

بررسی آزمایشگاهی رفتار خمشی و شکل پذیری تیرهای دو دهانه بتن مسلح با جایگزینی کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)

رامین احسانی^۱، محمد کاظم شربتدار^{۲*}، علی خیرالدین^۳

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

ضعف بتن ترد شکنی و عدم شکل پذیری می باشد و استفاده از الیاف فولادی یک راه حل مناسب برای غلبه بر این ضعف است. رفتار سخت شوندهگی کرنش تحت کشش که با سایر کامپوزیت های سیمانی و بتنی متفاوت است، از HPFRCC یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و قابلیت ترک خوردگی های زیاد قبل از شکست ساخته است. بنابراین کاربرد سازه ای این مواد کامپوزیتی در اعضای سازه ای مانند تیرهای سراسری، برای کنترل ترک و ارتقاء قابلیت شکل پذیری، **رو به گسترش است**. در این مقاله تاثیر استفاده از کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند حاوی ۲٪ الیاف فولادی در رفتار و عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح دو دهانه بررسی گردیده است که دو تیر با بتن معمولی و دو تیر دیگر با بتن HPFRCC بودند که هر کدام با دو نوع متفاوت چیدمان خاموت در ناحیه تکیه گاه میانی و وسط دهانه ساخته شدند. تیرها دارای دو دهانه مساوی به طول ۱۸۰۰ میلیمتر بوده و نیروی متمرکز در وسط دهانه و به صورت متقارن و به صورت افزاینده اعمال گردید. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) با ۲٪ الیاف فولادی در نمونه ها باعث افزایش شکل پذیری، جذب انرژی، و افزایش ظرفیت باربری و بهبود رفتار مناسب ناحیه مفصل پلاستیک تیرهای بتن مسلح دو دهانه سراسری گردید.

کلمات کلیدی: کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند، تیر سراسری، شکل پذیری، الیاف فولادی

*نویسنده مسئول: -----

پست الکترونیکی: -----

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های تکنولوژی بتن باعث شده است که بتن مسلح الیافی توانمند تولید شود. بتن مسلح الیافی توانمند نوع خاصی از مواد کامپوزیتی بودند، که علاوه بر فاز بتن معمولی، الیاف‌های جدا شده با توزیع تصادفی به عنوان فاز دیگر به آن اضافه شده است. یکی از این مصالح توانمند که در سالیان اخیر، پیشرفت چشمگیری داشته، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) می‌باشد. رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش که با سایر کامپوزیت‌های سیمانی و بتنی متفاوت است، از HPFRCC یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا ساخته است. از آنجا که HPFRCC یک مصالح نسبتاً جدید است، عمده پژوهش‌های انجام گرفته، بر روی شناخت ماهیت این مصالح، نسبت‌های مختلف اختلاط مصالح، ابداع کامپوزیت‌های جدید و سایر موارد مشابه متمرکز بوده است. تحقیقاتی نیز بر روی کاربردهای عملی آن در سازه‌ها انجام گرفته است اما این مطالعات به اندازه تحقیقات مربوط به شناخت رفتار خود مصالح، گسترده نبوده و نیازمند انجام کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی فراوان است که بر پایه روابط حاکم بر رفتار مصالح انجام می‌گیرد. در تعدادی از مقالاتی که اخیراً منتشر شده است، پیشنهادهایی برای استفاده ترکیبی از بتن معمولی و HPFRCC داده شده است، اما کارهای عددی و آزمایشگاهی کمتری بر روی آنها انجام گرفته است. لذا ضرورت دارد مطالعات بیشتری بر روی مباحث سازه‌ای و کاربردی این مصالح انجام گیرد و رفتار خمشی سازه‌های ساخته شده با این مصالح توانمند بررسی گردد.

در سال ۲۰۰۳، نامان و رینهارت مصالحی، که دارای یک بخش سخت‌شوندگی کرنش کششی در منحنی تنش - کرنش خود بوده اند، را به عنوان کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند معرفی کردند. مصالح HPFRCC جدا از بتن‌های الیافی (FRC) دسته بندی شده اند، بطوری که کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند یک نوع خاص از کامپوزیت‌های FRC هستند و علامت مشخصه آنها رفتار سخت‌شوندگی کرنش در کشش پس از اولین ترک خوردگی است و با چندین ترک به کرنش‌های نسبتاً بالایی می‌رسند [۱]. مطالعات لی و همکاران مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل پذیری کششی ۳ تا ۵ درصدی را نشان داد [۳،۲]. همچنین مصالح CARDIFRC که در دانشگاه کاردیف ولز مورد آزمایش قرار گرفت، یکی از انواع مختلف HPFRCC می‌باشد که توسط فریت، نیکلایدیس، کانولپوس و کاریهالو در سال ۲۰۰۶ آزمایش شد و مقاومت فشاری تا ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی تا ۲۷ مگاپاسکال را نشان داد [۴]. رفتار خمشی HPFRCC متأثر از شکل پذیری کششی آن است. در این خصوص بررسی‌های فراوانی توسط کونیدا و همکاران انجام شده است [۵]. بر اثر خمش، میکرو ترک‌های چند گانه در انتهای تیر شکل می‌گیرند و اجازه تحمل انحنای بزرگ را به آن می‌دهند. مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی (MOR) تیر به ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد و تغییر شکل‌های بزرگ به سادگی قابل دستیابی است. این موارد توسط استانگ و همکاران بررسی شده‌اند [۷]. همتی و همکارانش، مطالعات آزمایشگاهی و عددی برای ارزیابی تاثیر مقاومت فشاری، نوع بارگذاری و نسبت آرماتور کششی، بر روی مشخصات تغییرشکل نهایی تیرهای HPFRCC مسلح، انجام دادند و نشان دادند که چنانچه شرایط بارگذاری از حالت بار متمرکز در وسط، به حالت بار یکنواخت، تغییر کند، ظرفیت چرخش مفصل پلاستیک، افزایش می‌یابد [۸]. همتی و همکاران همچنین به بررسی اثر استفاده از مصالح HPFRCC در تیرها و قابهای بتنی پرداختند، نتایج حاصل از آزمایش، افزایش ظرفیت باربری و تغییرشکل نهایی تیرها و قابهای HPFRCC را نشان داد. علاوه بر این، افزایش طول و ظرفیت دورانی مفاصل پلاستیک در تیرها و قابهای HPFRCC نسبت به نمونه‌های مشابه بتنی از سایر نتایج این پژوهش بود [۹ و ۱۰]. شربتدار و همکاران به بررسی اثر مقاوم سازی سازه‌های بتن مسلح با ورق‌های FRP در میزان شکل پذیری و عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پرداختند [۱۱]. مستوفی نژاد و همکاران، مطالعات آزمایشگاهی در خصوص تاثیر مقاوم سازی قابها و تیرهای سراسری با استفاده از ورق‌های FRP در میزان شکل پذیری و باز توزیع لنگر را بررسی نمودند [۱۲ و ۱۳]. مقصودی و همکاران مطالعات آزمایشگاهی و عددی در مورد تاثیر استفاده از بتن با مقاومت بالا و مقاوم سازی شده با ورق‌های CFRP در میزان شکل پذیری و باز توزیع لنگر تیرهای سراسری انجام دادند [۱۴ و ۱۵]. ثقفی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی و کاربرد کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند در مقاوم سازی اتصالات تیر به ستون پلهای راه آهن با قاب‌های صلب پرداختند. نتایج نشان داد که رفتار اتصالات تیر-ستون خارجی بهسازی شده با پانل‌های HPFRCC سبب ۹۳٪ شکل پذیری، ۴۵٪ افزایش مقاومت جانبی نسبت به اتصال بتن معمولی، می‌گردد [۱۶]. لویز و همکاران مطالعاتی در مورد ظرفیت چرخش مفصل پلاستیک تیرهای بتنی با مقاومت بالا انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش مقاومت فشاری بتن میزان باز توزیع لنگر کاهش می‌یابد. زیرا افزایش مقاومت بتن موجب کاهش کرنش نهایی بتن گردیده و در نتیجه باعث کاهش نسبت

ظرفیت لنگر نهایی نسبت به لنگر تسلیم می شود [۱۷]. لین و چن تاثیر میزان فولاد عرضی و طولی و مقاومت فشاری بتن را بر شکل پذیری و بازتوزیع لنگر، در ۲۶ نمونه تیر بتن آرمه سراسری آزمایش کردند. آنها نتیجه گرفتند که فولاد عرضی، موجب محصور شدن بتن می گردد. همچنین کاهش فولاد کششی و افزایش فولاد فشاری، افزایش شکل پذیری را به دنبال دارد [۱۸]. نامان و همکارانش با آزمایش بر روی ۱۸ تیر بتن مسلح الیافی دو دهانه به نتایجی در خصوص ویژگی‌های پلاستیک این تیرها دست یافتند. این پژوهشگران روابطی برای محاسبه طول جاری شدن آرماتور کششی، ضریب شکل پذیری و ظرفیت دوران پلاستیک تیرهای با الیاف فولادی ارائه دادند [۱۹]. میسرا و لی یک تیر بتن مسلح و یک تیر بتن مسلح با لایه پایینی HPFRCC را تحت آزمایش بارگذاری دونقطه‌ای قرار دادند و الگوهای ترک خوردگی آنها را با یکدیگر مقایسه نمودند [۲۰]. همتی و همکاران رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح کامپوزیتی الیافی توانمند را با تاثیر ضخامت لایه HPFRCC در ارتفاع مقطع تیر تحت آزمایش خمش دو نقطه ای بررسی نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که تیرهای ساخته شده با HPFRCC دارای شکل پذیری بیشتری نسبت به تیرهای ساخته شده با بتن معمولی است [۲۱]. یانگ و همکاران از ۱۲ تیر بتن مسلح دو دهانه برای بررسی آزمایشگاهی و عددی استفاده کردند، تیرها با عمق مختلف و آرماتورهای طولی و عرضی یکسان در بالا و پایین دهانه و بدون تقویت جان بودند. نتایج آزمایش نشان داد که تیرها با ترک خوردگی قابل ملاحظه ای شکستند و تاثیر عمق تیر بر مقاومت برشی در تیرهای عمیق سراسری نسبت به تیرها با تکیه‌گاه‌های ساده، بیشتر می‌باشد. همچنین در این تحقیق امکان استفاده از کامپوزیت‌های HPFRCC به عنوان ماده‌ی جایگزین برای بتن معمولی مورد بررسی قرار گرفته است. منحنی بار-جابجایی تیرهای آزمایش شده و برخی از دیگر پارامترهای حاصل از عملکرد خمشی، از قبیل ظرفیت جذب انرژی، فاکتورهای پلاستیسیته و حداکثر مقاومت و باز توزیع منحنی لنگر مورد ارزیابی قرار گرفته شده است [۲۲]. در تحقیقات انجام شده توسط فلاح و همکاران کاربرد ورق‌های پیش ساخته بتنی HPFRCC برای تقویت دال‌های بتنی ضعیف بررسی گردید که نتایج نشان از تاثیر بسیار بالای بتن‌های پیش ساخته توانمند الیافی برای تقویت اعضا بتن مسلح ضعیف بود [۲۳ و ۲۴]. همچنین در تحقیقی آزمایشگاهی از این نوع بتن ویژه توانمند الیافی بصورت خودمترکم برای ساخت دال‌های بتنی جدید بصورت دو و سه لایه استفاده شد و نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از این نوع کامپوزیت باعث بهبود رفتار خمشی دال‌های بتنی می‌گردد [۲۵].

هدف از این تحقیق آزمایشگاهی که با تمرکز روی رفتار خمشی تیرهای دو دهانه سراسری ساخته شده با مصالح HPFRCC و خاموت گذاری فشرده، در مقایسه با تیرهای سراسری ساخته شده با بتن معمولی و خاموت گذاری غیر فشرده انجام گردید، بررسی الگوهای رفتاری این سازه‌ها، بررسی ظرفیت باربری و تغییر شکل سازه، چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در تیرهای بتنی و HPFRCC و تفاوت آنها، شکل پذیری برای ایجاد مفصل خمیری با ظرفیت چرخش کافی برای تحلیل غیر خطی یا تحلیل خطی با بازتوزیع لنگر بود. بنابر این سعی شده است به این نکات در این مقاله پرداخته شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- خصوصیات مصالح مصرفی

در این تحقیق اجزای مصالح و طرح اختلاط استفاده شده در ساخت کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند، نتیجه بررسی روی نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف مصالح جهت دستیابی به رفتار سخت شوندگی است. به طوری که بهترین طرح اختلاط با نسبت اختلاط وزنی مطابق جدول ۱ ارائه شده است. مقدار سیمان بکار رفته در ساخت تیرها، از نوع سیمان پورتلند با وزن مخصوص $3/05 \text{ gr/cm}^3$ بوده و ماسه استفاده شده در طرح اختلاط بتن HPFRCC با قطر $0,1$ میلی‌متر تا $2,4$ میلی‌متر و به صورت میانگین $0,7$ میلی‌متر است. در ساخت بتن معمولی (NSC) از سنگدانه‌های با حداکثر قطر 10 میلی‌متر استفاده شده است و ماسه‌ی مورد استفاده نیز در محدوده‌ی زیر الک نمره‌ی ۴ ($4/75$ میلی‌متر) قرار دارد. همچنین از میکروسلیس با چگالی $2/2 \text{ gr/cm}^3$ و فوق روان ساز با پایه پلی کربوکسیلاتی با وزن مخصوص $1/07 \text{ gr/cm}^3$ در ساخت تیرهای بتنی استفاده شده است. الیاف مصرفی در ساخت بتن الیافی توانمند از نوع فولادی قلابدار به طول 30 و قطر $0,6$ میلی‌متر و مشخصات آنها مطابق با استاندارد ASTM A 820 می‌باشد با نسبت طول به قطر 50 و چگالی معادل فولاد و مقاومت کششی 1100 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته 200 گیگاپاسکال است. مشخصات الیاف فولادی در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۱: نسبت‌های مخلوط HPFRCC و بتن در هر متر مکعب

ماده	سیمان (Kg)	ماسه	شن (kg)	آب (kg)	فوق روان کننده (kg)	میکرو سیلیس (kg)	درصد الیاف فولادی (%)
HPFRCC	۸۵۰	۱۰۶۲	-	۲۵۷	۱۳,۷۷	۸۵	۲
بتن معمولی	۴۵۰	۵۹۷	۱۰۸۳	۲۱۰	-	-	-

جدول ۲: مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در آزمایش.

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت طول به قطر $(\frac{D}{L})$	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	چگالی $(\frac{kg}{m^3})$
فولادی قلابدار	۳۰	۰,۶	۵۰	۱۱۰۰	۲۰۰	۷۸۵۰

جهت تعیین مقاومت فشاری بتن معمولی و HPFRCC از شش عدد نمونه مکعبی (سه نمونه برای بتن معمولی و سه نمونه برای HPFRCC) با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلیمتر مطابق شکل (۱) استفاده شد. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مکعبی برای بتن معمولی $42/62$ و برای HPFRCC $82/94$ مگاپاسکال مطابق جداول (۳) و (۴) بودند.



شکل ۱: تجهیزات آزمایش تعیین مقاومت فشاری بتن.

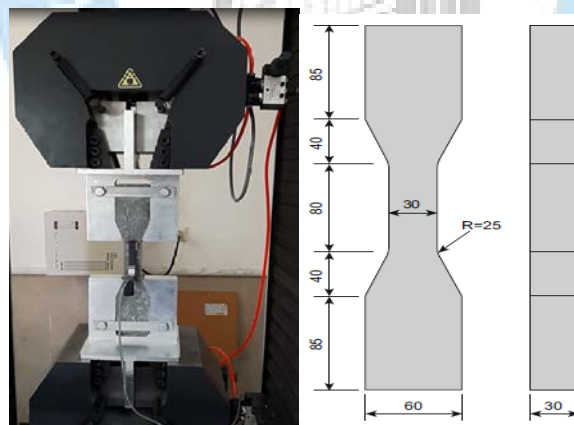
جدول ۳: مقاومت فشاری نمونه های مکعبی بتن معمولی.

مقاومت فشاری (MPa)	بار (KN)	وزن مخصوص (kg/dm^3)	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	وزن (kg)	نمونه ها
۴۱,۴۸	۹۳۳,۳	۲,۲۲	۱۵	۱۵	۱۵	۷,۵۱	۱
۴۲,۷۳	۹۶۱,۴۲	۲,۲۳	۱۵	۱۵	۱۵	۷,۵۹	۲
۴۳,۶۷	۹۸۲,۵۷	۲,۲۵	۱۵	۱۵	۱۵	۷,۶۲	۳
۴۲,۶۲	۹۵۹	۲,۲۳	متوسط				

جدول ۴: مقاومت فشاری نمونه های مکعبی HPCRCC.

مقاومت فشاری (MPa)	بار (kN)	وزن مخصوص (kg/dm ³)	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)	وزن (kg)	نمونه ها
۷۹,۴۶	۱۷۸۷,۸۵	۲,۳۲	۱۵	۱۵	۱۵	۷,۸۳	۱
۸۳,۴۳	۱۸۷۷,۱۷	۲,۳۳	۱۵	۱۵	۱۵	۷,۸۸	۲
۸۵,۹۳	۱۹۳۳,۴۲	۲,۳۵	۱۵	۱۵	۱۵	۷,۹۳	۳
۸۲,۹۴	۱۸۶۶,۱۴	۲,۳۳	متوسط				

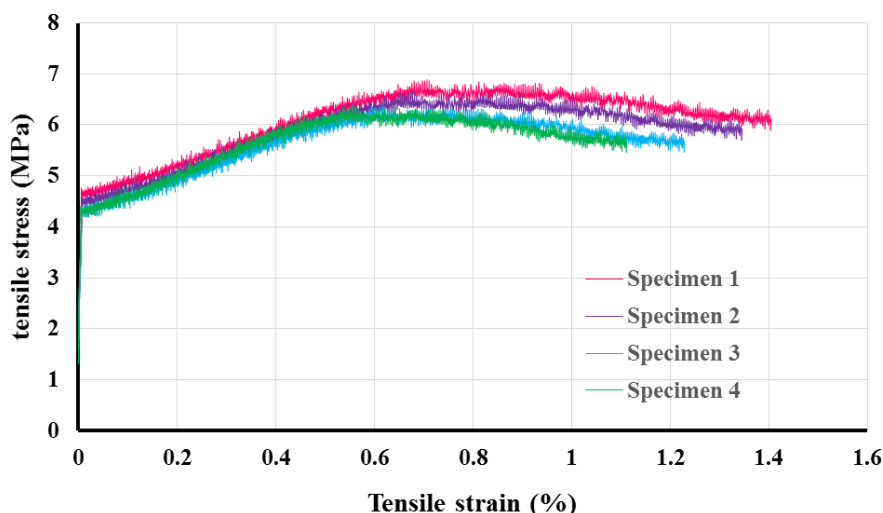
آزمایش های کشش تک محوری بر روی نمونه های دمبلی شکل مطابق با شکل (۲) با ابعاد توصیه شده توسط انجمن مهندسان عمران ژاپن (JSCE) [۲۶] انجام شده است. با استفاده از تجهیزات آزمایش کشش تحت شرایط کنترل، تغییر مکان با سرعت بارگذاری ۰,۱ میلی متر بر دقیقه و با استفاده از فک های طراحی شده، نمونه در دستگاه آزمایش قرار گرفت. طی آزمایش، نیروی بارگذاری و تغییر طول اندازه گیری شده است. به منظور تعیین تغییر طول از یک دستگاه اکتوسومتر در وجه مرکز نمونه کششی در راستای بارگذاری استفاده شده است. شکل (۲). الگوی ترک خوردگی و منحنی تنش - کرنش کششی نمونه هایی که تحت نیروی کششی محوری مورد آزمایش قرار گرفته اند، در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شده است. حداکثر تنش کششی و کرنش نمونه مورد آزمایش مطابق جدول (۵) به ترتیب MPa ۶/۷۹ و ۱/۳۸٪ بود.



شکل ۲: تجهیزات آزمایش کشش تک محوری.



شکل ۳: نمونه ای از الگوی ترک خوردگی در نمونه HPCRCC.



شکل ۴: رابطه تنش - کرنش HPFRCC با ۲٪ مقدار حجمی الیاف.

جدول ۵: نتایج آزمایشگاهی تنش کششی تک محوره.

نمونه	تنش اولین ترک (MPa)	کرنش اولین ترک (%)	تنش نهایی (MPa)	کرنش در ۹۰٪ تنش نهایی (%)
۱	۴,۵۲	۰,۰۱۸	۶,۷۹	۱,۳۸
۲	۴,۳۷	۰,۰۲۳	۶,۵۳	۱,۳۴
۳	۴,۱۹	۰,۰۲۰	۶,۲۳	۱,۲۲
۴	۴,۱۹	۰,۰۱۵	۶,۳۰	۱,۱۱

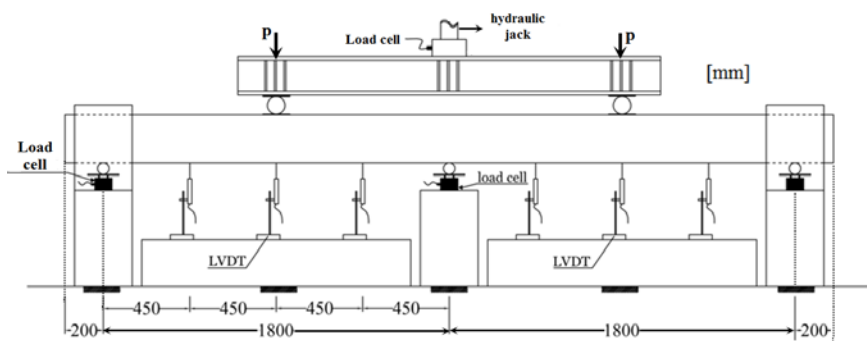
در جدول ۶ برخی از ویژگی های مهم مرتبط با آرماتورهای فولادی برای تمامی ابعاد مورد استفاده در تیرها نشان داده شده است. مقاومت تسلیم (f_y)، کرنش تسلیم (ϵ_{sy})، مقاومت نهایی (f_u) و کرنش نهایی (ϵ_{su}) به عنوان مقادیر میانگین از آزمایش های استاندارد میلگردها ارائه شده است.

جدول ۶: مشخصات فولاد بکار رفته در نمونه ها.

نوع میلگرد	قطر میلگرد (mm)	مقاومت تسلیم (f_y) (MPa)	کرنش جاری شدن (ϵ_{sy}) (%)	مقاومت نهایی (f_u) (MPa)	کرنش نهایی (ϵ_{su}) (%)	مدول الاستیسیته (E_s) (MPa)
میلگرد طولی	۱۴	۵۲۰	۰/۲۵	۶۴۰	۱۶	۲۱۰
میلگرد طولی	۱۰	۵۳۰	۰/۲۴	۶۶۳	۱۶	۲۱۰
میلگرد عرضی	۸	۵۱۰	۰/۲۰	۷۸۰	۱۴	۲۱۰

۲-۲- چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور مطالعه رفتار خمشی تیرهای دو دهانه با بتن معمولی و HPRCC، می‌بایست نمونه‌هایی انتخاب شوند که تا حد امکان به مقیاس واقعی نزدیک باشند تا بتوان به نتایج قابل اعتمادی دست یافت. ابعاد تیرها با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی از قبیل ظرفیت جک اعمال نیرو، فاصله قاب‌ها و تکیه‌گاهها و کف صلب آزمایشگاه انتخاب گردید. لذا بررسی متغیرهای ابعادی تیرهای سراسری از قبیل ابعاد مقطع تیر و طول نمونه‌ها مقدور نبود. تیرها شامل دو دهانه‌ی مساوی با دو تکیه‌گاه غلتکی در دو انتها و یک تکیه‌گاه مفصلی در وسط بود. جهت اعمال بار از یک جک هیدرولیکی به ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن برای اعمال بار متمرکز در وسط یک تیر صلب فولادی توزیع کننده بار به وسط هر یک از دهانه‌های تیر استفاده گردید. همچنین برای اندازه‌گیری واکنش‌های تکیه‌گاهی از سه نیرو سنج در محل تکیه‌گاهها استفاده گردیده و برای صحت سنجی، نتایج خروجی نیروسنج‌ها با نتایج حاصل از روابط تعادل استاتیکی و آنالیز خطی مقایسه گردید. برای اندازه‌گیری بار کل اعمال شده توسط جک هیدرولیکی، یک نیرو سنج با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلو نیوتن مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، تغییر شکل‌ها دو دهانه تیر سراسری نیز اندازه‌گیری گردید. این کار توسط LVDT‌ها در سه نقطه‌ی مختلف صورت گرفت که این نقاط عبارتند از: وسط طول دهانه، یک چهارم طول دهانه و سه چهارم طول دهانه. کرنش سنج‌های الکتریکی (ESG)، برای آرماتورهای فولادی طولی و بتن استفاده شده است که طول آنها به ترتیب ۱۰ و ۳۰ میلی‌متر بود، مقاومت الکتریکی آن 3 ± 120 اهم بود و به سطح آرماتور و بتن در قسمت بحرانی تکیه‌گاه میانی و وسط‌های دهانه متصل گردید. جزئیات بیشتر در شکل ۸ نشان داده شده است. با توجه به فاصله قابهای صلب آزمایشگاه و با در نظر گرفتن این محدودیت طول کلی تیرها ۴۰۰۰ میلی‌متر انتخاب شد. فاصله‌ی مرکز به مرکز هر یک از تکیه‌گاه‌های تیر از یکدیگر ۱۸۰۰ میلی‌متر بود. طول آزاد هر یک از دهانه‌ها به دو قسمت مساوی تقسیم و نیروی متمرکز در وسط و به صورت متقارن اعمال شد. در کلیه نمونه‌های تحت آزمایش، ابعاد مقطع عرضی تیرها دارای ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر و عرض ۲۰۰ میلی‌متر انتخاب گردید. نسبت آرماتور مصرفی (P1، P2) در این تیرها به طریقی انتخاب شد که مقطع به حالت پرفولاد نزدیک نگردد و انهدام خمشی حاکم باشد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، ازدو عدد آرماتور فوقانی به قطر ۱۴ میلی‌متر به عنوان میلگرد طولی سراسری در بالا و پایین مقطع تیر و در محل لنگر ماکزیمم وسط دهانه از سه عدد میلگرد نمره ۱۴ و یک عدد میلگرد نمره ۱۰ و در تکیه‌گاه میانی از سه عدد میلگرد نمره ۱۴ استفاده گردید. در مقطع تکیه‌گاه میانی، نسبت آرماتور (P1) برابر با ۰/۰۱ و در مقطع وسط دهانه نسبت آرماتور (P2) ۰/۱۲ بود. این بدان معنی است که نسبت آرماتور طولی در مقطعی در وسط دهانه ۱،۲ برابر آرماتور در مقطع تکیه‌گاه میانی است تا باز توزیع لنگر پلاستیک اتفاق بیفتد. همچنین در نمونه‌های با آرماتور فشرده از آرماتورهای با قطر ۸ میلی‌متر به فاصله مرکز به مرکز ۱۰۰ میلی‌متر در وسط دهانه و به فاصله‌ی ۵۰ میلی‌متر در ناحیه برشی و در نمونه‌های با خاموت غیر فشرده از آرماتورهای ۸ میلی‌متر به فاصله مرکز به مرکز ۱۵۰ میلی‌متر در وسط دهانه و ۱۰۰ میلی‌متر در ناحیه‌ی برشی جهت خاموت گذاری تیرها استفاده گردید. علاوه بر این، نسبت میلگرد‌های استفاده شده بیشتر از مقدار حداقل بود بنا براین شکست ترد در نمونه‌ها رخ نداد. مساحت خاموت‌های مورد استفاده در این نمونه‌های آزمایشگاهی به طریقی انتخاب گردید که از آرماتورهای حداقل برشی بیشتر باشد، لذا شکست برشی در این تیرها رخ نداد و رفتار خمشی حاکم بود. مقدار آرماتورهای عرضی در این مطالعه آزمایشگاهی متغیر بود. دو تیر RC.S و FHP.S با نسبت آرماتور عرضی $(\rho_v = 2 Av/bs)$ برابر بیشتر از تیرهای RC.N و FHP.N در تکیه‌گاهها و حدود ۱/۵ برابر بیشتر از تیرهای RC.N و FHP.N در وسط دهانه مطابق با آیین نامه آیین نامہ ACI 318-99 [۲۷] طراحی و ساخته شد. قبل از بارگذاری تیرها، تمامی کرنش‌سنج‌ها نصب شد و نیرو سنج‌ها و LVDT‌ها به Data Logger و کامپیوتر وصل گردید و نظارت کامل در هنگام بارگذاری صورت گرفت. در شکل (۴) و (۵)، ابعاد و جزئیات چیدمان تجهیزات آزمایشگاه و روش اعمال بار به نمونه‌ها نشان داده شده است. مراحل ساخت تیرها و نصب کرنش‌سنج و همچنین ابعاد کلی نمونه‌ها و جزئیات آرماتورگذاری در اشکال (۶) تا (۱۰) نشان داده شده‌اند. ضمناً جزئیات آرماتورها و ویژگی‌های بتن تیرهای آزمایش شده در جدول ۶ داده شده است.



شکل ۴: نمای شماتیک چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی.



شکل ۵: چیدمان و تجهیزات بکار رفته در آزمایشگاه.



شکل ۶: طریقه اعمال نیرو توسط جک هیدرولیکی به تیرهای سراسری.



(ب)



(الف)

شکل ۷: الف) نیرو سنج جهت اندازه گیری نیروی عکس العمل تکیه گاهها و ب) تغییر مکان سنج جهت اندازه گیری تغییر مکان قائم تیرها.

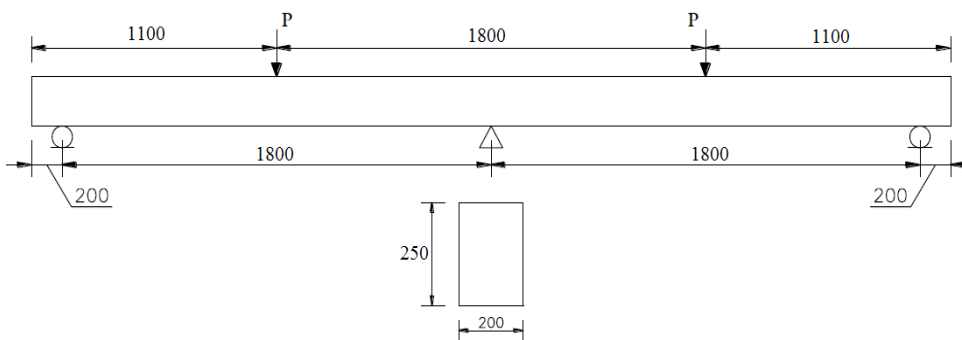


(ج)

(ب)

(الف)

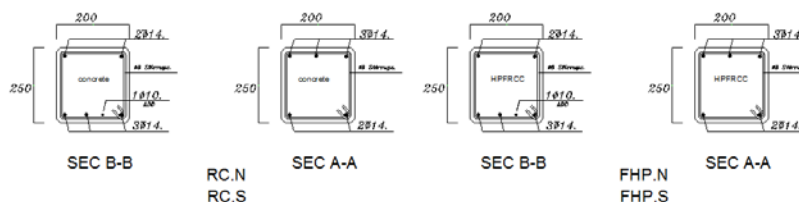
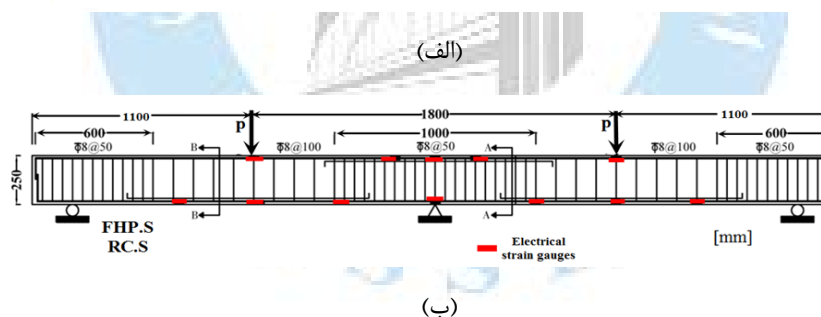
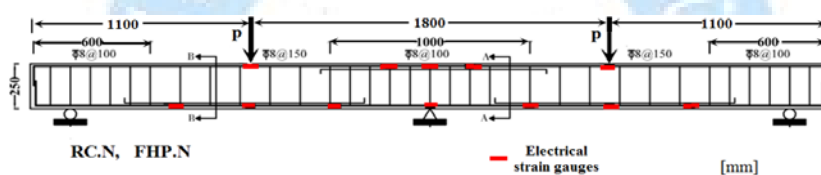
شکل ۸: الف) قالب بندی نمونه ها. ب) محل نصب کرنش سنج ها بر روی آرماتورها. ج) طریقه نصب کرنش سنج بر روی آرماتور



شکل ۹: ابعاد نمونه های آزمایش (واحد: میلی متر).

جدول ۷: جزئیات آرماتور و ویژگی بتن تیرهای آزمایش شده.

نام نمونه	ابعاد مقطع	مقاومت فشاری بتن معمولی و HPFRCC (MPa)	مقاومت کششی بتن معمولی و HPFRCC (MPa)	میلگرد طولی در ممان منفی (M)	میلگرد طولی در ممان مثبت (M ⁺)	خاموت در تکیه گاه	نسبت آرماتور عرضی در تکیه گاهها (ρ_v) (%)	خاموت در وسط دهانه	نسبت آرماتور عرضی در وسط دهانه (ρ_v) (%)
	b×h (mm)								
RC.N	200×250	36.22	3.44	3Ø14+1Ø10 (540.35)mm ²	3Ø14(462)mm ²	Ø8@100	0.5	Ø8@150	0.33
RC.S	200×250	36.22	3.44	3Ø14+1Ø10 (540.35)mm ²	3Ø14(462)mm ²	Ø8@50	1	Ø8@100	0.5
FHP.N	200×250	70.50	6.79	3Ø14+1Ø10 (540.35)mm ²	3Ø14(462)mm ²	Ø8@100	0.5	Ø8@150	0.33
FHP.S	200×250	70.50	6.79	3Ø14+1Ø10 (540.35)mm ²	3Ø14(462)mm ²	Ø8@50	1	Ø8@100	0.5



شکل ۱۰: جزئیات آرماتورگذاری تیرها: (الف) آرایش آرماتورها در نمونه های RC.N و FHP.N، (ب) آرایش آرماتورها در نمونه های RC.S و FHP.S

، (ج) مقاطع تیرها

۳- مشاهدات و نتایج آزمایش

نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها بعنوان پاسخ بار- تغییر مکان، مقایسه مودهای گسیختگی، الگوی ترک خوردگی، مقادیر بار و خیز، شکل پذیری تغییر مکان و انرژی در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد.

۳-۱- مد شکست و رفتار کلی

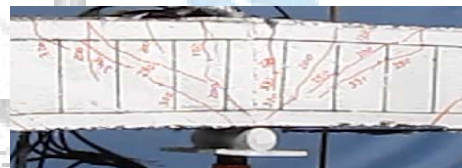
به طور کلی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که آغاز و انتشار ترک‌ها در تیرها به مقاومت کششی بتن و نوع آرماتور بستگی دارد. بنابراین، اولین ترک‌ها در تیرهای مورد آزمایش از تکیه گاه میانی شروع گردید. ترک‌های اولیه عمودی بر اساس خمش اتفاق افتاده و به دنبال آن ترک‌های عمودی مشابه در وسط دهانه ظاهر گردید. بنابراین الگوی ترک خوردگی نمونه RC.N و RC.S مشابه یکدیگر بود و اولین ترک‌ها در این دو تیر سراسری در ناحیه ممان منفی تکیه گاه میانی اتفاق افتاد. با افزایش بار، ترک‌های خمشی عمودی و مورب جدید در ناحیه ممان منفی و مثبت مشاهده شد. تعداد ترک‌ها در تکیه گاه میانی و وسط دهانه در تیرها با خاموت‌های با فاصله ی کم تر بیشتر از تیرها با خاموت‌های با فاصله ی زیاد تر بود، خاموت‌ها به عنوان بازدارنده ترک عمل کرده و عامل مؤثر برای کنترل عرض ترک‌های خمشی بودند. **الگوی شکست تیرهای مورد آزمایش در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ نشان داده شده است.**



(الف)



(ج)



(ب)

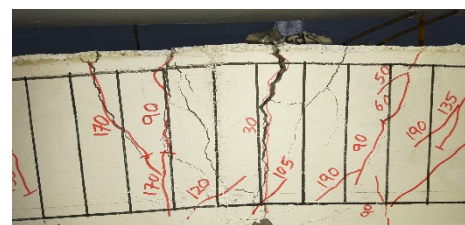
شکل ۱۱: (الف) الگوی شکست تیر RC.N (ب) گسترش ترک در تکیه گاه میانی (ج) گسترش ترک در وسط دهانه



(الف)

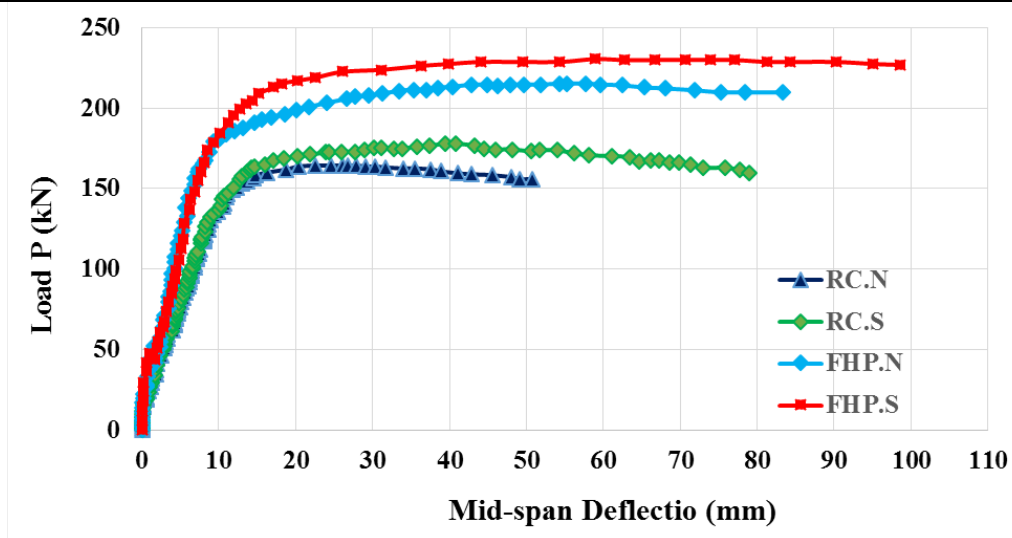


(ج)



(ب)

شکل ۱۲: (الف) الگوی شکست تیر RC.S (ب) گسترش ترک در تکیه گاه میانی (ج) گسترش ترک در وسط دهانه

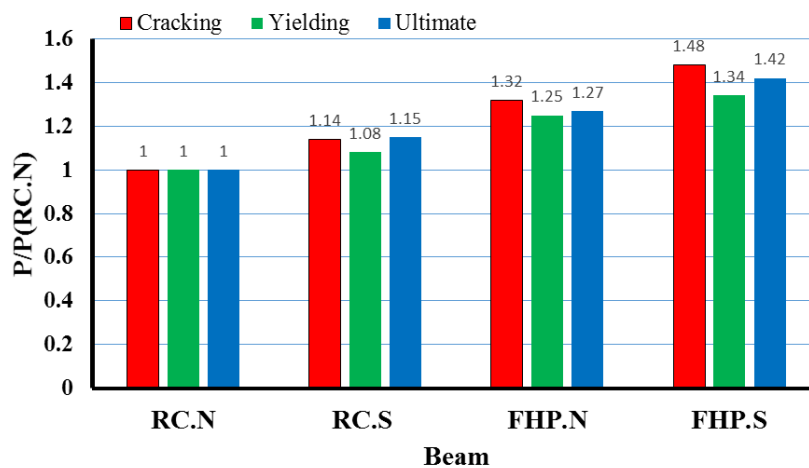


شکل ۱۵: منحنی های بار - تغییر شکل برای تیرهای مورد آزمایش.

جدول ۸: پارامترهای پاسخ بار- تغییر مکان تیرها در لحظه ترک خوردگی، تسلیم و نهایی.

$\frac{P_u}{P_{u(RC.N)}}$	در لحظه نهایی		در لحظه تسلیم		در لحظه ترک خوردگی		نام نمونه
	Δu	P_u	$\Delta y(mm)$	$P_y(kN)$	$\Delta cr(mm)$	$(kN)P_{cr}$	
۱,۰	۵۰,۷۱	۱۶۱,۸۵	۱۱,۲۸	۱۴۷,۴۸	۱,۷۶	۳۱,۲۵	RC.N
۱,۱۵	۷۸,۹۹	۱۸۶,۹۴	۱۴,۲۷	۱۶۰,۲۱	۱,۶۳	۳۵,۹۳	RC.S
۱,۲۷	۸۳,۲۷	۲۰۵,۶۳	۱۲,۱۹	۱۸۴,۱۵	۱,۵۲	۴۱,۳۲	FHP.N
۱,۴۲	۹۸,۶۶	۲۲۹,۸۸	۱۲,۸۴	۱۹۸,۷۳	۱,۴۱	۴۶,۲۷	FHP.S

مقایسه بار ترک خوردگی، بار تسلیم، بار نهایی برای نمونه ها در شکل (۱۶) نشان داده شده است. بار ترک خوردگی در نمونه های FHP.S و FHP.N در مقایسه با RC.N و RC.S به علت اثرات سخت شدن کامپوزیت HPFRCC افزایش می یابد. علاوه بر این، تیرهای ساخته شده با خاموت فشرده در مقایسه با تیرهای با خاموت غیر فشرده، یک افزایش در بار ترک خوردگی، بار تسلیم و بارهای حداکثر، به دلیل کاهش و محدود کردن عرض ترک و عدم گسترش ترک خوردگی برشی و خمشی، را نشان می دهد. افزایش بار در تیرهای ساخته شده با ترکیبات HPFRCC قابل توجه بود. در مورد ترکهای مشاهده شده در تیرهای کامپوزیتی HPFRCC، می توان نتیجه گرفت که پل زدن الیاف در ناحیه کششی می تواند عرض این ترک ها را کنترل و تعداد ترک های بیشتر و ریزتر را ایجاد کند. بنابراین، باعث می شود که افت نیرو در این تیرها با سرعت کم تری نسبت به تیر بتن معمولی اتفاق بیفتد و تیرهای دارای کامپوزیت HPFRCC رفتار شکل پذیرتری از خود نشان دهند. با در نظر گرفتن قابلیت بهره برداری و اطمینان خاطر از رضایت بخش بودن خدمت پذیری عضو خمشی، تغییر شکل ایجاد شده در تیرها تحت بار بهره برداری نباید از مقادیر $\frac{l}{480}$ الی $\frac{l}{180}$ (۳,۷۵ میلیمتر الی ۱۰ میلیمتر برای تیرهای مورد آزمایش) مطابق با مقدار مجاز طبق آئین نامه ACI 318M-08 بسته به نوع و عملکرد سازه، تجاوز نماید. که با توجه به نتایج آزمایش ها تغییر شکلهای ایجاد شده در بار بهره برداری در محدوده رضایت بخش آئین نامه قرار داشت.



شکل ۱۶: مقایسه بارها در حالت ترک خوردگی، جاری شدن و نهایی نمونه ها

۳-۳- مقایسه حالت شکست و الگوی ترک خوردگی

با مشاهده منحنی های بار-تغییرمکان در شکل (۱۵) و مقایسه الگوهای گسیختگی نمونه‌ها در شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) مشاهده شد که نمونه‌های RC.S و FHP.S و FHP.N رفتار شکل پذیرتری نسبت به نمونه RC.N از خود نشان دادند، اولین ترک ها در تیرهای مورد آزمایش از تکیه گاه میانی شروع گردید. با وارد شدن بار بر تیرها، در ابتدای بارگذاری که شدت بار اعمالی کم بود، سازه به صورت الاستیک خطی عمل نمود و پاسخ سازه به صورت خطی بود و با بار اعمالی متناسب داشت. در مقطع بحرانی (تکیه گاه میانی)، با رسیدن بار به مقدار بار ترک خوردگی، میزان سختی در مقطع کاهش یافته و در این حالت باز توزیع لنگر رخ داد، یعنی مقطع بحرانی (تکیه گاه میانی) مقداری از لنگر وارده را به مقاطعی که هنوز ترک نخورده است (وسط دهانه)، منتقل نمود. تیرهای HPFRCC و دارای آرماتور برشی فشرده دارای تعداد و عرض ترک کمتری نسبت به نمونه RC.N بودند. دلیل این امر تاثیر تقویت HPFRCC در جلوگیری از انتشار ترک به دلیل پل زدن الیاف در محل ترک بود. در تیر RC.N، آرماتورهای کششی در ناحیه ممان منفی در بار ۱۴۷،۴۸ کیلو نیوتن و قبل از خرد شدن بتن جاری شده و با افزایش بار، ترکهای خمشی در ناحیه تکیه گاه میانی و وسط دهانه باز تر شده و میزان این ترکها در طول تیر گسترش یافت. شکست تیر در بار نهایی ۱۶۱،۸۵ کیلو نیوتن و با خرد شدن ناگهانی بتن ناحیه فشاری اتفاق افتاد. در تیر RC.S آرماتورهای کششی در ناحیه تکیه گاه میانی در بار ۱۶۰،۲۱ کیلو نیوتن تسلیم گردید و تیر در تکیه گاه میانی در بار ۱۸۶،۹۴ کیلو نیوتن شکست. همانطور که در شکل (۱۲) می توان دید. این تیر به ابتدا به علت گسیختگی کششی آرماتورهای طولی و ترکهای خمشی بتن در ناحیه تکیه گاه میانی و سپس در وسط دهانه دچار شکست گردید. همانطور که از شکل (۱۲) مشخص است به علت استفاده از خاموت های فشرده در این تیر تعداد ترکهای خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک در بار نهایی افزایش یافته اما از عرض و گسترش ترکها خمشی و برشی در طول تیر سراسری کم شده است. همچنین در اثر استفاده از خاموت فشرده در نواحی برش ماکزیمم ظرفیت بارنهایی این تیر نسبت به تیر RC.N به میزان ۱۵ درصد افزایش نشان می دهد. بار تسلیم در تیر FHP.N، ۱۸۴،۱۵ کیلو نیوتن و قبل از خرد شدن بتن در تکیه گاه میانی و وسط دهانه رخ داد. در تیر FHP.N ابتدا ترک های خمشی در نواحی تکیه گاه میانی و وسط دهانه ایجاد شده و با افزایش بار ترک های بیشتری نیز در دهانه برش بوجود آمد. سپس یک ترک بحرانی در ناحیه خمش به ناحیه فشاری بتن نفوذ و تیر در بار نهایی ۲۰۵،۶۳ کیلو نیوتن دچار شکست گردید. الگوی ترک خوردگی تیر FHP.N در شکل (۱۳) مشاهده می شود. فولاد کششی در تکیه گاه میانی از تیر FHP.S در بار ۱۹۸،۷۳ کیلو نیوتن تسلیم شد. تیر بر اثر گسیختگی فولاد کششی و خرد شدن بتن در تکیه گاه میانی و وسط دهانه در بار نهایی ۲۲۹،۸۸ کیلو نیوتن شکست. الگوی ترک خوردگی و نحوه شکست تیر FHP.S در شکل (۱۴) نشان داده شده است. در تیرهای دارای HPFRCC، مقاومت در برابر ترک خوردگی و سختی اولیه نمونه‌ها افزایش یافته است. افزایش در بار ترک خوردگی در تیرهای ساخته شده با HPFRCC، در مقایسه باتیر ساخته شده با بتن معمولی، به نقش کامپوزیت‌های HPFRCC در محدود کردن گسترش ترک‌ها نسبت داده می‌شود.

۳-۴- شکل پذیری

شکل پذیری عبارت است از توان و تحمل یک سازه که تحت رفتار غیر ارتجاعی و بدون کاهش در مقاومت و سختی خود بتواند تغییر شکل قابل توجهی را داشته باشد. شکل پذیری برای سازه های نامعین استاتیکی مانند تیرهای سراسری، مهم تر است، زیرا امکان باز توزیع لنگر را از طریق چرخش مفاصل پلاستیک فراهم می کند. شکل پذیری به طور کلی توسط شاخص شکل پذیری (μ) اندازه گیری می شود. شاخص شکل پذیری معمولاً بر مبنای نسبت دوران (θ)، انحنای (ϕ)، تغییر شکل (جابجایی) Δ و انرژی جذب شده (E) در بار نهایی به مقدار هر یک از آنها در بار جاری شدن فولاد تعریف می شود. شکل پذیری جابجایی از نوع شکل پذیری خیز عضو است و به لحاظ سهولت اندازه گیری آزمایشگاهی، از سهولت بیشتری نسبت به دیگر انواع شکل پذیری برخوردار است. شاخص شکل پذیری جابجایی با رابطه ۱ تعریف می شود:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

که Δ_u جابجایی وسط دهانه در بار نهایی است و Δ_y جابجایی وسط دهانه در بار تسلیم میلگرد فولادی کششی در تکیه گاه میانی است. تغییر شکل وسط دهانه در بار نهایی تیر (Δ_u) و بار تسلیم (Δ_y) و شاخص شکل پذیری جابجایی (μ_{Δ}) در جدول (۹) ارائه شده است. همانطور که در جدول (۹) نشان داده شده است، افزایش میلگردهای عرضی و با خاموت فشرده، در تیرهای RC.S و FHP.S در مقایسه با RC.N و FHP.N، موجب بهبود قابلیت شکل پذیری جابجایی می شود. از مقایسه RC.N با FHP.N و RC.S با FHP.S، می توان مشاهده می شود که استفاده از HPFRCC اجازه می دهد تا شکل پذیری بیشتری در بار شکست نهایی دیده شود. این امر، تاثیر مثبتی بر ظرفیت چرخش موجود و باز توزیع ممان در بخش های بحرانی دارد. روش دیگر تعریف شکل پذیری، بر مبنای مفهوم انرژی است. بنا براین شاخص شکل پذیری انرژی μ_E ، نسبت انرژی جذب شده تیر در بار نهایی به انرژی جذب شده در بار تسلیم است. کمیت شکل پذیری انرژی با رابطه (۲) تعریف می شود.

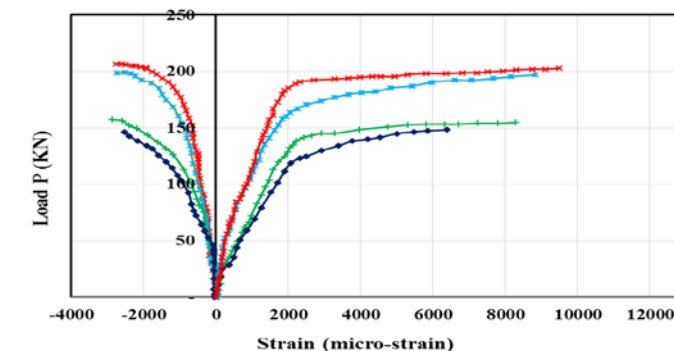
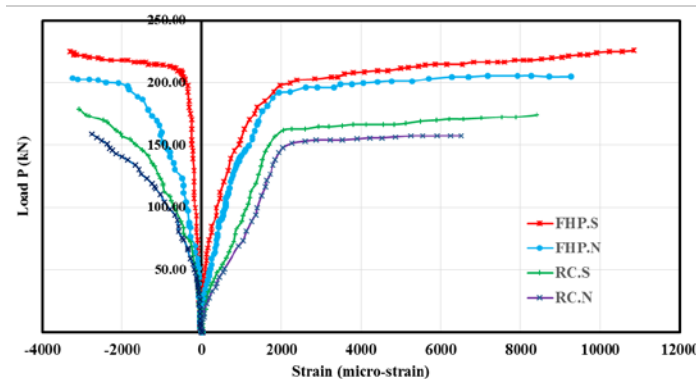
$$\mu_E = \frac{E_u}{E_y} \quad (2)$$

که در آن، E_u انرژی جذب شده تیر در بار نهایی و E_y انرژی جذب شده تیر در بار تسلیم است. در این تحقیق، بمنظور به کمیت در آوردن شکل پذیری، از دو روش شکل پذیری جابجایی و شکل پذیری انرژی استفاده شده است. شاخص شکل پذیری انرژی μ_E در جدول (۹) نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می شود، افزایش آرماتورهای عرضی و خاموت فشرده با فاصله ی کمتر در تیرهای RC.S و FHP.S در مقایسه با RC.N و FHP.N باعث افزایش شاخص شکل پذیری انرژی می شود. از مقایسه RC.N با FHP.N و RC.S با FHP.S، دیده می شود که با استفاده از HPFRCC افزایش شاخص شکل پذیری انرژی مشاهده می شود و تیرهای FHP.S و FHP.N به صورت شکل پذیر بوده و ظرفیت جذب انرژی به طور چشمگیری بهبود یافته است. بار نهایی در نمونه FHP.S افزایش ۴۲ درصدی داشته و ضریب شکل پذیری جابجایی ۸۰٪ بالاتر از نمونه RC.N بود.

جدول ۹: شکل پذیری جابجایی و انرژی تیرهای مورد آزمایش.

نمونه ها	$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	$\mu = \frac{E_u}{E_y}$	E_y (kN.mm)	$\mu_{RC.N}$	$\frac{\mu_E}{\mu_{RC.N}}$
RC.N	۴,۴۹	۹,۶۸	۷۳۷,۴۰	۱,۰	۱,۰۰
RC.S	۵,۵۳	۱۱,۱۳	۸۰۱,۰۵	۱,۲۳	۱,۱۵
FHP.N	۷,۶۸	۱۳,۰۱	۸۲۲,۵۶	۱,۷۱	۱,۳۴
FHP.S	۸,۰۹	۱۴,۶۱	۹۲۰,۶۴	۱,۸۰	۱,۵۰

کرنش‌های اندازه‌گیری شده در آرماتورهای فولادی و بتن در نواحی بحرانی (تکیه‌گاه میانی و وسط دهانه) در برابر بار اعمال شده در شکل (۱۷) نشان داده شده است که نشان دهنده‌ی این امر است که کرنش فشاری بتن در هنگام شکست به حداکثر کرنش فشاری ۰,۰۰۳۵ رسیده است. مقطع تکیه‌گاه میانی در تمامی تیرهای آزمایش شده قبل از وسط دهانه ترک خورده است. کرنش‌های اندازه‌گیری شده در آرماتور بالای بر روی تکیه‌گاه میانی، حدود ۱,۲ برابر کرنش‌ها در آرماتور پایینی در وسط دهانه در تمام تیرهای تقویت شده است. در نمونه FHP.S به دلیل اثر محصور شدگی بیشتر توسط خاموت‌های فشرده و همچنین اثر سخت‌شدگی کرنش در HPFRCC و به علت اینکه الیاف سبب حفظ یکپارچگی آن گردیده است، تغییر شکل‌های بزرگ تری را تحمل کرده و آرماتورها نیز کرنش‌های بزرگتری را تجربه نموده‌اند. در تیر RC.N تحت بارگذاری افزایشی، ترک‌ها سریع‌تر گسترش یافته و بتن فشاری خرد گردیده است. بنا بر این با از بین رفتن و آسیب بخش فشاری بتن، تعادل مقطع بتن مسلح معمولی به هم می‌خورد و نیروی اعمالی روند نزولی پیدا می‌کند. لذا شکل پذیری در تیر بتن معمولی کمتر از تیرهای HPFRCC می‌باشد.



(ب)

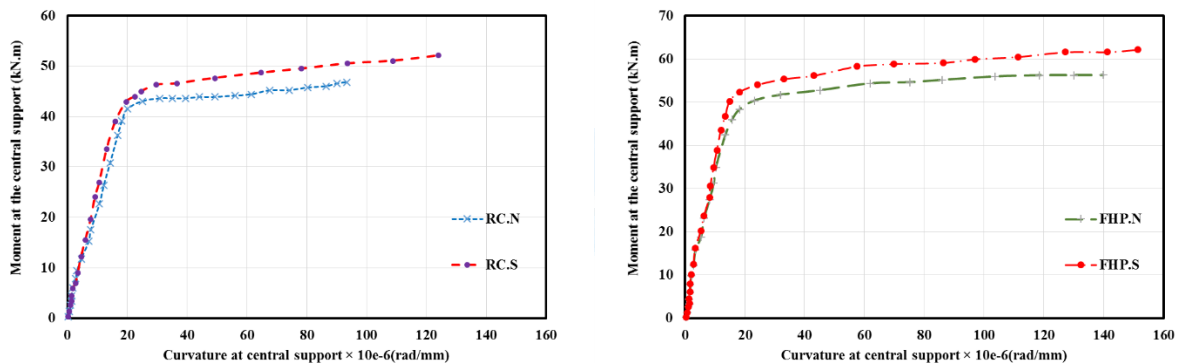
شکل ۱۷: تغییرات کرنش با بار: (الف) مقطع تکیه‌گاه میانی (ب) مقطع وسط دهانه

۳-۳ - ممان - انحنا در مقاطع بحرانی

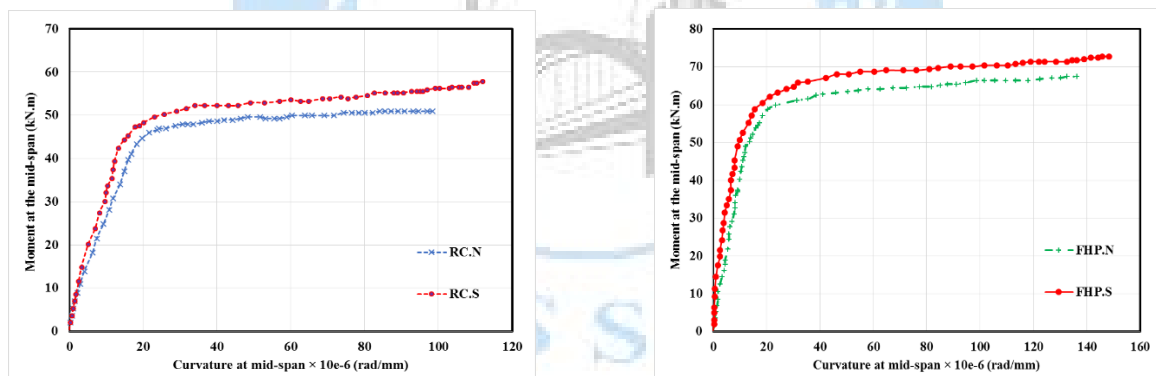
پاسخ ممان - انحنای آزمایشگاهی در مقاطع ممان مثبت و ممان منفی برای تیرهای آزمایش شده در شکل (۱۸) نشان داده شده است. نیروهای اعمالی به وسط دهانه‌ی تیرها و تکیه‌گاه‌ها با استفاده از نیرو سنج، برای اندازه‌گیری ممان نواحی بحرانی، اندازه‌گیری شد. مقادیر کرنش کششی آرماتورهای کششی که برای محاسبه انحنای تیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، توسط اندازه‌گیری کرنش سنج‌های که به آرماتورهای کششی متصل هستند، در نواحی بحرانی اندازه‌گیری شد. انحنا در تکیه‌گاه میانی یا وسط دهانه، از تقسیم کرنش بتن به فاصله تا عمق محور خنثی (c) طبق رابطه (۳)، بدست می‌آید:

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{c} \quad (3)$$

همانطور که در شکل (۱۸) مشخص است، مقدار خمش نهایی در مقطع تکیه‌گاه میانی برای تیر RC.N برابر ۴۵٫۷۸ کیلو نیوتن.متر و برای نمونه FHP.N، RC.S و FHP.S به ترتیب برابر ۵۱٫۵۷، ۵۵٫۲۰ و ۵۹٫۲۵ کیلونیوتن متر بدست آمد. بیشترین افزایش ظرفیت خمشی در مقطع تکیه‌گاه میانی مربوط به نمونه FHP.S مشاهده شد که حدود ۱٫۳ برابر نمونه RC.N می‌باشد. مطابق شکل (۱۸) ب) ظرفیت خمشی نهایی در وسط دهانه برای نمونه RC.N برابر ۵۰٫۸۴ کیلونیوتن متر در حالیکه این مقدار برای نمونه‌های RC.S، FHP.N و FHP.S به ترتیب برابر ۵۸٫۳۳، ۶۴٫۹۳ و ۷۳٫۶۲ کیلونیوتن متر بود. بیشترین افزایش ظرفیت خمشی در مقطع وسط دهانه مربوط به نمونه FHP.S مشاهده شد که حدود ۱٫۴۵ برابر نمونه RC.N می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۸: منحنی‌های ممان - انحنا: (الف) در مقطع تکیه‌گاه میانی (ب) در مقطع وسط دهانه

در جدول (۱۰) خلاصه‌ای از ظرفیت خمشی در ناحیه تکیه‌گاه میانی و وسط دهانه برای نمونه‌ها و همچنین افزایش ظرفیت خمشی در مقاطع بحرانی برای تیرهای RC.S، FHP.N و FHP.S در مقایسه با تیر RC.N مشخص گردیده است. در این جدول، M_m^+ و M_c^- به ترتیب ممان مثبت وسط دهانه و ممان منفی تکیه‌گاه میانی تیرها می‌باشد. همچنین ϕ_u و ϕ_y انحنا در حالت نهایی و انحنا در حالت جاری شدن مقاطع می‌باشند و $(\frac{\phi_u}{\phi_y})_m$ و $(\frac{\phi_u}{\phi_y})_c$ فاکتور شکل پذیری انحنا در مقطع تکیه‌گاه میانی و وسط دهانه می‌باشد.

جدول ۱۰: ظرفیت خمشی نمونه‌ها در مقطع تکیه گاه میانی و وسط دهانه و نسبت افزایش ظرفیت خمشی و فاکتور شکل پذیری انحنای تیرها

$\left(\frac{\phi_u}{\phi_y}\right)_m$	$\left(\frac{\phi_u}{\phi_y}\right)_c$	$\frac{M_M^+}{M_{M(RC.N)}}$	$\frac{M_C^-}{M_{C(RC.N)}}$	M_m^+ (kN.m)	M_C^- (kN.m)	تیرها
4.42	4.75	1.00	1.00	50.84	45.78	RC.N
5.50	5.54	1.14	1.12	58.33	51.57	RC.S
6.20	6.27	1.27	1.20	64.93	55.20	FHP.N
6.50	6.59	1.44	1.30	73.62	59.65	FHP.S

۴- نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی رفتار خمشی و شکل پذیری تیرهای سراسری دو دهانه بتن مسلح ساخته شده با کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) و خاموت فشرده در مقایسه با تیرهای ساخته شده با بتن معمولی و خاموت غیر فشرده بوده است. که برای نیل به آن از روش آزمایشگاهی استفاده شده است. با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش تیرها می توان این موارد را به عنوان نتیجه بر شمرد:

۱- با استفاده از کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) و خاموت فشرده در تیرها، افزایش مقاومت و شکل پذیری قابل توجهی حاصل می شود. در نوشتار حاضر با بکارگیری کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند با ۲ درصد الیاف فولادی، بار نهایی تا ۴۲ درصد و افزایش خیز نهایی حدود ۲ برابری را به دنبال داشته است.

۲- مقایسه منحنی‌های بار - تغییر مکان تیرهای ساخته شده با HPFRCC و خاموت فشرده، در مقایسه با تیرهای ساخته شده با بتن معمولی و خاموت غیر فشرده نشان داد که استفاده از کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند می تواند سبب تحمل بار قابل توجهی پس از ترک خوردن بتن گردد و مکانیزم های چقرمگی مانند پل زدن الیاف، باعث افزایش محسوس مقاومت کششی، جذب و استهلاک انرژی و کاهش گسیختگی ترد در منحنی بار - تغییر مکان شود.

۳- با مقایسه مود گسیختگی نمونه‌ها و منحنی پاسخ بار- تغییر مکان مشاهده می شود که نمونه‌های ساخته شده با کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند بطور کامل و خاموت فشرده، رفتار شکل پذیرتری نسبت به نمونه ساخته شده با بتن معمولی و خاموت غیر فشرده از خود نشان دادند. بطوریکه شکل پذیری جابجایی و انرژی تیرهای ساخته شده با کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند بطور کامل و خاموت فشرده به ترتیب در حدود ۸۰ درصد و ۵۰ درصد نسبت به تیرهای ساخته شده با بتن معمولی و خاموت غیر فشرده افزایش نشان می دهد.

۴- نمونه‌های ساخته شده با بتن الیافی توانمند و خاموت فشرده در مقایسه با بتن معمولی و خاموت غیر فشرده تحت بار یکسان، به دلیل وجود الیاف در بخش کششی تیر و پل زدن الیاف در محل ترک های کششی و همچنین اثر محصور شدگی بتن توسط خاموت فشرده، سبب کنترل عرض ترک‌ها شده و باعث می شوند که افت نیرو در این تیرها با سرعت کمتری نسبت به تیر بتن معمولی و خاموت غیر فشرده اتفاق بیفتد. این عامل باعث نیاز کمتری به تعمیرات و بازسازی می باشد. ضمناً "خطر نفوذ عوامل خارجی که باعث خوردگی میلگرد می شود کاهش می یابد.

۵- بررسی ترک‌ها در نواحی پلاستیک تیرها نشان داد که تعداد ترک خوردگی‌های عمیق در مقایسه با ترک‌های ریز چند گانه در تیرها با کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند و خاموت فشرده به دلیل اثر پل زدن الیاف در محل ترک و همچنین اثر محصور کنندگی خاموت های فشرده کمتر از تیرهای بتنی معمولی با خاموت غیر فشرده است. در تیرهای ساخته شده با کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند و خاموت فشرده، پس از تشکیل اولین ترک، الیاف شروع به پل زدن می کنند و جلوی گسترش این ترک گرفته می شود. با افزایش نیروی کششی، ترک جدیدی در یک نقطه دیگر تشکیل می گردد و این فرایند تا تشکیل چندین ترک در محل های مختلف نمونه ادامه می یابد. این عامل میتواند منجر به جذب و استهلاک بیشتر انرژی در این تیرها شود. همچنین این مکانیزم باعث شکست نرم و شکل پذیر تیرهای با مصالح HPFRCC و خاموت فشرده در مقایسه با شکست ترد و ناگهانی تیرهای ساخته شده با بتن معمولی و خاموت غیر فشرده گردید.

۶- استفاده از کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند با ۲ درصد الیاف فولادی و خاموت فشرده در دهانه برش بجای بتن معمولی و خاموت غیر فشرده در ساخت تیرهای سراسری، ظرفیت باربری تیرها را در حدود ۴۲ درصد در بار نهایی افزایش داد.

مراجع

- [1] Naaman, A.E., Reinhardt, H.W.(2003). "*Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites*". In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-4), Proc. Of the 4th Int'l RILEM Workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt.
- [2] Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C.(2003). "Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements". 7th International Symposium on Brittle Matrix Composites, 29-36
- [3] Li, V.C.(1993). "*From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications*". JSCE J. of Structural Mechanics and Earthquake Engineering 10(2), 37-48
- [4] Farhat, F.A, Nicolaidis, D., Kanellopoulos, A., Karihaloo, B.L.(2007). "*High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC)-Performance and application to retrofitting*". Engineering Fracture Mechanics; 74:151-67. doi:10.1016/j.engfracmech.2006.01.023.
- [5] Kunieda, M. and Rokugo, K.(2006). "Measurement of crack opening behavior within ECC under bending moment" In Proc., Int'l RILEM Workshop HPFRCC in Structural Applications, Eds. Fischer, G., and V.C. Li, 313-322
- [6] Wang, S., (2005). "*Micromechanics based matrix design for engineering cementitious composites*", PhD dissertation, Michigan University.
- [7] Stang, H., and Li, V.C.(2004). "*Classification of fiber reinforced cementitious materials for structural applications*," in Fiber-Reinforced Concrete, Proc. BEFIB 2004, Ed. M. di Prisco R. Felicetti and G.A. Plizzari, 197-218
- [8] Hemmati A, Kheyroddin A, Sharbatdar M.K.(2015). "*Increasing the flexural capacity of RC beams using partially HPFRCC layers*". Computers and Concrete; 16:545-568. DOI/10.12989/cac.2015.16.4.545
- [9] Hemmati A, Kheyroddin A, Sharbatdar M, Park Y, Abolmaali A.(2016). "*Ductile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frames*". Constr Build Mater; 115:681-9. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.078.
- [10] Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K. (2014). "*plastic hinge rotation capacity of reinforced HPFRCC beams*". J. Struct. Eng., 141(2), 04014111.
- [11] Sharbatdar, M.K, Parsa, H. (2016). "*The evaluation of strengthening effect of reinforced concrete structures with FRP on seismic dynamic performance of the structures*", Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), : (DOI) 10.22065/jsce.2017.97090.1312.
- [12] Mostofinejad, D. (1997). "*Ductility and Moment Redistribution in Continuous FRP Reinforced Concrete Beam*," PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada
- [13] Mostofinejad, D. Farahbod, F.(2011). "Experimental study of moment redistribution in RC frames strengthened with CFRP sheets." Composite Structures. p.1168-1177. doi:10.1016/j.compstruct.2010.10.004
- [14] Maghsoudi AA, Akhbarzadeh H.(2010). "Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer". Materials and Design. 31.p.1130-1147. doi:10.1016/j.matdes.2009.09.041
- [15] Maghsoudi AA, Hashemi H, Rahgozar R.(2008). "*Flexural ductility of reinforced HSC beams strengthened with CFRP sheets*". Struct Eng :30(4)
- [16] Saghafi, M.h., H. Shariatmadar, and A.Kheyroddin. (2016). "*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), p. 33-51.
- [17] Lopes, S.M .R. and Bernardo, L. F. A. (2003). "*Plastic rotation capacity of high-strength concrete beam*". journal of materials and structures", 36(1), p.22-31
- [18] Lin C, Chien Y. (2000). "*Effect of section ductility on moment redistribution of continuous concrete beams*". J Chinese Inst Eng; 23:131-41.
- [19] Naaman A, Paramasivam P, Balazs GL, Eibl J, Erdelyi L, Hassoun NM, et al.(1995). "*Reinforced and prestressed concrete using HPFRCC matrices*". Proc 2nd Int RILEM/ACI Work, , p. 291-347
- [20] Mishra, D. and Li, V.C.(1995). "*Performance of ductile plastic hinge designed with an engineered cementitious composite*". UMCEE Req.No.9506, University of Michigan;
- [21] Hemmati A, Kheyroddin A, Sharbatdar M.K.(2014). "*Proposed equations for estimating the flexural characteristics of reinforced HPFRCC beams*". Iran J Sci Technol Trans Civ Eng; 38:395.

- [22] Yang K-H, Chung H-S, Ashour AF. (2007). "Influence of section depth on the structural behaviour of reinforced concrete continuous deep beams". Mag Concr Res 2007;59:575-86. doi:10.1680/mac.59.8.575.
- [23] Fallah, M.M., Sharbatdar, M.K., Kheyroddin, A. (2017). "Experimental Strengthening of the Two-way RC Slabs with High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Prefabricated sheets", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, DOI: 10.22075/jrce.2018.14532.1266.
- [24] Fallah, M.M., Sharbatdar, M.K., Kheyroddin, A. (2017). "Experimental Study of the Performance of Two-way RC Slabs Retrofitted with High Performance Fibre Reinforced Cement Composite (HPFRCC) prefabricated laminates", Journal of Structural and Construction Engineering (JSCE), :(DOI) 10.22065/jsce.2018.120672.1480
- [25] Sahraei moghadam, A., Omidinasab, F., Dalvand, A. (2017). "The flexural behavior of multi-layer high performance self-compacting hybrid fibers concrete slabs", (DOI) 10.22065/JSCE.2018.122428.1498, In Press, (in Persian).
- [26] Japan Society of Civil Engineers (JSCE_s). (2008). "Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks", Concr Ser.82
- [27] ACI, (2014). Building Code Requirements for reinforced Concrete. American Concrete Institute. ACI 318, Farmington Hills, Michigan.

