

## بررسی رفتار اتصالات خارجی تیر - ستون بتن مسلح با HPFRCC تحت بارهای چرخه‌ای

محمدحسین ثقفی

دانشجوی دکتری سازه، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

هاشم شریعتمدار\*

دانشیار، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

### چکیده

امروزه بتن و استفاده آن در سازه‌های عمرانی به‌عنوان یکی از مصالح اصلی در صنعت ساخت‌وساز به شمار می‌آید. تمایل زیاد صنعت به استفاده از مصالح بتنی منجر به انجام تحقیقات زیادی در زمینه اصلاح معایب آن شده است. یکی از ضعف‌های مشهور در بتن، تردشکنی و عدم شکل‌پذیری ذاتی مصالح بتنی است. در سالیان اخیر نسل جدیدی از بتن‌های الیافی شکل‌پذیر تحت عنوان کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) ابداع شده است. HPFRCC یک نوع خاص از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی هستند که علامت مشخصه آن‌ها رفتار سخت‌شوندگی کرنش در کشش پس از اولین ترک‌خوردگی است. در این مقاله جهت بررسی و ارزیابی امکان استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) به منظور مرتفع ساختن نیاز آرماتورهای محصورشدگی (عرضی) و مشکلات اجرایی مربوطه در هسته اتصالات تیر به ستون تحت بارهای ناشی از زلزله دو نمونه اتصال خارجی تیر به ستون با مقیاس ۱/۲ ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته است. به نحوی که اتصالات تیر به ستون فاقد جزئیات لرزه‌ای در هسته اتصال است. اتصال اول با بتن معمولی و اتصال دوم با HPFRCC در هسته اتصال و نواحی بحرانی تیر ساخته شده است. مصالح سیمانی الیافی مورد استفاده در این مطالعه شامل الیاف ترکیبی، فولادی دو انتها قلاب و الیاف ماکروسینتتیک ترکیبی با میزان ۲٪ حجمی است. مشخصات مکانیکی پایه HPFRCC توسط آزمایش‌های فشاری و کشش تک‌محوری تعیین گردیده است. رفتار هیستریسیس، شکل‌پذیری، سختی، استهلاک انرژی، الگوهای ترک‌خوردگی نمونه HPFRCC مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و با پاسخ چرخه‌ای نمونه‌های بتن معمولی فاقد ضوابط لرزه‌ای ویژه در هسته اتصال مقایسه شده‌اند. نتایج آزمایش حاکی از آن است که در مراحل پس از ترک‌خوردگی، اتصال HPFRCC سبب بهبود قابل توجهی در ظرفیت‌های برشی، خمشی و نیز رفتار تغییر شکل و تحمل خرابی، در مقایسه با نمونه بتن معمولی در مراحل نهایی شده است. به طوری که در اتصال HPFRCC میانگین بار حداکثر ۲۱٪، شکل‌پذیری ۱۴٪ و انرژی جذب‌شده تجمعی ۲۱۷٪ نسبت به اتصال بتن معمولی افزایش داشته است. همچنین مود شکست نمونه‌های HPFRCC نسبت به بتن معمولی فاقد جزئیات لرزه‌ای از برشی به خمشی تغییر پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)، سخت‌شوندگی کرنش، اتصالات تیر به ستون، هسته اتصال، رفتار چرخه‌ای.

\* نویسنده مسئول: shariatmadar@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

تحقیق و گسترش کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند<sup>۲</sup> (HPFRCC) گردیده است.

HPFRCC نوعی از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی است که در صورت اعمال کشش مستقیم از خود پاسخ سخت‌شوندگی کرنش پس از ترک خوردگی نشان می‌دهند. هنگامی که این کامپوزیت‌ها تحت رفتار سخت‌شوندگی قرار می‌گیرند، پیش از بازشدگی ترک، ترک‌های متعددی ایجاد می‌گردد [۱۲]. مزایای HPFRCC در قیاس با بتن معمولی و FRC شامل شکل‌پذیری، دوام و ظرفیت جذب انرژی بالا است [۱۳].

در HPFRCC به دلیل عدم وجود درشت‌دانه‌ها و میزان زیاد الیاف با توزیع مناسب منجر به تأمین خاصیت سخت‌شوندگی کرنش و افزایش شکل‌پذیری سازه می‌گردد. هم‌چنین مشکلات ناشی از خاصیت شکنندگی بتن‌های متعارف نظیر خردشدگی، قلوه‌کن شدن و گسیختگی پیوند بتن می‌تواند مرتفع گردد. خاصیت کرنش کششی کامپوزیت‌های HPFRCC نه تنها باعث بهبود رفتار پس از ترک خوردگی می‌گردد، بلکه باعث افزایش پیوند تماسی بتن و آرماتورها می‌گردد [۱۴].

در شکل ۱ مقایسه کیفی پاسخ تنش-کرنش FRC و HPFRCC نشان داده شده است. با توجه به (شکل ۱) ملاحظه می‌گردد که در FRC پس از رسیدن به مقاومت ترک خوردگی کامپوزیت ( $\sigma_{fc}$ )، نرم‌شدگی حاصل می‌گردد. برخلاف آن در HPFRCC در کرنش‌های ۰/۵٪ یا بیشتر پاسخ سخت‌شوندگی پس از ترک خوردگی تا حداکثر تنش  $\sigma_{pc}$  مشاهده می‌گردد. این مشخصات توانمند منجر به افزایش استفاده از HPFRCC به منظور دستیابی به بهبود دوام در سازه‌های زیربنایی و افزایش عملکرد سازه‌ای تحت بارهای شدید شده است [۱۵].

در سال ۲۰۱۷ ثقفی و همکاران [۱۷] به ارزیابی رفتار سخت‌شوندگی کرنش در نمونه‌های HPFRCC و مقایسه با بتن معمولی پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت کششی نمونه‌های HPFRCC بین ۵ تا ۸ برابر مقاومت کششی و کرنش نهایی بین ۷۰ تا ۱۰۰ برابر کرنش نهایی نمونه بتن معمولی افزایش یافته است. فاکتور طاقت حاصل از آزمایش خمش چهار

اتصالات تیر به ستون در سازه‌های بتنی مسلح تحت تغییر مکان‌های جانبی ناشی از زلزله عموماً در معرض تنش‌های برشی بزرگ قرار می‌گیرند که ممکن است باعث آسیب‌دیدگی شدید اتصال و کاهش سختی در سازه گردد. از دهه ۱۹۶۰ تاکنون محققان بسیاری [۴-۱] تلاش‌های عمده‌ای به منظور مطالعه، بررسی و نیز توسعه توصیه‌های طراحی جهت اطمینان از رفتار مناسب و کافی اتصالات در قاب‌ها تحت تغییر شکل‌های غیر الاستیک بزرگ انجام داده‌اند. یک طراحی مناسب برای اتصالات تیر-ستون در سازه‌ها نیازمند، رعایت الزامات مقاومت و شکل‌پذیری جهت جلوگیری از خرابی ناگهانی است [۵]. کمیته ۳۵۲ ACI-ASCE، [۶] برای جلوگیری از گسیختگی برشی در ناحیه اتصال تیر-ستون، استفاده از آرماتور عرضی کافی در هسته اتصال توصیه می‌کند. وجود مقادیر زیاد آرماتور عرضی موجب تجمع فولاد و مشکل در بتن‌ریزی و متراکم کردن بتن می‌گردد، عدم ویریه مناسب بتن و کاهش کیفیت آن سبب کاهش تحمل تغییر شکل‌ها و آسیب‌پذیری اتصال هنگام زلزله خواهد شد [۷].

مخلوط‌های بتن مسلح با الیاف<sup>۱</sup> (FRC) با افزودن الیاف به مخلوط بتن به دست می‌آید. افزودن الیاف به صورت گسسته در بتن باعث افزایش ظرفیت کرنش کششی می‌گردد که این امر به دلیل ایجاد عملکرد پل زدگی الیاف در مقایسه با بتن‌های معمولی است [۸]؛ اما با افزایش تغییر شکل‌ها، بتن الیافی ترک‌خورده قادر به تحمل تنش‌های ایجادشده در اطراف ترک‌ها نخواهد بود و پس از رسیدن به مقاومت اولین ترک خوردگی از خود رفتار نرم‌شدگی کرنش کششی مطابق شکل ۱ نشان می‌دهند. تحقیقات قابل‌توجهی بر اتصالات تیر-ستون با استفاده از FRC در ناحیه اتصال، انجام گرفته است [۷، ۹-۱۱]. نتایج آزمایش‌ها، نشان می‌دهد؛ FRC موجب افزایش ظرفیت خمشی، مقاومت برشی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی می‌گردد. همچنین FRC الزامات آرماتورهای عرضی را نیز کاهش می‌دهد؛ اما هنگام افزایش درصد الیاف با مشکلاتی مانند فقدان کارایی، یکنواختی و گلوله شدن در مخلوط تازه FRC مواجه‌اند. این ضعف اساسی FRC سبب

<sup>۲</sup> High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite

<sup>۱</sup> Fiber-Reinforced Concrete

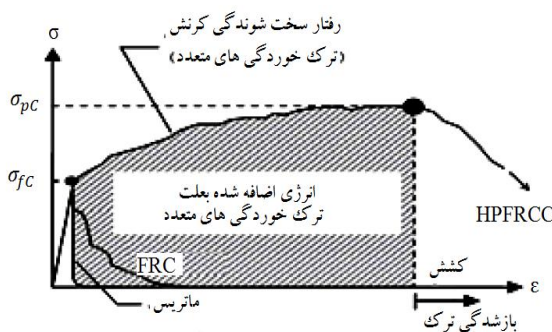
[۲۰] به منظور جلوگیری از تراکم آراماتور و کاهش میزان زیاد آراماتورهای عرضی در اتصالات خارجی تیر به ستون پل‌های راه آهن با قاب‌های صلب به استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی شده با الیاف پلی‌پروپیلن<sup>۱</sup> (PP-ECC) پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که PP-ECC در جایگزینی آراماتورهای عرضی در اتصالات تیر- ستون پل‌های راه آهن با قاب‌های صلب دارای تأثیر مثبت است.

در سال ۲۰۱۵ چیدام بارام و همکاران [۲۱] به بررسی رفتار اتصالات خارجی تیر- ستون با مصالح مختلف کامپوزیت سیمانی با استفاده از الیاف ترکیبی فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش حاکی از آن است که استفاده از مصالح HPFRCC در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی، همراه با افزایش سختی بوده و باعث افزایش ظرفیت باربری و استهلاک انرژی می‌گردند. در سال ۲۰۱۶ سید و همکاران [۲۲] بررسی اثرات کامپوزیت سیمانی مهندسی<sup>۲</sup> (ECC) در رفتار اتصال خارجی تیر - ستون بتن مسلح قابل توجهی در چرخه‌ای پرداختند. اتصال ECC سبب بهبود قابل توجهی در ظرفیت‌های برشی و خمشی و نیز رفتار تغییر شکل و تحمل خرابی، در مقایسه با نمونه بتن معمولی در مراحل نهایی و خرابی شده است. ثقفی و همکاران [۲۳] در سال ۲۰۱۶ به بررسی آزمایشگاهی و کاربرد کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند در مقاوم‌سازی اتصالات تیر به ستون پل‌های راه آهن با قاب‌های صلب پرداختند نتایج نشان می‌دهد که رفتار اتصالات تیر- ستون خارجی بهسازی شده با پانل‌های HPFRCC سبب ۹۳٪ افزایش شکل پذیری، ۴۵٪ افزایش مقاومت جانبی نسبت به اتصال بتن معمولی می‌گردد.

## ۲- اهمیت تحقیق

مطالعات آزمایشگاهی بسیاری به منظور بررسی تأثیر بتن‌های الیافی FRC در عملکرد چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون انجام شده است؛ اما به طور خاص مطالعات آزمایشگاهی اندکی به منظور بررسی تأثیر کامپوزیت‌های HPFRCC در رفتار اتصالات تیر به ستون تحت بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است. به طوری که مطالعات پیشین در خصوص استفاده از HPFRCC در اتصالات عمدتاً به

نقطه‌ای نمونه‌های HPFRCC بین ۵ تا ۹ برابر طاقت بتن معمولی و طاقت برشی نمونه‌های HPFRCC بین ۳ تا ۱۰ برابر بتن معمولی محاسبه شده است. همچنین متوسط مقاومت فشاری و کرنش نهایی نمونه‌های HPFRCC به ترتیب ۱/۸۳ و ۲/۹۴ برابر مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن معمولی است.



شکل ۱- نمونه پاسخ تنش - کرنش در کشش برای

کامپوزیت‌های HPFRCC [۱۶]

در سال ۲۰۰۵ پارا مونستینوز و همکاران [۱۸] دو نمونه اتصال میانی تیر- ستون با ابعاد واقعی که در آن‌ها هسته اتصال تیر- ستون و تیر در نواحی مفاصل پلاستیک با مصالح HPFRCC جایگزین شده بود مورد آزمایش قرار گرفت. در این نمونه‌ها در نواحی هسته اتصال آراماتورهای برشی حذف و افزایش فواصل خاموت‌ها در نواحی مفصل پلاستیک تیر صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که این اتصالات قادرند در نیروهای برشی زیاد رفتار مناسب و آسیب مداری از خود نشان دهند. همچنین دیگر مشاهدات آن‌ها نشان می‌دهد، می‌توان آراماتورهای ناحیه هسته اتصال را حذف نمود و به مقاومت برشی لازم دست یافت. از دیگر مشاهدات مهار مناسب آراماتورهای طولی تیرها در حین بارگذاری بوده است.

در سال ۲۰۱۳ همتی و همکاران [۱۹] به بررسی اثر استفاده از مصالح HPFRCC در تیرها و قاب‌های بتنی پرداختند، نتایج حاصل از آزمایش‌ها افزایش ظرفیت باربری و تغییر شکل نهایی تیرها و قاب‌های HPFRCC را نشان می‌دهد. علاوه بر این، افزایش طول و ظرفیت دورانی مفاصل پلاستیک در تیرها و قاب‌های HPFRCC نسبت به نمونه‌های مشابه بتن معمولی از سایر نتایج این پژوهش بوده است. در سال ۲۰۱۵، زهانگ و همکاران

<sup>2</sup> Engineered Cementitious Composites

<sup>1</sup> Poly Propylene Engineered Cementitious Composites

هسته اتصال و در طولی معادل ۲ برابر عمق تیر استفاده شده و مابقی اتصال از بتن معمولی استفاده شده است. جزئیات کامل نمونه‌های اتصال تیر به ستون با انواع الگوی بتن‌ریزی در جدول ۱ ارائه شده است.

به صورت شماتیک شکل ۵، چیدمان آزمایش، شرایط تکیه گاهی و نحوه‌ی بارگذاری را نمایش می‌دهد. نقاط تکیه گاهی در واقع نقاط عطف منحنی لنگر به وجود آمده بر اثر بارگذاری جانبی بر روی قاب واقعی است. لازم به ذکر است که تیر و ستون در آزمایش به اندازه ۹۰ درجه چرخش داشته و بارگذاری بر روی تیر انجام می‌شود که در شکل به صورت عمود بر سطح زمین مشاهده می‌گردد. دو انتهای ستون مفصل شده و تنها اجازه دوران دارند. برای همه نمونه‌ها بارگذاری محوری ثابت در طول آزمایش به اندازه  $200 \text{ kN}$  معادل  $0.16 f_c^{\square} A_g$  توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت  $300 \text{ kN}$  با کنترل نیرو به ستون وارد می‌شود. بعد از اعمال بار محوری ثابت  $200 \text{ kN}$  برای بارگذاری جانبی رفت و برگشتی از جک هیدرولیکی به ظرفیت  $600 \text{ kN}$  در انتهای تیر استفاده می‌شود. مقدار بار وارد بر نمونه توسط یک نیروسنج S شکل که توانایی ثبت نیروی کششی و فشاری را دارد اندازه‌گیری می‌شود و به سیستم رایانه فرستاده می‌شود. فاصله محل اعمال نیروی افقی به تیر تا بر ستون  $1250$  میلی‌متر است. تغییر مکان جانبی انتهای تیر توسط یک عدد حسگر LVDT با قابلیت جابجایی  $150 \text{ mm}$  اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. پارامتر زاویه دررفت از حاصل تقسیم تغییر مکان افقی در محل بار و فاصله محل اعمال بار تا بر ستون به دست می‌آید. نیروی افقی اعمالی بر تیر به صورت کنترل تغییر مکان با سه چرخه در هر زاویه دررفت است؛ که این تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای با زاویه‌های دررفت  $(0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5, 10)$  درصد، ادامه می‌یابد. تاریخچه بارگذاری چرخه‌ای افزایشی در شکل ۶، نشان داده شده است. برای اندازه‌گیری کرنش آرماتورها در مراحل مختلف بارگذاری برای هر نمونه اتصال ۵ کرنش‌سنج روی آرماتورهای طولی و عرضی نصب می‌گردد. همچنین تعداد ۵، LVDT جهت اندازه‌گیری دوران تیر و اعوجاج هسته استفاده شده است.

بررسی اتصالات تیر-ستون داخلی در سازه‌ها پرداخته شده است. همچنین HPFRCC استفاده شده در تحقیقات پیشین با استفاده از الیاف PVA<sup>۱</sup>، PE<sup>۲</sup> و PP<sup>۳</sup> به میزان ۲٪ الی ۳٪ حجمی تولید شده‌اند. هدف این مقاله، بررسی رفتار اتصالات خارجی HPFRCC با الیاف ترکیبی فولادی و الیاف ماکروسینتتیک ترکیبی همراه با تعیین رفتار هیسترسیس، شکل‌پذیری، سختی، استهلاک انرژی و الگوهای ترک خوردگی است.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

دو نمونه اتصال خارجی تیر-ستون با مقیاس ۱/۲ که هر دو دارای ابعاد یکسان هستند، در آزمایشگاه سازه دانشگاه فردوسی مشهد، ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای افزایشی شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته است. مطابق با شکل ۲ اتصال تیر-ستون خارجی در حالت واقعی مربوط به یک ساختمان ۵ طبقه موجود به ارتفاع طبقه ۳/۵ متر و دهانه مؤثر تیر ۵ متر از قاب بوده که پس از جداسازی 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. به منظور انجام طراحی با محاسبه نسبت مقاومت خمشی ستون به مقاومت خمشی تیر، مفهوم ستون قوی و تیر ضعیف مدنظر قرار گرفته است. ابعاد آرماتورهای طولی تیرها و ستون‌ها در دو نمونه ثابت در نظر گرفته شده است. جزئیات اتصال تیر-ستون غیر لرزه‌ای با عدم کفایت مقاومت برشی در هسته اتصال بدون خاموت در هسته اتصال است. به جز آرماتورهای عرضی در هسته اتصال آرماتورهای طولی و عرضی تیرها و ستون‌ها ضوابط لرزه‌ای ACI 318M-11 [۲۴] را برآورده می‌نماید. جزئیات آرماتورگذاری در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت بررسی اثر استفاده از HPFRCC به عنوان مصالحی برای حذف جزئیات آرماتورگذاری عرضی در هسته اتصال، الگوی بتن‌ریزی مطابق شکل ۴، با بتن معمولی و مصالح HPFRCC مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی اول بتن معمولی<sup>۴</sup> (NC)، کل اتصال تیر-ستون با بتن معمولی بتن‌ریزی می‌شود، الگوی دوم به علت گران‌قیمت بودن تولید مخلوط HPFRCC، تنها این مصالح در

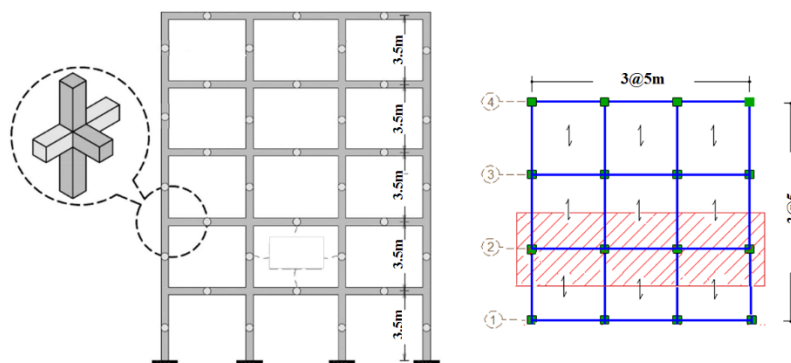
<sup>3</sup>Poly Propylene

<sup>4</sup> Normal Concrete

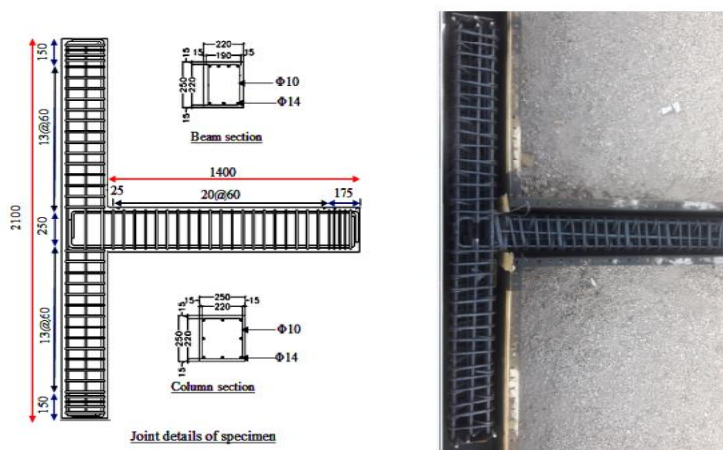
<sup>1</sup> Poly-Vinyl Alcohol

<sup>2</sup> Poly Ethylene

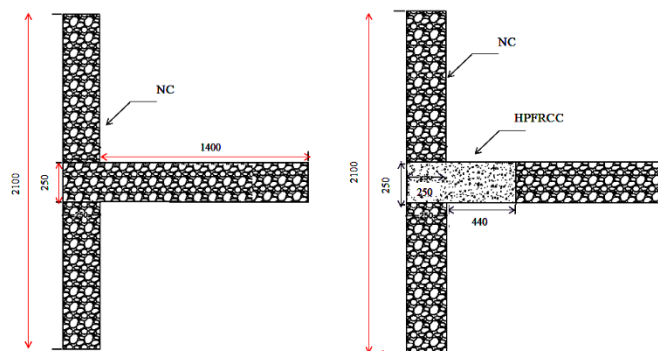
بررسی رفتار اتصالات خارجی تیر - ستون بتن مسلح...



شکل ۲- جزئیات قاب ساختمانی و اتصال تیر- ستون جداشده از قاب جهت آزمایش



شکل ۳- جزئیات ابعاد و آرماتور گذاری نمونه تیر - ستون



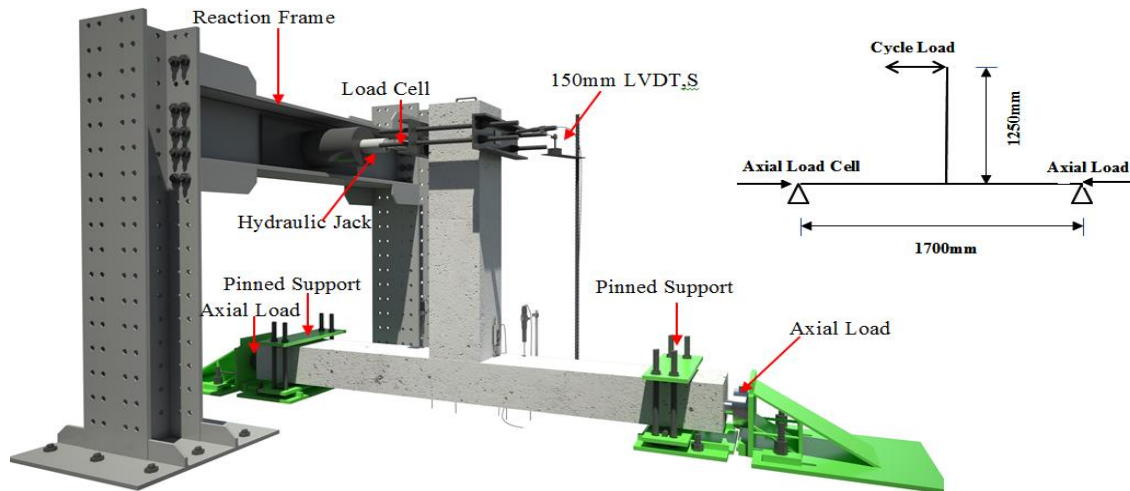
ب- الگوی بتن ریزی NC

الف- الگوی بتن ریزی HPFRCC

شکل ۴- الگوی بتن ریزی نمونه تیر - ستون

جدول ۱- جزئیات نمونه اتصال تیر به ستون خارجی

نام نمونه	آرماتور عرضی هسته	آرماتور طولی تیر (%)	آرماتور عرضی تیر و ستون	آرماتور طولی ستون
NC	0	All specimens are reinforced with 4 nos. of 14 mm $\varnothing$ at top and 3 nos. of 14 mm $\varnothing$ Bottom Reinforcement ratio=1/96%	specimens All are reinforced with $\varnothing 10 @ 60$ mm	specimens All are reinforced with 8 nos. of 14 mm $\varnothing$ Reinforcement ratio=1/97%
HPFRCC				



شکل ۵- چگونگی آزمایش و شرایط تکیه گاهی نمونه ها

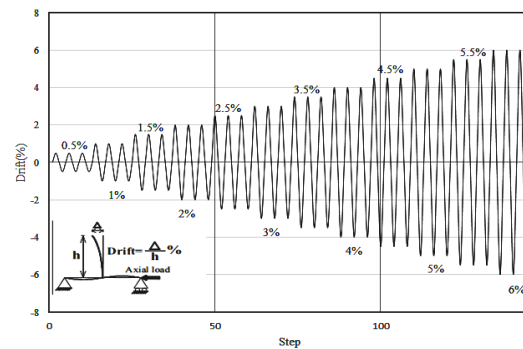
پلی اتیلن مطابق شکل ۷ استفاده شده است. مشخصات الیاف در جدول ۲ ارائه شده است. این الیافها در میزان حجمی، برابر ۲٪ حجم بتن به نسبت ۱٪ از هر الیاف در نظر گرفته شده است.



شکل ۷- الیاف فولادی دو انتها قلاب و الیاف ماکروسینتتیک

نمونه‌های آزمایش در وضعیت افقی ساخته شده‌اند. در نمونه اتصال تیر-ستون HPFRCC ابتدا بتن معمولی و پس از ۵ دقیقه، نواحی هسته اتصال و نواحی بحرانی تیر با مصالح HPFRCC ریخته شده است. در مرحله ساخت، مصالح HPFRCC و بتن معمولی با استفاده از ویراتور برقی ویریه شدند. عمل‌آوری از ۲۴ ساعت بعد از بتن‌ریزی بلافاصله بعد از قالب برداری شروع می‌شود و تا ۲۸ روز با پوشاندن نمونه‌ها با گونی خیس و آب‌پاشی، ادامه می‌یابد.

به‌منظور تعیین مشخصات مصالح HPFRCC مصرفی، آزمایش‌های فشار بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰۰×۲۰۰mm مطابق استاندارد ASTM C109-07 [۲۵] و آزمایش‌های کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های I شکل، با ابعاد ۳۰×۸۰mm توصیه‌شده توسط انجمن مهندسان عمران ژاپن<sup>۲</sup> (JSCE) [۲۶]



شکل ۶- تاریخچه بارگذاری اعمالی

#### ۴- مشخصات مصالح و ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق اجزای مصالح و طرح اختلاط استفاده‌شده، نتیجه بررسی روی نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف مصالح جهت دستیابی به رفتار سخت‌شوندگی است [۱۷]. به‌طوری‌که بهترین طرح اختلاط ملات با نسبت اختلاط وزنی مطابق جدول ۲ ارائه‌شده است. تمامی نمونه‌ها طرح اختلاط ملات یکسان دارند. سیمان مصرفی سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه شاهرود، فوق روان‌کننده استفاده‌شده بر پایه پلی‌کربوکسیلاتی بانام تجاری P9-3R محصول شرکت شیمی ساختمان، میکرو سیلیس مورد استفاده از کارخانه فرو سیلیس سمنان و ماسه استفاده‌شده در طرح اختلاط شامل سنگ‌دانه‌های خرد شده معمولی<sup>۱</sup> (NS) با قطر ۰/۱ میلی‌متر تا ۲/۴ میلی‌متر و به‌صورت میانگین ۰/۷ میلی‌متر است. در این تحقیق از الیافی شامل یک نوع فولادی و یک نوع الیاف ماکروسینتتیک ترکیبی از الیاف به‌هم‌پیچیده و تک‌رشته‌ای کوپلیمر اصلاح‌شده از پلی‌پروپیلن و

<sup>2</sup> Japan Society of Civil Engineers

<sup>1</sup> Normal Sand

انجام شده است (شکل ۸). در جدول ۳، مقاومت ترک خوردگی حداکثر مقاومت پس از ترک خوردگی، کرنش در حداکثر تنش و ظرفیت کرنش کششی (حداکثر کرنش) برای مصالح HPFRCC ارائه شده است. در شکل ۸، پاسخ تنش کششی - کرنش به دست آمده برای یکی از نمونه های I شکل ساخته شده از مصالح HPFRCC استفاده شده در نمونه اتصال نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، این نمونه خاص مصالح از خود رفتار سخت شوندگی کرنش کششی تا تقریباً ۱/۱۴٪، کرنش (حداکثر مقاومت ۵/۲۱ مگاپاسکال) نشان می دهد که به صورت

تشکیل الگوی ترک خوردگی مضاعف رخنمون می گردد. برای کرنش های بزرگ تر ایجاد آسیب دیدگی موضعی (بازشدگی متمرکز ترک) بر پاسخ مصالح غالب است به نحوی که تا بیرون کشیدگی کلی الیاف پاسخ نرم شدگی کششی اتفاق می افتد. اختلاط بکار رفته برای بتن معمولی در جدول ۲، ارائه شده است. نتایج آزمایش فشاری نشان می دهد، متوسط مقاومت فشاری برای بتن معمولی و HPFRCC به ترتیب ۳۲ و ۴۱ مگاپاسکال است. همچنین مشخصات آرماتورهای طولی و عرضی بکار رفته در اتصالات تیر-ستون در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۲- طرح اختلاط ملات HPFRCC و بتن معمولی

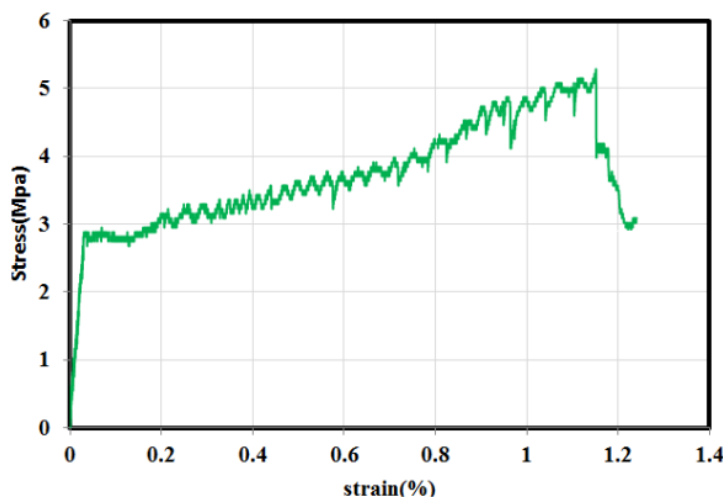
نوع بتن	مواد افزودنی (فوق روان کننده)	سیمان	میکروسیلیس	آب	ماسه	شن
HPFRCC	۰/۱۶٪ وزن سیمان	۱	۰/۱	۰/۲۸	۱	-
NC	-	۱	-	۰/۴۵	۱/۷۲	۱/۷۲

جدول ۲- مشخصات اصلی الیاف

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )
الیاف فولادی دو انتها قلاب	۳۵	۰/۸	۱۱۰۰	۲۱۲	۷۸۵۰
الیاف ماکروسیتتیک ترکیبی	۵۴	۰/۳۴	۶۶۰-۵۵۰	۴/۷	۹۱۰



ب) تجهیزات آزمایش های کششی



الف) پاسخ تنش - کرنش کششی نمونه HPFRCC

شکل ۸- آزمایش های کششی بر روی نمونه های I شکل HPFRCC

جدول ۳- نتایج آزمایش کشش تک محوری

نام نمونه	اولین ترک		مقاومت حداکثر		کرنش حداکثر
	تنش (مگاپاسکال) $\sigma_{cc}$	کرنش (%) $\varepsilon_{cc}$	تنش (مگاپاسکال) $\sigma_{pc}$	کرنش (%) $\varepsilon_{pc}$	کرنش (%) $\varepsilon_{uc}$
HPFRCC	۲/۱۴	۰/۰۲۳	۵/۲۱	۱/۱۴	۱/۲۳
NC	۲/۳۸	۰/۰۲	-	-	۰/۰۲

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی میلگردها

قطر میلگرد	مقاومت تسلیم (مگاپاسکال)	مقاومت نهایی (مگاپاسکال)	کرنش تسلیم (%)	کرنش نهایی (%)
۱۰	۳۸۰	۴۴۰	۰/۱۹	۱۷
۱۴	۴۳۰	۶۷۳	۰/۲	۱۶

## ۵- بحث و بررسی نتایج

### ۵-۱- مود گسیختگی و انتشار ترک

خارج از هسته اتصال در مرحله شروع بارگذاری در گام‌های جلوتر و نیز به علت تمرکز آسیب در ناحیه هسته اتصال اتلاف انرژی ترک‌های خمشی مورد توجه قرار نگرفته است.

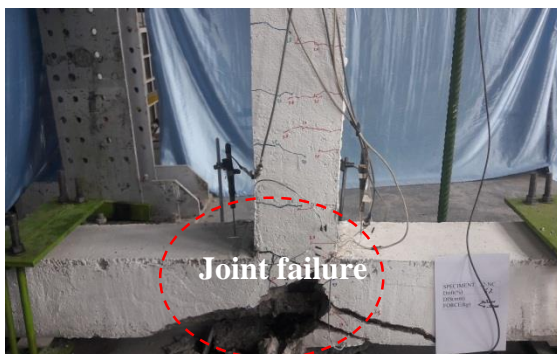
در نمونه اتصال با HPFRCC نخستین ترک خوردگی در انتهای تیر در حدود  $\frac{d}{4}$  از بر ستون، در زاویه دررفت ۰/۵٪ ظاهر می‌شود. همه ترک‌های مشاهده شده در تیر در یک فاصله در حدود ۸۰۰ میلی‌متر از بر ستون با فواصل طولی ۴۳ تا ۱۸۰ میلی‌متر از هم و طول ترک بین ۵۵ تا ۱۹۰ میلی‌متر ظاهر شده است. عرض ترک‌های ریز ایجاد شده بر روی تیر قابل توجه نیست. در زاویه دررفت ۰/۲٪ صرفاً آسیب‌های جزئی با رخنمون تعداد زیادی از ترک‌های مویی خمشی و جاری‌شدگی بخشی از آرماتورهای طولی تیر در اتصال و نواحی انتهایی تیر مشاهده شده است. شروع ترک‌های قطری مویی در زاویه دررفت ۰/۲٪ مشاهده شده است. به‌طور میانگین از زاویه دررفت ۰/۳٪ بازشدگی و تمرکز ترک، افت بار، آسیب‌دیدگی‌های موضعی در مصالح HPFRCC در نواحی مفصل پلاستیک تیر و عدم ایجاد ترک جدیدی در هسته اتصال باعث تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در تیر شده است. به دلیل بازشدگی و بسته شدن ترک متمرکز انتهای تیر تحت بارهای چرخه‌ای افزایشی بازشدگی مشهود آن در زاویه دررفت ۰/۶٪ به ۱۲ میلی‌متر می‌رسد. با افزایش تغییر مکان جانبی اعمالی، باز شدن و بسته شدن ترک‌های بسیار ریز برشی بدون گسترش ترک در ناحیه هسته همراه بوده است، میزان حداکثر بازشدگی ترک‌های برشی هسته اتصال در این نمونه‌ها ۳ میلی‌متر، تحت زاویه دررفت ۰/۶٪ اندازه‌گیری شده است. در نمونه بدون آرماتور عرضی با HPFRCC، از طریق مصالح HPFRCC،

در نمونه اتصال بتن معمولی نخستین ترک‌های خمشی در قسمت تحتانی تیر در فاصله  $\frac{d}{2}$  از بر ستون در زاویه دررفت ۰/۵٪ مشاهده شده است. به‌صورت تدریجی با پیشروی بارگذاری، ترک‌های تیر در یک فاصله در حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر از بر ستون با فواصل طولی ۴۳ تا ۱۵۰ میلی‌متر از هم و طول ترک بین ۴۵ تا ۱۶۰ میلی‌متر انتشار می‌یابد. ترک‌های قطری در هسته اتصال در زاویه دررفت ۰/۱٪ آغاز می‌شود که بیانگر گسیختگی قریب‌الوقوع اتصال است. تعداد و اندازه ترک‌های خمشی و قطری با افزایش دررفت رشد می‌کند. آرماتورهای طولی در زاویه دررفت ۰/۱٪ جاری می‌شوند. از زاویه دررفت ۰/۱۵٪ به بعد ایجاد ترک جدیدی در تیر رخ نداده است و تنها بازشدگی ترک انتهای تیر بر ستون مشاهده شده است. در زاویه دررفت ۰/۲٪ افزایش عرض ترک در ناحیه انتهای تیر و رشد ترک در هسته اتصال به‌صورت ترک‌های قطری متمرکز است. از زاویه دررفت ۰/۳٪ افت در بار آغاز می‌گردد و ترک‌ها در ناحیه هسته اتصال عریض‌تر می‌شوند. در زاویه دررفت ۰/۴/۵٪ بتن هسته اتصال ورقه ورقه شده و تخریب می‌شود و آرماتورهای طولی ستون نمایان می‌شوند. با اینکه آسیب جدی به هسته اتصال وارد شده است، بارگذاری چرخه‌ای جانبی تا زاویه دررفت ۰/۶٪ ادامه می‌یابد. عدم وجود خاموت‌های ستون در ناحیه هسته اتصال موجب گسیختگی برشی در اتصال گردید. این پدیده به‌طور واضح در الگوی گسیختگی نمونه NC، مطابق با شکل ۹-الف نشان داده شده است. همچنین به علت عدم بازشدگی ترک‌های ریز خمشی تیر



بزرگ‌تری نسبت به مقادیر متناظر در نمونه‌ای بتن معمولی آغاز می‌شود؛ که این موضوع ناشی از مقاومت چسبندگی بالاتر، پیوستگی بیشتر، سازگاری بهتر بین میلگردهای فولادی و HPFRCC و توان تحمل تغییر شکل بیشتر قبل از گسیختگی در HPFRCC است.

مقاومت برشی کافی در اتصالات بدون وقوع ترک‌های برشی موضعی، تأمین گردید که این موضوع اجازه تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها و آسیب‌دیدگی‌های موضعی در مصالح HPFRCC در نواحی مفصل پلاستیک را می‌دهد (شکل ۹-ب). جاری شدن میلگردهای طولی تیر در این نمونه در بار و زاویه دریافت



الف - گسیختگی برشی نمونه بتن معمولی در زاویه دریافت ۶٪



ب - ایجاد مفصل پلاستیک در نمونه HPFRCC در زاویه دریافت ۶٪

شکل ۹- روند آسیب و مشاهدات ترک در نمونه‌ها

سبب بهبود ظرفیت باربری، افزایش سطح حلقه‌های هیستریسیس نسبت به نمونه بتن معمولی می‌گردد؛ که این موضوع حاکی از آن است که طرح اتصال پیشنهادی برای استفاده در نواحی با خطر لرزه‌خیزی بالا مناسب است. در نمونه HPFRCC، از زاویه دریافت بیش از ۲٪ اساساً دوران‌های غیر الاستیک در نواحی تیر مجاور ستون حاکم است و رفتار سایر عناصر نمونه اتصال در ناحیه الاستیک ترک‌خورده است. به طوری که پس از حداکثر بار، به دلیل رفتار غیر الاستیک مفصل پلاستیک مقاومت به صورت جزئی در چرخه‌های تغییر مکانی کاهش یافته است. همچنین در زاویه دریافت ۶٪ به دلیل گسیختگی آرماتورهای طولی فوقانی تیر، بار به طور زیاد افت داشته است. با معکوس کردن بارگذاری، صرفاً آرماتورهای طولی تحتانی تیر در باربری شرکت نموده‌اند.

## ۲-۵- رابطه چرخه‌های بار - تغییر شکل

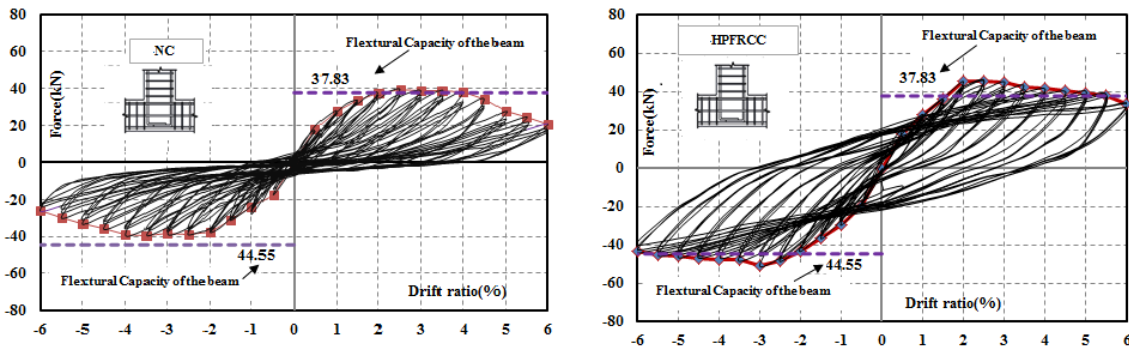
پاسخ هیستریسیس نیرو-زاویه دریافت طی سیکل‌های بارگذاری مهم‌ترین مشخصه برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اجزای سازه‌ای است. رفتار هیستریسیس به همراه نمودارهای پوش برای نقاط حداکثر زاویه دریافت سیکل اول منحنی‌های هیستریسیس دو نمونه اتصال تیر به ستون مورد آزمایش در شکل ۱۰ و نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. نمونه بتن معمولی فاقد جزئیات لرزه‌ای، پینچینگ قابل توجه و کاهش پیوسته سختی و مقاومت با افزایش زاویه دریافت را نشان می‌دهد، وقوع ترک‌های برشی در مراحل اولیه بارگذاری باعث لغزش زود هنگام آرماتورهای طولی تیر و خردشدگی بتن در ناحیه اتصال می‌گردد که این امر موجب گسیختگی برشی می‌گردد. پاسخ نمونه اتصال تیر-ستون با استفاده از HPFRCC

### ۳-۵- منحنی‌های پوش نیرو - زاویه دریفت

به گونه‌ای ترسیم می‌گردد تا تعادل انرژی در دو طرف منحنی پوش از نقطه جاری شدن عضو تا محلی که در آن بار جانبی به اندازه ۲۰٪ افت نموده است برقرار گردد.

نتایج ارائه شده در جدول ۷ نشانگر افزایش میانگین بار حداکثر نمونه HPFRCC به مقدار ۱۸/۴۱٪ نسبت به نمونه NC است. برخلاف نمونه NC، قسمت نزولی منحنی پوش سایر نمونه‌ها به تدریج دچار کاهش شده است. علی‌رغم اینکه سازگاری و پیوستگی بهتر بین میله‌های فولادی با HPFRCC افزایش مقاومت برشی و نیز افزایش جابجایی تسلیم برای نمونه HPFRCC به همراه دارد، اما به دلیل افزایش تغییر شکل گسیختگی، شکل پذیری این نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. به نحوی که کمترین ضریب شکل پذیری فشاری و کششی، HPFRCC، ۱۴٪ افزایش داشته است.

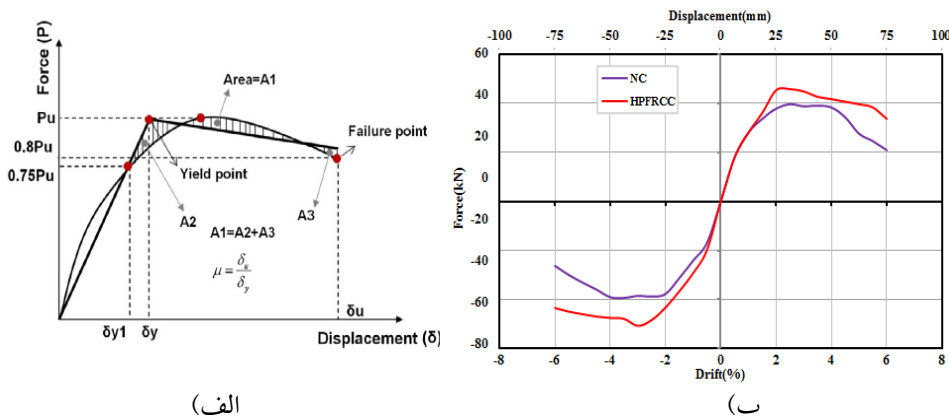
منحنی‌های پوش دو نمونه اتصال در شکل ۱۱-الف نشان داده شده‌اند. با استفاده از این منحنی‌های پوش، بار حداکثر، جابه‌جایی‌های نهایی و ظرفیت شکل‌پذیری برای نمونه‌های معمولی و HPFRCC برای جهت مثبت و منفی بارگذاری آن‌گونه که در جدول ۷ گزارش شده است، تهیه شده است. جهت تعیین جابه‌جایی جاری شدن و محاسبه شکل‌پذیری از روش پیشنهادی توسط Paulay and Priestly [۲۷] استفاده شده است. منحنی ایده آل شامل یک شاخه کاملاً الاستیک و یک شاخه بعد از الاستیک است (شکل ۱۱-ب). شاخه الاستیک از مبدأ تا محلی که شاخه دوم منحنی را قطع می‌نماید (به‌طور تقریب ۷۵٪ ماکزیمم بار) امتداد می‌یابد. شاخه بعد از الاستیک نمودار



شکل ۱۰- پاسخ هیستریک نیرو - زاویه دریفت نمونه‌ها

جدول ۷- بار حداکثر آزمایش چرخه‌ای و شکل‌پذیری در جهت مثبت و منفی بارگذاری

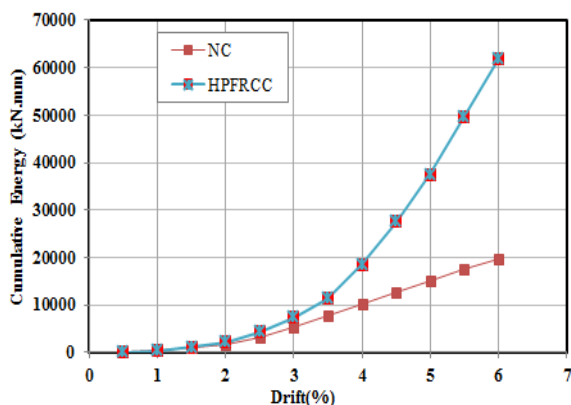
Specimen	Peak Load(KN)		Average Peak Load(KN)	Displacement at yield point (mm)		Displacement at 20% drop of peak load(mm)		Ductility factor	
	Push(+)	Pull(-)		(+)Push	Pull (-)	Pull(+)	Push(-)	Pull(+)	Push(-)
NC	38.00	37.57	37.78	15.75	18.94	58.68	66.64	3.72	3.51
HPFRCC	43.45	48.12	45.78	18.25	21.5	75	86	4.1	4.00



(الف)

(ب)

شکل ۱۱- مقایسه منحنی‌های پوش نیرو - جابه‌جایی نسبی



شکل ۱۳- اتلاف انرژی هیستریسیس تجمعی برای نمونه ها

### ۵-۵- کاهش سختی

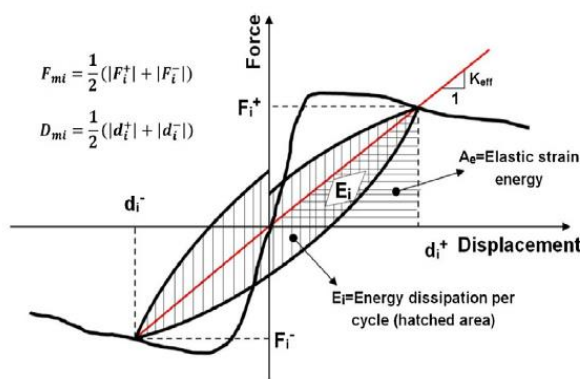
سختی متناوب اتصال تیر-ستون تقریباً برابر شیب خط نقطه حداکثر به نقطه حداکثر در هر سیکل است. سختی متناوب در چرخه‌های متفاوت با استفاده از معادله ۱، (شکل ۱۲) محاسبه شده است. در این محاسبه تنها اولین چرخه بارگذاری لحاظ شده است.

$$k_i = \frac{|F_i^+| + |F_i^-|}{|d_i^+| + |d_i^-|} \quad (1)$$

شکل ۱۴ کاهش سختی در اثر افزایش زاویه دررفت هر یک از نمونه‌های آزمایش را نشان می‌دهد. این کاهش به علت عملکردهای غیر الاستیک ناشی از ترک خوردگی خمشی و برشی، اعوجاج چشمه اتصال، تغییر شکل‌های غیرخطی بتن، از دست رفتن پوشش بتن و لغزش آرماتورها در نمونه‌های اتصال ایجاد می‌شود. کم‌ترین نرخ کاهش سختی نمایانگر رفتار شکل‌پذیرتر و بالاترین نرخ کاهش نشان‌دهنده پاسخ شکننده‌تر عناصر سازه‌ای است. آن گونه که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، نرخ کاهش سختی دو نمونه تا زاویه دررفت ۳/۵٪ به دلیل آسیب‌های اولیه و عدم آسیب‌های موضعی، یکسان مشاهده شده است؛ اما در زاویه دررفت بیش از ۴٪ به دلیل عدم محصورشدگی هسته اتصال و ایجاد ترک‌های برشی در نمونه بتن معمولی آسیب‌دیدگی موضعی در هسته اتصال سبب کاهش شدیدتر سختی نسبت به نمونه HPRCC است. همچنین حذف آرماتورهای عرضی در هسته اتصال در نمونه‌های HPRCC تأثیر کمی بر روی کاهش سختی داشته است.

### ۵-۴- ظرفیت استهلاک انرژی

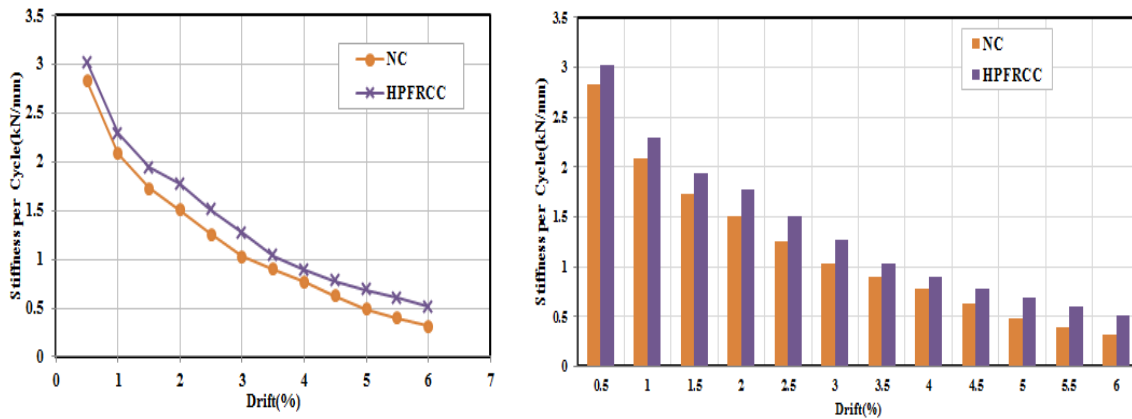
ظرفیت استهلاک انرژی، بیشترین مقدار انرژی جذب شده توسط سازه است؛ که منجر به گسیختگی تدریجی یا ناگهانی سازه می‌شود. مطابق شکل ۱۲ سطح محصور توسط یک حلقه هیستریسیک کامل در هر سیکل، بیانگر اتلاف انرژی اتلاف شده توسط نمونه طی آن سیکل ( $E_i$ ) و ظرفیت اتلاف انرژی هیستریسیس تجمعی از جمع مساحت‌های تحت منحنی‌های هیستریسیس نیرو-جابجایی ( $\sum E_i$ )، محاسبه می‌شود [۲۸]. مقایسه انرژی اتلاف شده تجمعی در برابر زاویه دررفت متفاوت نمونه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- ظرفیت اتلاف انرژی، [۲۹]

مطابق با شکل ۱۳ در مراحل اولیه و تا زاویه دررفت ۲٪ به دلیل مدول الاستیسیته نزدیک به هم نمونه بتن معمولی و HPRCC انرژی جذب شده تجمعی اتصال بتن معمولی و اتصال HPRCC تقریباً یکسان است. از زاویه دررفت ۲٪، به دلیل اینکه الیاف سبب پل زنی بین ترک‌ها و جلوگیری از گسترش و بازشدگی ترک می‌شوند مقاومت کششی، مقاومت برشی، شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی بهبود یافته و سبب حداقل کردن اثر باریک شدن حلقه‌های هیستریسیس در اتصالات تیر-ستون می‌شود. رفتار اتصال نمونه HPRCC عملکرد استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های اتصال بتن معمولی داشته است.

انرژی اتلاف شده از شروع آزمایش تا زاویه دررفت  $\pm 6\%$  برای نمونه‌های HPRCC و NC، به ترتیب برابر ۶۲/۶ و ۱۹/۷۱ کیلو نیوتن-متر به دست آمده است. به طوری که نمونه‌های HPRCC نسبت به نمونه NC، ۲۱۷٪ افزایش اتلاف انرژی داشته است.



شکل ۱۴- مقایسه سختی در هر سیکل تا زاویه دررفت ۶ درصد و سختی نقاط حداکثر اتصال بتن معمولی و HPFRCC

## ۶- نتیجه گیری

۳- در مراحل اولیه و تا زاویه دررفت ۲٪ بدلیل مدول الاستیسیته نزدیک به هم نمونه بتن معمولی و HPFRCC انرژی جذب شده تجمعی اتصال بتن معمولی و اتصال HPFRCC تقریباً یکسان است. از زاویه دررفت بیشتر از ۲٪، به دلیل اینکه الیاف سبب پل زنی بین ترک‌ها و جلوگیری از گسترش و بازشدگی ترک می‌شوند مقاومت کششی، مقاومت برشی، شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی بهبود یافته و سبب حداقل کردن اثر باریک‌شدگی حلقه‌های هیستریسیس در اتصالات تیر-ستون می‌شود. رفتار اتصال نمونه HPFRCC عملکرد استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های اتصال بتن معمولی داشته است. نمونه HPFRCC، نسبت به نمونه بتن معمولی، ۲۱۷٪ افزایش اتلاف انرژی داشته است.

## ۷- مراجع

- [1] hsani, M.R. and J.K. Wight, Behavior of external reinforced concrete beam to column connections subjected to earthquake type loading. 1982.
- [2] Megget, L. and R. Park, Reinforced concrete exterior beam-column joints under seismic loading. New Zealand Engineering, 1971. 26(11): p. 341.
- [3] Durrani, A.J. and J.K. Wight, Experimental and analytical study of internal beam to column connections subjected to reversed cyclic loading. 1982.
- [4] Craig, R.J., et al., Behavior of joints using reinforced fibrous concrete. Special Publication, 1984. 81: p. 125-168.
- [5] Bindhu, K. and K. Jaya, Strength and behaviour of exterior beam column joints with diagonal cross bracing bars. Asian journal of civil Engineering (Building and Housing), 2010. 11(3): p. 397-410.
- [6] Committee, A., Building code requirements for

نتایج حاصل از این پژوهش باهدف ایجاد اتصالات تیر به ستون با مقاومت بالا در برابر آسیب دیدگی و عدم نیاز به آرماتورهای محصورشدگی (عرضی) هسته اتصال با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند با خاصیت سخت‌شوندگی کرنش یا HPFRCC گزارش شده است. طرح پیشنهادی دو نمونه اتصال خارجی تیر-ستون با بتن معمولی و HPFRCC با مقیاس ۱/۲ دارای ابعاد یکسان تحت بارگذاری جانبی چرخه‌ای افزایشی شبه استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته است.

۱- از طریق مصالح HPFRCC، مقاومت برشی کافی در اتصالات بدون وقوع ترک‌های برشی موضعی، تأمین گردید که این موضوع اجازه تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرها و آسیب‌دیدگی‌های موضعی در مصالح HPFRCC در نواحی مفصل پلاستیک را می‌دهد. جاری شدن میلگردهای طولی تیر در نمونه HPFRCC در بار و دررفت بزرگ‌تری نسبت به مقادیر متناظر در نمونه‌ای بتن معمولی آغاز می‌شود.

۲- افزایش میانگین بار حداکثر نمونه HPFRCC، ۲۱٪ نسبت به نمونه بتن معمولی است. برخلاف نمونه بتن معمولی، قسمت نزولی منحنی پوش نمونه HPFRCC به تدریج دچار کاهش شده است و در مقدار تغییر مکان بیشتری گسیخته می‌شود که بیانگر شکل‌پذیری، توانایی جذب انرژی و گسیختگی تدریجی است. به نحوی که کمترین ضریب شکل‌پذیری فشاری و کششی، HPFRCC ۱۴٪ افزایش داشته است.

- [19] Hemmati, A., A. Kheyroddin, and M.K. Sharbatdar, Plastic Hinge Rotation Capacity of Reinforced HPFRCC Beams. *Journal of Structural Engineering*, 2013. 141(2): p. 04014111.
- [20] Zhang, R., et al., Application of PP-ECC in beam-column joint connections of rigid-framed railway bridges to reduce transverse reinforcements. *Engineering Structures*, 2015. 86: p. 146-156.
- [21] Chidambaram, R.S. and P. Agarwal, The confining effect of geo-grid on the mechanical properties of concrete specimens with steel fiber under compression and flexure. *Construction and Building Materials*, 2014. 71: p. 628-637.
- [22] Said, S.H. and H.A. Razak, Structural behavior of RC engineered cementitious composite (ECC) exterior beam-column joints under reversed cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 2016. 107: p. 226-234.
- [23] 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. *Transportation Infrastructure Engineering (JTIE)*, 2016. 2(1): p. 33-51.
- [24] Committee, A., 318M-11. Building code requirements for structural concrete (ACI 318m-11) and commentary. Farmington Hills, in American Concrete Institute. 2011: Michigan, USA.
- [25] ASTM, C349-97. Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), in American Society of Testing and Materials. 2002: USA.
- [26] 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.
- [27] Paulay, T. and M.N. Priestley, Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. 1992.
- [28] Priestley, M.N. and G.A. MacRae, Seismic tests of precast beam-to-column joint subassemblages with unbonded tendons. *PCI journal*, 1996. 41(1): p. 64-81.
- [29] Shafaei, J., et al., Effects of joint flexibility on lateral response of reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 2014. 81: p. 412-431.
- structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05). 2005, American Concrete Institute.
- [7] Henager, C., Steel Fibrous-Ductile Concrete Joint for Seismic-Resistant Structures. Special Publication, 1977. 53: p. 371-386.
- [8] Holschemacher, K., T. Mueller, and Y. Ribakov, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials & Design*, 2010. 31(5): p. 2604-2615.
- [9] Ganesan, N., P. Indira, and R. Abraham, Steel fibre reinforced high performance concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2007. 44(3-4): p. 445-456.
- [10] Abdul Ghani, K.D. and N.H. Hamid. Comparing the Seismic Performance of Beam-Column Joints with and without SFRC when subjected to Cyclic Loading. in *Advanced Materials Research*. 2013. Trans Tech Publ.
- [11] Tehrani, F.M., Performance of steel fiber-reinforced concrete in beam-column connections. 2008: University of California, Los Angeles.
- [12] Naaman, A.E., Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003. 1(3): p. 241-252.
- [13] Shih-Ho Chao, A.E.N., and Gustavo J. Parra-Montesinos, Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI STRUCTURAL JOURNAL*, November-December 2009. 106-S84: p. 897-906.
- [14] Chao, S.-H., A.E. Naaman, and G.J. Parra-Montesinos, Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites. *ACI Structural Journal*, 2009. 106(6): p. 897.
- [15] Naaman, A.E. and H. Reinhardt, High performance fiber reinforced cement composites. Naaman AE. High-performance construction materials: science and applications. Singapore: World Scientific Publishing, 2008: p. 91-153.
- [16] Reinhardt, H. and A. Naaman, High performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC3). 1999.
- [17] Saghafi, M.h., H. Shariatmadar, and A. Kheyroddin, Experimental evaluation of mechanical properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious composites. *Concrete Research (JCRE)*, 2017. 9(2): p. 29-42.
- [18] Parra-Montesinos, G.J., S.W. Peterfreund, and S.-H. Chao, Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites. *ACI Structural Journal*, 2005. 102(3).

## Structural behavior of RC High performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC) exterior beam–column joints under reversed cyclic loading

M.H. Saghafi

PHD Student, Departments of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

H. Shariatmadar \*

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

At the present paper, tow half-scale exterior beam-column connections are casted and tested under cyclic loads to investigate and evaluate the possibility of application of high performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC) to remove the necessity of confinement (transverse) reinforcements and solve the construction problems in beam-column joints under seismic loads. Fiber reinforced cementitious materials used in this study comprises 2% volume fraction of hybrid fiber, hooked end steel fiber and hybrid macro synthetic fibers. The hysteretic behavior, ductility, stiffness, energy dissipation with damping characteristics and cracking patterns of HPFRCC beam-column connections are evaluated and compared with cyclic response of normal concrete without special seismic requirements in joints. The test results revealed that HPFRCC connections considerably enhanced shear and flexural capacity and also deformation and damage tolerance behavior in post cracking stage comparing normal concrete in ultimate stages. Also, the failure mode of HPFRCC specimens changed from shear mode to flexural mode comparing the concretes without seismic detail requirements.

**Keywords:** High Performance Fiber Reinforced cement composites; synthetic fiber; mechanical properties; strain hardening; beam-column connection; Hysteresis behavior.

---

\* Corresponding Author: shariatmadar@um.ac.ir