادی

Fig. 22. Envelope curves of Load at the end of beam -Relative displacement of samples reinforced by steel rebars

۴-۴- لنگر- انحنا

یکی از روش های بیان ویژگی های خمشی غیرخطی یک مقطع بتن مسلح استفاده از منحنی لنگر - انحنا^۲ می باشد. انحنا در طول عضو، به علت جابجایی ارتفاع تار خنثی و تغییر در ظرفیت باربری بتن متغیر است. همانطور که در بخش ۲-۳- دستگاه آزمایش و در شکل های ۱۰ و ۱۱، آمده است مقدار تغییرمکان قائم تیر اتصال Δ_2 ، در ناحیه بحرانی تیر توسط LVDT2 و تغییرمکان قائم Δ_5 توسط LVDT5 و تغییرمکان های افقی Δ_3 و Δ_4 توسط LVDT3 و LVDT4 برداشت گردید. θ_c دوران گره اتصال توسط LVDT3 و LVDT4 و Δ تغییرمکان توسط LVDT2 و LVDT5 با توجه به روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه است. مقدار L فاصله دو تغییرمکان سنج افقی مستقر شده بر روی ستون می باشد که این مقدار برای تمام نمونه ها حدود ۳۰۰ میلی متر می باشد. مقدار تغییرمکان کل تیر به فاصله $2h$ از بر هسته اتصال و با Δ_{Beam} نشان داده می شود و از رابطه ۳ قابل محاسبه است. در این رابطه مقدار h ، ۲۰۰ میلی متر (ارتفاع تیر) لحاظ می گردد.

$$\theta_c = \frac{\Delta_4 - \Delta_3}{L} \quad (1)$$

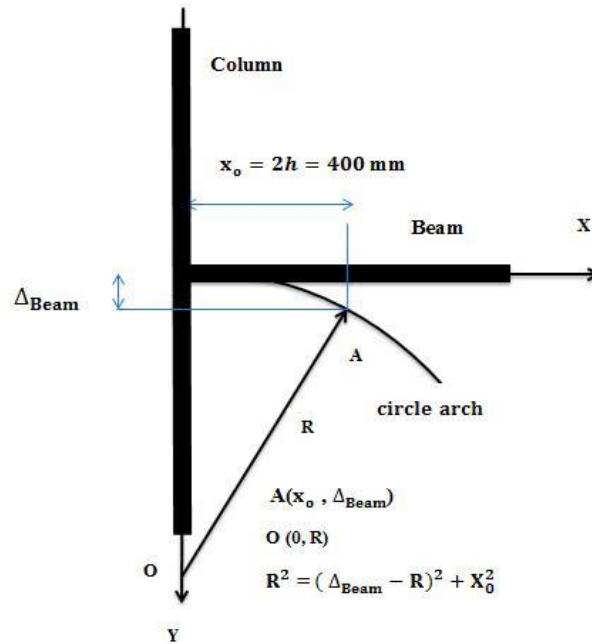
$$\Delta = \Delta_2 - \Delta_5 \quad (2)$$

$$\Delta_{Beam} = \Delta - \theta_c \times 2h \quad (3)$$

با فرض تغییرشکل تیر در ناحیه بحرانی به شکل قوسی از یک

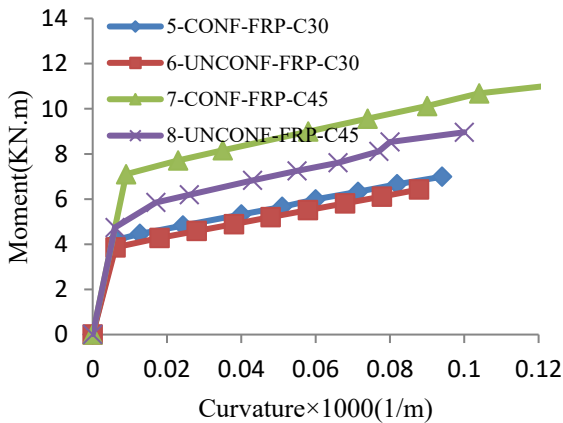
۴-۳- پوش بار انتهایی تیر - تغییرمکان نسبی

پوش بار انتهایی تیر - تغییرمکان نسبی^۱ در تمامی نمونه ها در شکل های ۲۲ و ۲۳ نشان داده شده است. در نمونه های با میلگردهای فولادی، شروع نمودار با سختی بیشتری آغاز شده است. افزایش بار تا تغییرمکان نسبی ۲ درصد، در نمونه های با میلگردهای فولادی مشهود بوده و پس از آن چندان قابل ملاحظه نیست. در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، شروع نمودار با سختی کمتری آغاز شده است. نمونه های ۵ و ۶ در این میلگردها رفتار مشابهی را نشان داد هم چنین نمونه های ۷ و ۸ نیز رفتار مشابهی داشتند. افزایش بار تا تغییرمکان نسبی ۲٫۵ درصد، در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی مشهود بوده و پس از آن چندان قابل ملاحظه نیست. علیرغم یکسان بودن تمام جزئیات نمونه ها از جمله سطح مقطع میلگردهای فولادی و پلیمری مسلح الیافی، بار انتهایی تیر در نمونه های با میلگردهای فولادی نسبت به نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی افزایش را نشان می دهد. مقدار حداکثر افزایش بار در نمونه های ۱ و ۲ با میلگردهای فولادی نسبت به نمونه های ۵ و ۶ با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی حدود ۵۰ درصد افزایش را نشان می دهد. هم چنین مقدار افزایش بار در نمونه های ۳ و ۴ با میلگردهای فولادی نسبت به نمونه های ۷ و ۸ با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی حدود ۲۰ درصد افزایش را نشان می دهد.

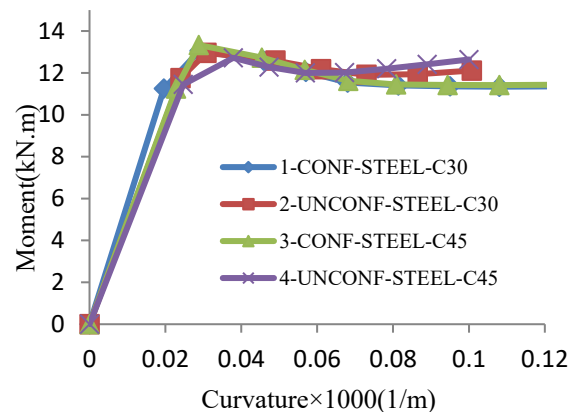


شکل ۲۴. تغییرشکل دایروی اتصال تیر به ستون

Fig. 24. Circular deformation of beam-column connection



شکل ۲۶. نمودار لنگر-انحنای نمونه‌های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی
Fig. 26. Moment-Curvature diagram of samples with Fiber Reinforced Polymer (FRP) rebars



شکل ۲۵. نمودار لنگر-انحنای نمونه‌های با میلگردهای فولادی
Fig. 25. Moment-Curvature diagram of samples with steel rebars

$$\varphi = \frac{1}{R} \quad (5)$$

X_0 فاصله اندازه‌گیری شده تغییرمکان جانبی تیر و مقدار آن برابر ۴۰۰ میلی‌متر (محل نصب LVDT2) و \varnothing انحنای تیر می‌باشد. با توجه به روابط ۱ و ۵ نمودار لنگر-انحنای نمونه‌های با میلگردهای فولادی و با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ ترسیم شده‌اند.

دایره و محاسبه شعاع دایره (R) می‌توان انحنای $(\frac{1}{R})$ را با توجه به هندسه شکل فرضی تغییرشکل تیر و روابط حاکم بر مقاومت مصالح محاسبه نمود. شعاع دایره و انحنای در مقطع بحرانی تیر با توجه به روابط ۴ و ۵ قابل محاسبه است. در شکل ۲۴ تغییرشکل دایروی اتصال تیر به ستون نشان داده شده‌است.

$$(\Delta_{Beam} - R)^2 + X_0^2 = R^2 \quad R = \frac{\Delta_{Beam}^2 + X_0^2}{2\Delta_{Beam}} \quad (4)$$

جانمایی برای میلگردهای فولادی یا ترکیبی با میلگردهای فولادی به خصوص در سازه‌های آبی است.

• بررسی نمودار پوش منحنی های بار- تغییرمکان نسبی در نمونه های با میلگرد های پلیمری مسلح الیافی نشان داد که در نمونه های با مقاومت بالا شرایط پذیرش اتصال را به عنوان عضوی از یک قاب خمشی در شرایط لرزه‌ای اقتناع نمود. هم‌چنین با بررسی رفتار نمونه ها در میلگرد های فولادی مشخص شد تمام نمونه ها شرایط پذیرش اتصال را دارند.

• در نمونه های با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، در بتن های معمولی و مقاومت بالا، ترک ها در هسته اتصال قابل ملاحظه نبودند و بارگذاری چرخه ای موجب بسته شدن ترک ها در هسته اتصال گردید. با افزایش بار چرخه ای، شکست در محل اتصال تیر به ستون به صورت خمشی در تیر ایجاد گردید. افزایش محصورشدگی تیر باعث کاهش عرض ترک گردید و حتی در جابجایی های بالا جدا شدگی در پوسته بتنی مقطع در محل اتصال تیر به ستون مشاهده نشد. در اتصال تیر به ستون با میلگرد های فولادی، شکست برشی در هسته اتصال ایجاد شد ولی با افزایش مقاومت بتن و محصورشدگی، شکست در خارج از هسته اتصال به صورت خمشی در تیر صورت گرفت.

مراجع

- [1] R. Park, T. Paulay, J.W. Reinforced Concrete Structures, Sons, New York, (1975).
- [2] T. Paulay, M.J.N. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, (1992).
- [3] M.R. Ehsani, F. Alameddine, Design recommendations for type 2 high-strength reinforced concrete connections, ACI Structural Journal, 88(3) (1991) 277-291.
- [4] A.-A. Committee, Recommendations for design of beam-column joints in monolithic reinforced concrete structures (ACI 352R-91), in, American Concrete Institute Farmington Hills, Michigan.
- [5] P. Paultre, D. Castele, S. Rattray, D. Mitchell, Seismic response of reinforced concrete frame subassemblages—a Canadian code perspective, Canadian Journal of Civil Engineering, 16(5) (1989)

شکل ۲۵ نشان می دهد که در نمونه های ۱ الی ۴ با میلگردهای فولادی نمودار لنگر- انحنا به صورت خطی ادامه یافته تا به نقطه تسلیم فولاد برسد. زمانی که فولاد جاری شده است مقدار انحنا افزایش یافته است. در صورتی که مقدار لنگر چندان تغییر نمی کند. در این نمونه ها انحنا تاثیر چندانی بر تیرها نداشته است و تمام منحنی ها تا ممان حدود ۱۴ کیلونیوتن متر رفتاری مشابه از خود نشان داده اند. محصورشدگی در نمونه ۱ موجب افزایش انحنا نسبت به نمونه ۲ شده است. هم‌چنین افزایش مقاومت و محصورشدگی در نمونه ۳، منجر به افزایش بیشتر انحنا نسبت به سایر نمونه ها شده است. شکل ۲۶ نمودار لنگر- انحنا در نمونه های ۵ الی ۸ با میلگردهای پلیمری مسلح الیافی را نشان می دهد. رفتار نمونه ها تا انحنای ۱ درصد رفتار خطی مشابهی داشته و پس از آن با افزایش لنگر انحنا افزایش یافته است. مقدار لنگر در این نمونه ها نسبت به نمونه های با میلگردهای فولادی مقادیر کمتری را نشان می دهد. در تمام نمونه ها (به جز نمونه ۷) منحنی ها تا لنگر ۴ کیلونیوتن متر رفتاری مشابه از خود نشان داده اند. محصورشدگی در نمونه های ۵ و ۷ موجب افزایش انحنا نسبت به نمونه های ۶ و ۸ شده است. هم‌چنین افزایش مقاومت و محصور شدگی در نمونه ۷، منجر به افزایش بیشتر انحنا نسبت به سایر نمونه ها شده است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، امکان استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی از جنس GFRP و میلگردهای فولادی تحت تاثیر بارهای چرخه‌ای بررسی شده است. در این پژوهش آزمایشگاهی، با ساخت و آزمایش ۸ نمونه اتصال تیر به ستون با استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی و میلگردهای فولادی و بتن های با مقاومت متفاوت، رفتار اتصال تیر به ستون بررسی شد. نتایج به دست آمده از بررسی آزمایشگاهی نمونه ها در این پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

• نتایج آزمایشگاهی نشان داد که میلگردهای پلیمری مسلح الیافی، دارای جذب انرژی مناسب بوده اند اما این مقدار جذب انرژی در مقایسه با میلگردهای فولادی کاهش بیش از ۲۵ درصد را نشان می دهد. گرچه مقدار جذب انرژی در میلگردهای پلیمری مسلح الیافی کمتر از میلگردهای فولادی است اما مقاومت در برابر خوردگی از عوامل مهم استفاده از میلگردهای پلیمری مسلح الیافی به عنوان

- concrete buildings during earthquakes, *ACI Struct. J.*, 89(4) (1992) 384-390.
- [18] M. Engindeniz, L.F. Kahn, Z. Abdul-Hamid, Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art, *ACI structural journal*, 102(2) (2005) 1.
- [19] Z. Sun, Y. Tang, Y. Luo, G. Wu, X. He, Mechanical properties of steel-FRP composite bars under tensile and compressive loading, *International Journal of Polymer Science*, (2017) 1-10.
- [20] M. Mady, A. El-Ragaby, E. El-Salakawy, Seismic behavior of beam-column joints reinforced with GFRP bars and stirrups, *Journal of Composites for Construction*, 15(6) (2011) 875-886.
- [21] M.Z. Afifi, H.M. Mohamed, B. Benmokrane, Axial capacity of circular concrete columns reinforced with GFRP bars and spirals, *Journal of Composites for Construction*, 18(1) (2014) 04013017.
- [22] M. Hasaballa, E. El-Salakawy, Shear capacity of exterior beam-column joints reinforced with GFRP bars and stirrups, *Journal of Composites for Construction*, 20(2) (2016) 04015047.
- [23] V.L. Brown, C.L. Bartholomew, FRP reinforcing bars in reinforced concrete members, *Materials Journal*, 90(1) (1993) 34-39.
- [24] A.M. Said, M.L. Nehdi, Use of FRP for RC frames in seismic zones: Part I. Evaluation of FRP beam-column joint rehabilitation techniques, *Applied Composite Materials*, 11(4) (2004) 205-226.
- [25] H.A. Toutanji, M. Saafi, Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars, *Structural Journal*, 97(5) (2000) 712-719.
- [26] S.R. Salib, G. Abdel-Sayed, Prediction of crack width for fiber-reinforced polymer-reinforced concrete beams, *Structural Journal*, 101(4) (2004) 532-536.
- [27] M. Grira, M. Saatcioglu, Reinforced concrete columns confined with steel or FRP Grids, in: *The 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 1999, pp. 445-450.
- [28] C.C. Choo, Investigation of rectangular concrete 627-649.
- [6] A. Elmenshawi, T. Brown, Hysteretic energy and damping capacity of flexural elements constructed with different concrete strengths, *Engineering Structures*, 32(1) (2010) 297-305.
- [7] J.P. Moehle, S.A. Mahin, Observations on the behavior of reinforced concrete buildings during earthquakes, *Special Publication*, 127 (1991) 67-90.
- [8] N.W. Hanson, H.W. Conner, Seismic resistance of reinforced concrete beam-column joints, *Journal of the Structural Division*, 93(5) (1967) 533-560.
- [9] C.-H. Lin, C.-L. Hwang, S.-P. Lin, C.-H. Liu, Self-consolidating concrete columns under concentric compression, *ACI Structural Journal*, 105(4) (2008) 425.
- [10] A.M. Said, M.L. Nehdi, Use of FRP for RC frames in seismic zones: Part II. Performance of steel-free GFRP-reinforced beam-column joints, *Applied Composite Materials*, 11(4) (2004) 227-245.
- [11] R.H. Scott, The effects of detailing on RC beam/column connection behaviour, *Structural Engineer*, 70(18) (1992).
- [12] B. Abdel-Fattah, J.K. Wight, Study of moving beam plastic hinging zones for earthquake-resistant design of reinforced concrete buildings, *Structural Journal*, 84(1) (1987) 31-39.
- [13] J.W. Wallace, S.W. McConnell, P. Gupta, P.A. Cote, Use of headed reinforcement in beam-column joints subjected to earthquake loads, *Structural Journal*, 95(5) (1998) 590-606.
- [14] T.H.K. Kang, S.-S. Ha, D.-U. Choi, Bar Pullout Tests and Seismic Tests of Small-Headed Bars in Beam-Column Joints, *ACI structural journal*, 107(1) (2010).
- [15] S. Barbhuiya, A.M. Choudhury, A study on the size effect of RC beam-column connections under cyclic loading, *Engineering Structures*, 95 (2015) 1-7.
- [16] L.M. Megget, R. Park, Reinforced concrete exterior beam-column joints under seismic loading, *New Zealand Engineering*, 26(11) (1971) 341.
- [17] J. Bariola, Drift response of medium-rise reinforced

- 8(2) (2004) 173-181.
- [39] W.-T. Lee, Y.-J. Chiou, M.H. Shih, Reinforced concrete beam-column joint strengthened with carbon fiber reinforced polymer, *Composite Structures*, 92(1) (2010) 48-60.
- [40] J.J. Castro, Seismic performance of Precast Concrete Beam-Column Joints, *Journal of Structural Construction Engineering of AIJ*, (1994) 113-126.
- [41] S.M. Alcocer, R. Carranza, D. Perez-Navarrete, R. Martinez, Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame, *PCI journal*, 47(3) (2002) 70-89.
- [42] A.H. Rahman, C.Y. Kingsley, K. Kobayashi, Service and ultimate load behavior of bridge deck reinforced with carbon FRP grid, *Journal of composites for construction*, 4(1) (2000) 16-23.
- [43] J.R. Yost, E.R. Schmeckpeper, Strength and serviceability of FRP grid reinforced bridge decks, *Journal of Bridge Engineering*, 6(6) (2001) 605-612.
- [44] N. Banthia, M. Al-Asaly, S. Ma, Behavior of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced plastic grid, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(4) (1995) 252-257.
- [45] S.H. Alsayed, Y.A. Al-Salloum, T.H. Almusallam, M.A. Amjad, Concrete columns reinforced by glass fiber reinforced polymer rods, *Special Publication*, 188 (1999) 103-112.
- [46] A. Mirmiran, W. Yuan, X. Chen, Design for slenderness in concrete columns internally reinforced with fiber-reinforced polymer bars, *Structural Journal*, 98(1) (2001) 116-125.
- [47] M.A. Aiello, L. Ombres, Structural performances of concrete beams with hybrid (fiber-reinforced polymer-steel) reinforcements, *Journal of Composites for Construction*, 6(2) (2002) 133-140.
- [48] H.Y. Leung, R.V. Balendran, Flexural behaviour of concrete beams internally reinforced with GFRP rods and steel rebars, *Structural Survey*, (2003).
- [49] B. Saikia, J. Thomas, A. Ramaswamy, K.S.N. Rao, Performance of hybrid rebars as longitudinal columns reinforced or prestressed with fiber reinforced polymer (FRP) bars or tendons, (2005).
- [29] V. Udhayakumar, B.H. Bharatkumar, K. Balasubramanian, T.S. Krishnamoorthy, N. Lakshmanan, Experimental investigations on flexural behaviour of RC slabs reinforced with GFRP rebars, *Journal of the Institution of Engineers. India. Civil Engineering Division*, 88(11) (2007) 23-27.
- [30] H. Fukuyama, Y. Masuda, Structural performances of concrete frame reinforced with FRP reinforcement, in: *The Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Ghent, Belgium, 1995, pp. 275-286.
- [31] R. Morphy, E. Shehata, S. Rizkalla, Bent effect on strength of CFRP stirrups, in, pp. 19-26.
- [32] M. Nehdi, H. El Chabib, A. Said, Evaluation of shear capacity of FRP reinforced concrete beams using artificial neural networks, *Smart Structures and Systems*, 2(1) (2006) 81-100.
- [33] M.K. Sharbatdar, M. Saatcioglu, Seismic design of FRP reinforced concrete structures, *Asian Journal of Applied Sciences*, 2(3) (2009) 211-222.
- [34] P.V. Vijay, Aging and design of concrete members reinforced with GFRP bars, West Virginia University, 1999.
- [35] P.X.W. Zou, Flexural behavior and deformability of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams, *Journal of composites for Construction*, 7(4) (2003) 275-284.
- [36] P.X.W. Zou, Long-term deflection and cracking behavior of concrete beams prestressed with carbon fiber-reinforced polymer tendons, *Journal of composites for construction*, 7(3) (2003) 187-193.
- [37] P.X.W. Zou, Theoretical study on short-term and long-term deflections of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams, *Journal of composites for construction*, 7(4) (2003) 285-291.
- [38] Z. Achillides, K. Pilakoutas, Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions, *Journal of Composites for construction*,

- El-Salakawy, Pavement system suiting local conditions, Concrete international, 30(11) (2008) 34-39.
- [57] H.M. Mohamed, B. Benmokrane, Design and performance of reinforced concrete water chlorination tank totally reinforced with GFRP bars: Case study, Journal of Composites for Construction, 18(1) (2014) 05013001.
- [58] P.K. Dutta, D.M. Bailey, S.W. Tsai, D.W. Jensen, J.R. Hayes Jr, Composite Grids for Reinforcement of Concrete Structures, CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LAB (ARMY) CHAMPAIGN IL, 1998.
- [59] J. Lemaitre, R. Desmorat, Engineering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failures, Springer Science & Business Media, 2005.
- [60] W.G. Corley, Ductility of Column, Wall, and Beams-How Much is Enough?, Special Publication, 157 (1995) 331-350.
- [61] J.P. Moehle, J.D. Hooper, C.D. Lubke, Seismic design of reinforced concrete special moment frames: a guide for practicing engineers. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 1, in, NIST GCR, 2008.
- [62] A.C.I. Committee, Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary, ACI, 374 (2005) 1-05.
- reinforcement in normal strength concrete, Materials and structures, 38(10) (2005) 857-864.
- [50] M. Nehdi, A. Said, Behaviour of hybrid (Steel-GFRP) reinforced concrete frames under reversed cyclic loading, Mater. Struct, 38 (2005) 627-637.
- [51] K. Kobayashi, H. Fukuyama, T. Fujisaki, S. Fukai, T. Kanakubo, Design practice of framed building structures based on AIJ design guideline 2002, in: Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes), World Scientific, 2003, pp. 1435-1444.
- [52] E.F.G. Shehata, Fibre-Reinforced Polymer (FRP) for Shear Reinforcement in Concrete Structures, University of Manitoba, Canada, 1999.
- [53] T. Nagasaka, H. Fukuyama, M. Tanigaki, Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups, Special publication, 138 (1993) 789-812.
- [54] M. Sugita, NEFMAC-Grid type reinforcement, in: Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Elsevier, 1993, pp. 355-385.
- [55] E.A. Ahmed, F. Settecase, B. Benmokrane, Construction and testing of GFRP steel hybrid-reinforced concrete bridge-deck slabs of sainte-catherine overpass bridges, Journal of Bridge Engineering, 19(6) (2014) 04014011.
- [56] B. Benmokrane, M. Eisa, S. El-Gamal, D. Thébeau, E.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Rezaee Azariani, H. Shariatmadar, M.R. Esfahani, Experimental investigation on exterior RC beam-column connections subjected to cyclic loadings using Steels, Fiber Reinforced Polymers reinforced bars, Amirkabir J. Civil Eng., 51(5) (2019) 885-906.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14060.5547](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14060.5547)

