

تأثیر استفاده از کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) و فاصله خاموت در مقدار بازپخش لنگر و مشخصات مفصل پلاستیک تیرهای بتن آرمه سراسری

رامین احسانی

استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان.

محمد کاظم شربندار *

دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان.

علی خیرالدین

استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان.

چکیده

در مقاله حاضر نتایج بررسی آزمایشگاهی بازتوزیع لنگر و مشخصات مفصل پلاستیک تیرهای سراسری دو دهانه با به کارگیری کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند به جای بتن معمولی در بخش‌های مختلف تیرهای سراسری و استفاده از خاموت فشرده ارائه گردیده است. هشت نمونه تیر سراسری با بتن معمولی و کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند و فاصله خاموت گذاری و در قالب سه گروه A، B، C در نظر گرفته شدند. گروه A شامل دو تیر کنترلی با بتن معمولی با فواصل خاموت گذاری معمولی ($d/2$) (نمونه مرجع) و فشرده ($d/4$) و گروه B شامل چهار تیر سراسری ساخته شده با کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند بصورت لایه ای با فواصل خاموت گذاری غیر فشرده ($d/2$) و گروه C شامل دو تیر سراسری ساخته شده با کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند بطور کامل با خاموت گذاری معمولی ($d/2$) و فشرده ($d/4$) بودند. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان داد که بکارگیری کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند به جای بتن معمولی در بخش‌های مختلف تیرهای سراسری و استفاده از خاموت فشرده، باعث افزایش ظرفیت شکل پذیری تیرهای سراسری می‌گردد. در نمونه ساخته شده با کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند به طور کامل و دارای خاموت فشرده، ظرفیت باربری، شکل پذیری جابجایی و شکل پذیری انرژی به ترتیب به مقدار ۳۵، ۷۷ و ۸۳ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش یافتند. بیشترین مقدار بازپخش لنگر خمشی در نمونه ساخته شده با کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند در قسمت تحتانی به مقدار ۱/۵۱ برابر تیر مرجع اتفاق افتاد.

واژه‌های کلیدی: تیر سراسری بتنی مسلح، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC)، شکل پذیری، مفصل پلاستیک، بازپخش لنگر.

* نویسنده مسئول: msharbatdar@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

شکل‌گیری ترک‌های چندگانه و رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد است. از ویژگی‌های متمایز این مواد نسبت به بتن‌های معمولی می‌توان به شکل‌پذیری، ظرفیت جذب انرژی و دوام زیاد اشاره کرد. کامپوزیت‌های سیمانی الیافی مسلح توانمند یک نوع خاص از کامپوزیت‌های FRCC هستند که اولین بار توسط نعمان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ معرفی شدند [۹]. تحقیقاتی نیز در خصوص کاربرد بتن‌های کامپوزیتی الیافی و همچنین 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. نتایج آزمایش محققین در خصوص بررسی رفتار و تعیین ظرفیت باربری تیرهای ساخته شده از HPFRCC نشان داد که ظرفیت باربری و شکل‌پذیری تیرها با جایگزینی HPFRCC بجای بتن معمولی افزایش می‌یابد [۱۱-۱۰].

۲- ضرورت انجام تحقیق

کامپوزیت‌های مسلح الیافی گونه‌ای از مصالح بتنی با پایه سیمانی می‌باشند که دارای رفتاری به مراتب بهتر از بتن‌های معمولی می‌باشند. با توجه به ویژگی منحصر بفرد کامپوزیت‌های مسلح الیافی در سخت‌شوندگی کرنش بعد از ترک خوردگی اولیه که منجر به جذب انرژی و شکل‌پذیری بیشتر این مصالح نسبت به بتن معمولی می‌شود، لذا به کارگیری این نوع مصالح در ساخت تیرهای سراسری و بررسی رفتار آن در مکانیزم شکست خمشی و نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک و شکل‌پذیری و عملکرد آن در بازپخش لنگر تیرهای سراسری و مقایسه با آیین‌نامه‌های معتبر در این سازه‌ها که کمتر مورد بررسی قرار گرفته، حائز اهمیت می‌باشد.

۳- ضوابط طراحی آیین‌نامه‌ای

برای طراحی تیرها از آیین‌نامه [۱۲] ACI 318-14 استفاده شده است. تمام تیرها بر اساس مقدار آرماتور طولی تحتانی حدود $0.48\rho_b$ و مقدار آرماتور در ناحیه تکیه‌گاه میانی به مقدار حدود $0.35\rho_b$ و بر اساس دیاگرام نیروی برش و لنگر خمشی، شکل ۱ طراحی شدند. همچنین طراحی تیرها به گونه‌ای انجام شد که ظرفیت لنگر وسط دهانه بیشتر از ظرفیت لنگر مقطع تیر در تکیه‌گاه میانی بوده و امکان بازتوزیع لنگر در تکیه‌گاه میانی تیرها وجود

آزمایش‌های انجام شده نشان دادند که یک تیر سراسری بتن آرمه، با رسیدن لنگر در مقطع بحرانی به حد نهایی، دچار خرابی نمی‌شود؛ بلکه اگر سازه از شکل‌پذیری کافی برخوردار باشد، بازتوزیع لنگر و تنش در اعضای خمشی، با توسعه مفصل پلاستیک در مقاطع بحرانی آن‌ها ایجاد می‌گردد این امر سبب می‌شود که سایر نقاط تیر به مقاومت و ظرفیت نهایی خود برسند [۱-۵].

آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی توزیع لنگر تیرهای سراسری دو دهانه ساخته شده با بتن‌های فوق توانمند الیافی نشان داد که در صورتی که مفصل پلاستیک در محل تکیه‌گاه میانی تشکیل شود، باز توزیع لنگر بیشتر از مقادیر توصیه شده توسط آیین‌نامه‌های مربوطه می‌باشد و در صورتی که مفصل پلاستیک در زیر نقطه بارگذاری شکل بگیرد، مقدار بازپخش لنگر به مقدار زیادی کمتر از مقادیر پیش‌بینی آیین‌نامه می‌باشد [۶]. نتایج محققین در میزان تأثیر شکل‌پذیری مقطع، در بازتوزیع لنگر تیرهای سراسری بتن مسلح نشان داد که افزایش آرماتورهای فشاری و کاهش آرماتورهای کششی باعث افزایش بازتوزیع لنگر می‌شود [۷].

همچنین نتایج آزمایش محققین نشان داد که افزایش مقاومت بتن رفتار پلاستیک تیر را افزایش می‌دهد، علاوه بر این، مشخص شد که نسبت آرماتورهای طولی بیش‌ترین تأثیر را روی شکل‌پذیری تیر دارد [۸]. از طرفی ساخت و مدل‌سازی رفتاری کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیر و زیادی داشته است. عمده این پیشرفت‌ها به سبب توسعه هر چه بیشتر ملات، انواع مختلف الیاف، اندرکنش ملات-الیاف، فرایند تولید کامپوزیت، درک مناسب‌تر در خصوص مکانیزم‌های اصلی کنترل رفتار و بهبود مستمر میزان هزینه‌های اجرایی می‌باشد. علاوه بر آن می‌توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی (فوق روان‌کننده‌ها) با امکان دستیابی به مقاومت‌های بالا همراه با کمترین کاهش در کارایی ملات، کاربرد ریز پرکننده‌ها مثل دوده سیلیسی و خاکستر بادی و فهم بهتر از چگونگی تأثیر آن‌ها بر تخلخل، مقاومت و دوام ملات اشاره نمود. این موارد همگی باعث پیشرفت‌های اساسی در ساخت و مدل‌سازی رفتار این کامپوزیت‌ها شده‌اند. واژه توانمند به رده‌ی خاصی از مصالح بتن الیافی اطلاق می‌شود که دارای رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش پس از بروز اولین ترک خوردگی‌ها هستند که همراه با

سیمان پرتلند نوع دو با ماسه شسته و مصالح دانه‌های سیلیسی شکسته با حداکثر اندازه دانه برابر با ۱۲/۵ میلی‌متر استفاده گردید. طرح اختلاط دو نوع بتن برای یک مترمکعب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

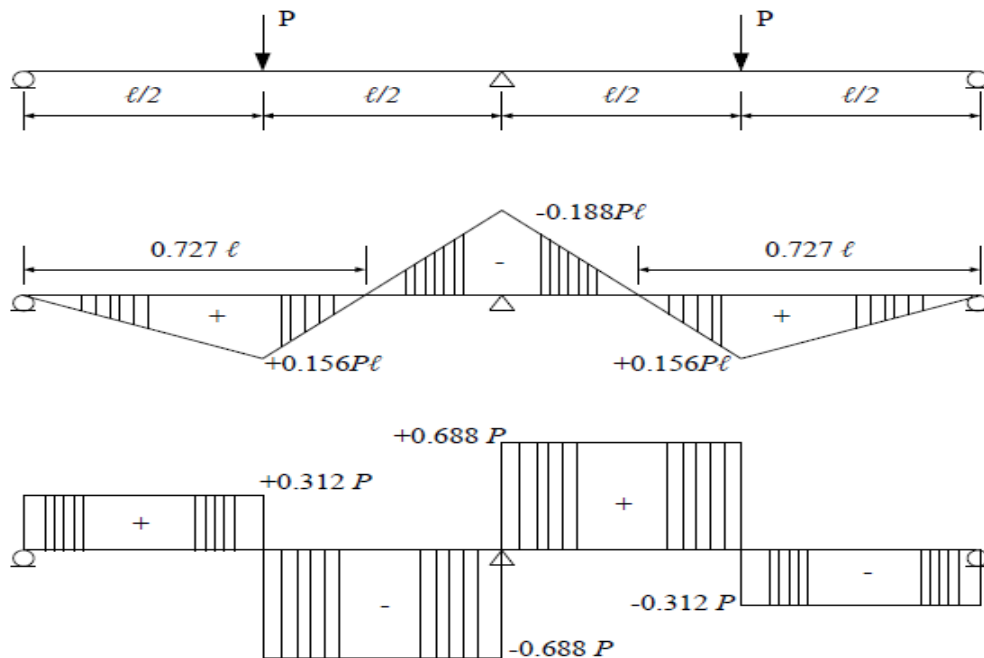
درصد حجمی الیاف فولادی مورد استفاده در این آزمایش دو درصد حجمی انتخاب گردید که براساس تجارب قبلی نویسندگان انتخاب شد گرچه مقادیر کمتر هم می‌تواند تأثیر خود را داشته باشد. این الیاف از نوع قلاب‌دار بوده که در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخصات الیاف مورد استفاده در جدول ۳ ارائه گردیده است.

داشته باشد شکل ۲، با این فرض قطعا " مفصل پلاستیک، ابتدا در محل تکیه گاه تشکیل خواهد شد. همچنین با این میزان فولاد، کرنش در فولاد کششی از ۰/۰۰۷۵ بیشتر شده و لذا الزامات آیین نامه ۱۴- ACI 318 در رابطه با امکان پذیر بودن باز توزیع لنگر فراهم می‌گردد.

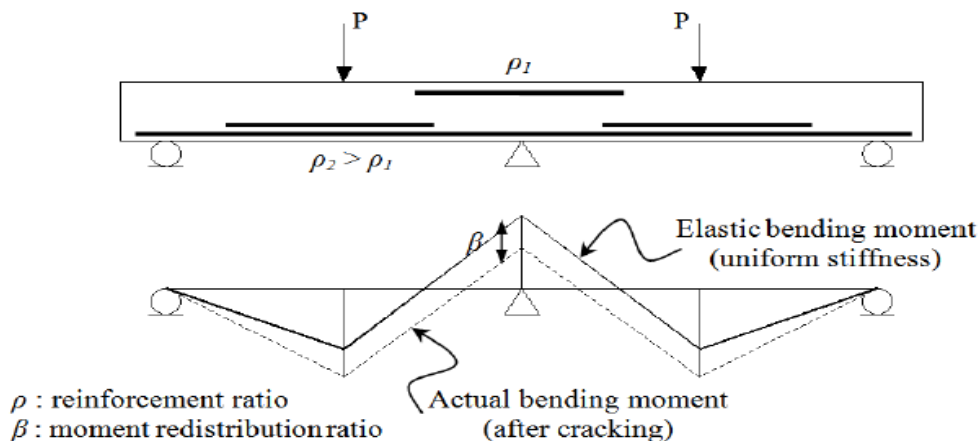
۴- برنامه آزمایشگاهی

۴-۱- مشخصات مصالح

طرح اختلاط جهت حصول میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۵ مگاپاسکال برای بتن معمولی طراحی گردید. جهت ساخت بتن از



شکل ۱- دیاگرام لنگر خمشی الاستیک و نیروی برش تیر دو دهانه تحت بارهای متمرکز در وسط دهانه [۲۱]



شکل ۲- ممان خمشی الاستیک و واقعی در تیر سراسری دو دهانه [۲۱]

جدول ۱- وزن مؤلفه های بتن معمولی (یک متر مکعب)

مصالح	سیمان	آب	شن	ماسه
وزن (کیلوگرم)	۳۵۰	۱۵۴	۱۰۸۹	۷۰۷

جهت دستیابی به رفتار سخت شوندگی کرنش قابل قبول در مصالح HPFRCC نسبت های اختلاط مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است و طرح اختلاط بهینه با نسبت اختلاط وزنی مطابق جدول ۲ به دست آمد.

جدول ۲- وزن مؤلفه های کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی توانمند (یک متر مکعب)

مصالح	سیمان	آب	ماسه	میکروسلیس	فوق روان کننده	الیاف فولادی
وزن (کیلوگرم)	۳۵۰	۱۰۵	۱۶۳۳	۵۲	۲٫۸	۱۵۷

جدول ۳- مشخصات الیاف فولادی

نوع الیاف	طول الیاف (mm)	قطر معادل (mm)	نسبت طول به قطر (L/D)	مقاومت کششی (MPa)
فولادی (قلابدار)	۳۰	۰٫۶	۵۰	۱۱۰۰

۴۰۰۰ میلی متر انتخاب شد تا امکان جاگذاری تیرها و اعمال نیرو به آن ها میسر گردد. تکیه گاه نیز از نوع مفصل انتخاب شد. ابعاد مقطع عرضی تیرها، مستطیل شکل با عرض ۲۰۰ و ارتفاع ۲۵۰ میلی متر و پوشش بتن از روی خاموت ۲۵ میلی متر انتخاب شده است تا تیر کاملاً به صورت خمشی رفتار کند و با تامین شرط $(\frac{a}{d} = \frac{900}{220} = 4)$ شکست خمشی بر آن حاکم باشد.

شش الگوی بتن ریزی مطابق جدول ۴، با بتن معمولی و مصالح HPFRCC مورد بررسی قرار گرفته است تا هم جنبه اقتصادی و اجرایی مدنظر باشد و هم اثرپذیری سازه های در منطقه فشاری یا کششی و یا کل مقطع بررسی گردد و با حداقل مصالح بتوان رفتار سازه های تیرها (مقاومت و شکل پذیری) را بهبود داد. الگوی اول در تیرهای (RCN) و (RCS) که کل تیر با بتن معمولی بتن ریزی می شود. در الگوی دوم در تیر (BHPN)، حدود یک سوم ارتفاع مقطع تیر از پایین با مصالح HPFRCC و مابقی سطح مقطع تیر با بتن معمولی بتن ریزی شده است. در الگوی سوم در تیر (THPN) حدود یک سوم ارتفاع مقطع تیر از بالا با مصالح HPFRCC و مابقی سطح مقطع تیر با بتن معمولی بتن ریزی شده است. در الگوی چهارم در تیر (MHPN) که در فاصله یک متری ناحیه تکیه میانی از مصالح HPFRCC و مابقی با بتن معمولی بتن ریزی شده است. در الگوی پنجم در تیر (BTHPN) یک سوم ارتفاع تیر از بالا و پایین مقطع تیر با مصالح HPFRCC و قسمت میانی مقطع تیر با بتن معمولی بتن ریزی گردیده است. در الگوی ششم در تیرهای (FHPN) و (FHPS) کل تیر از مصالح HPFRCC استفاده شده است. بتن ریزی لایه های

از سیمان پرتلند تپ دو جهت ساخت کامپوزیت HPFRCC استفاده شد. از آنجا که توزیع مناسب الیاف در مخلوط نیازمند روانی کافی ملات تازه است، از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلاتی استفاده شده است تا ضمن ایجاد روانی و کارپذیری مناسب، نسبت آب به مواد سیمانی در حد ۰٫۳ نگه داشته شود. میکروسلیس مورد استفاده از کارخانه فروسیلیس سمنان، ماسه سیلیسی استفاده شده در طرح اختلاط با قطر ۰٫۱ میلی متر تا ۴٫۷۵ میلی متر و به صورت میانگین ۱ میلی متر است. برای ساخت تیرها از میلگردهای با قطر ۱۰ و ۱۴ میلی متر به عنوان میلگردهای طولی خمشی و از میلگرد به قطر ۸ میلی متر به عنوان خاموت استفاده شد. مقاومت تسلیم میانگین بدست آمده میلگردهای فولادی از آزمایش کشش تک محوری برابر ۵۲۴ مگاپاسکال بود.



شکل ۳- الیاف فولادی قلابدار

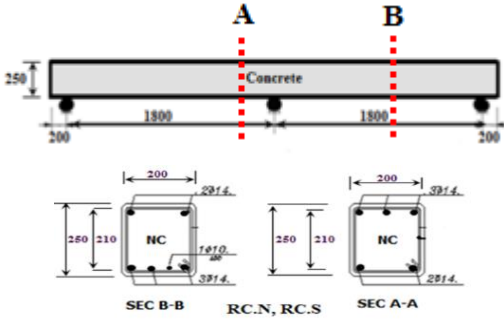
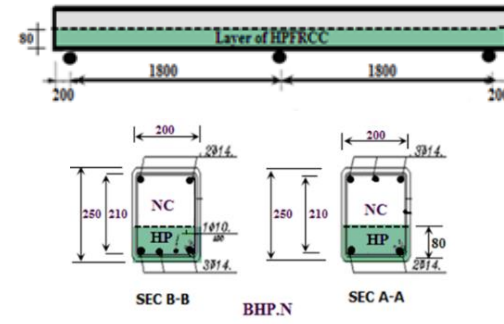
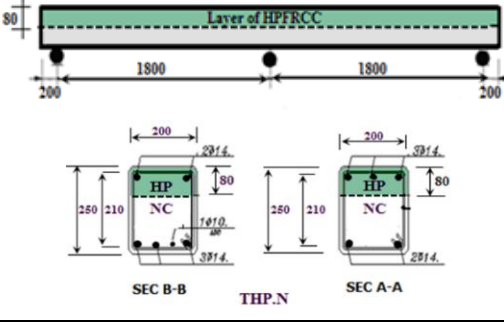
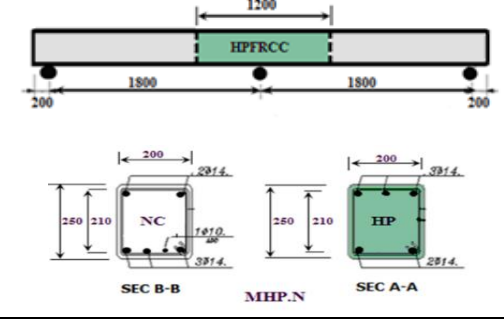
۴-۲- نمونه های آزمایش

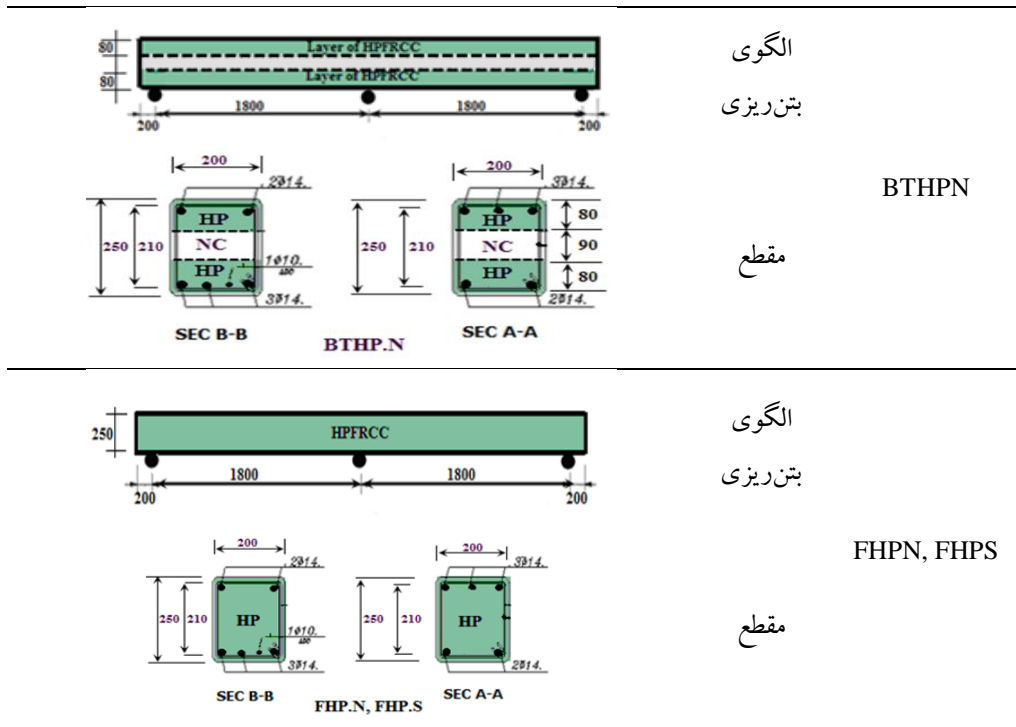
در این پژوهش با توجه به متغیرهای تعریف شده و اهداف مورد بررسی ۸ عدد تیر سراسری دو دهانه ساخته شد. فاصله مرکز تا مرکز دو تکیه گاه مجاور در هر دهانه از یکدیگر ۱۸۰۰ میلی متر بود و با در نظر گرفتن این محدودیت، طول کلی هر نمونه برابر

تأثیر استفاده از کامپوزیت سیمانی مسلح ...

در عمق و یا در طول تیرها در کارخانجات پیش ساخته با حجم بتن - بررسی تأثیر میزان کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند با های زیاد به راحتی امکان پذیر است. با توجه به خصوصیات منحصر جایگزینی با بتن معمولی در ارتفاع مقطع تیر و تأثیر خصوصیات این بنفرد کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند در مقایسه با بتن نوع بتن در میزان شکل پذیری، باز توزیع و الگوی ترک خوردگی و معمولی، هدف از الگوی بتن ریزی لایه‌ای در تیرهای سراسری، میزان استفاده بهینه این نوع بتن در تیرهای سراسری می باشد.

جدول ۴- الگوی بتن ریزی نمونه‌ها

ابعاد طولی و مقطع نمونه	نام نمونه
 <p>Concrete</p> <p>250</p> <p>1800</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>SEC B-B</p> <p>RC.N, RC.S</p> <p>SEC A-A</p>	<p>الگوی بتن ریزی</p> <p>RCN, RCS</p> <p>مقطع</p>
 <p>Layer of HPFRCC</p> <p>80</p> <p>1800</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>SEC B-B</p> <p>BHP.N</p> <p>SEC A-A</p>	<p>الگوی بتن ریزی</p> <p>BHPN</p> <p>مقطع</p>
 <p>Layer of HPFRCC</p> <p>80</p> <p>1800</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>SEC B-B</p> <p>THP.N</p> <p>SEC A-A</p>	<p>الگوی بتن ریزی</p> <p>THPN</p> <p>مقطع</p>
 <p>HPFRCC</p> <p>1200</p> <p>1800</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>200</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>250</p> <p>210</p> <p>2B14</p> <p>2B14</p> <p>SEC B-B</p> <p>MHP.N</p> <p>SEC A-A</p>	<p>الگوی بتن ریزی</p> <p>MHPN</p> <p>مقطع</p>



الگوی

بتن ریزی

BTHPN

مقطع

الگوی

بتن ریزی

FHPN, FHP.S

مقطع

لیزی استفاده شد تا از هر گونه خروج از مرکزیتی و ناشاغولی جلوگیری شود. نمونه‌ها کاملاً در یک خط افقی تحت نیروی خمشی قرار بگیرند. در شکل ۵ ب شرایط تکیه گاهی سیستم آزمایش و نحوه تراز کردن تیرها نشان داده شده است. جهت برقراری تعادل استاتیکی از یک تکیه گاه مفصل و دو عدد تکیه گاه غلتکی استفاده شد. جهت اندازه گیری نیروی تکیه گاه مفصل و غلتکی از سه عدد نیرو سنج که در زیر هر یک از تکیه گاه‌های مفصل و غلتک کار گذاشته شد، استفاده گردید.

۳-۴ سیستم آزمایش

سیستم کلی آزمایش تیرهای بتنی که نمای کلی آن در شکل ۴ به صورت شماتیک نشان داده شده است. برای اندازه گیری نیروی تکیه گاهی از دو نیرو سنج در تکیه گاه کناری و تکیه گاه میانی استفاده گردید. هر یک از نیرو سنج‌ها در زیر صفحات فولادی که برای این منظور طراحی و ساخته شده بود قرار گرفته و نیروی اعمال شده به این تکیه گاهها به نیرو سنج منتقل شده و در هر لحظه بارگذاری مقدار نیروی تکیه گاه‌ها توسط نیروسنج‌های نصب شده در تکیه گاه با ظرفیت ۲۵ تن و ۵۰ تن قابل اندازه گیری بود.

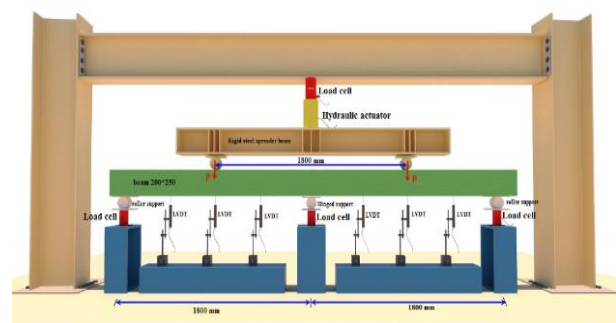


الف



ب

شکل ۵- الف) طریقه اعمال و توزیع نیرو بوسیله جک و تیر فولادی ب) نحوه تراز کردن تیرها بر روی تکیه گاه

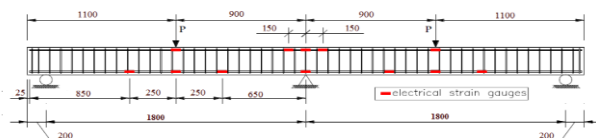


شکل ۴- نمایش قاب دستگاه و تجهیزات مورد استفاده جهت

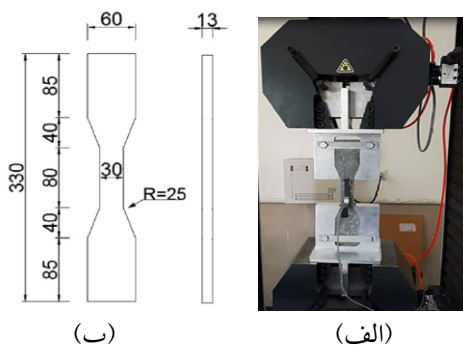
آزمایش نمونه‌ها

با توجه به اینکه تراز بودن تیرها بر روی تکیه گاه‌ها اهمیت زیادی برخوردار است لذا برای تراز کردن تیرها بر روی تکیه گاه‌ها از تراز

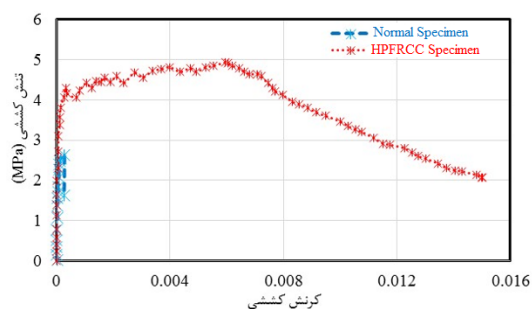
معمولی (normal) و نمونه HPFRCC رسم شده است.



شکل ۶- محل قرارگیری کرنش سنجهای بکار رفته بر روی میلگردهای نمونه آزمایشگاهی



شکل ۷- (الف) نحوه انجام آزمایش کشش تک محوری، (ب) ابعاد توصیه شده توسط JSCE [۱۳]



شکل ۸- منحنی تنش- کرنش کششی نمونه های کششی مستقیم با بتن معمولی و HPFRCC

۵-۲- فشار تک محوری

آزمایش فشاری روی نمونه های استوانه ای $150 \times 300 \text{ mm}$ هم زمان با انجام آزمایش روی نمونه های تیر انجام گرفت. مقاومت فشاری حاصل از نمونه ها به هم نزدیک بود و ضوابط پذیرش نمونه ها مطابق با آیین نامه های بتن ایران و ACI-318-14 را تامین می کرد.

برای اعمال بار متمرکز به وسط هر یک از دهانه های تیر یک دستگاه جک به ظرفیت ۵۰ تن که بوسیله یک پمپ برقی که در شکل ۵ الف نشان داده شده، کنترل می شدند. برای اندازه گیری نیروی وارده از طرف جک، یک نیرو سنجه با ظرفیت ۵۰ تن استفاده شد. نیروی جک توسط یک تیر فولادی صلب به دو نیروی مساوی متمرکز تقسیم و به وسط هر یک از دهانه های تیر وارد شد در شکل ۵ نحوه اعمال بار به نمونه های آزمایش نشان داده شده است. پس از نصب نمونه و تثبیت آن روی تکیه گاه ها، سه عدد تغییر مکان سنجه الکتریکی برای ثبت تغییر مکان که جانمایی آن ها در شکل ۶ نشان داده شده در زیر هر دهانه به فواصل مساوی ۴۵ سانتی متر نصب می شوند. حسگرهای ثبت تغییر مکان قائم که مهمترین داده را برای رسم نمودار بار- تغییر مکان ثبت می کنند با ظرفیت ۲۰۰ میلی متر جابجایی و دقت یک هزارم می باشند.

به منظور اندازه گیری کرنش در میلگردها از کرنش سنجه های الکتریکی ساخت شرکت TML ژاپن که قابلیت اندازه گیری کرنش تا میزان $20000 \mu\text{S}$ (10^{-6} کرنش = μS) استفاده گردید. نمایی از محل کرنش سنجه های نصب شده بر روی شبکه آرماتورها در شکل ۶ نشان داده شده است.

در مرحله آخر نیز تمام حسگرهای ثبت تغییر مکان - نیرو و سنجه کرنش سنجه های داخلی توسط سیم های مخصوص به دستگاه ثبت داده ها متصل شده و عملیات پایش، در طول بارگذاری به صورت کامل انجام شد.

۵- نتایج آزمایش

۵-۱- کشش تک محوری

آزمایش های کشش تک محوری بر روی نمونه های دمبلی شکل، مطابق با شکل ۷ با ابعاد توصیه شده توسط JSCE [۱۳] انجام شد. با استفاده از تجهیزات آزمایش یونیورسال تحت شرایط کنترل تغییر مکان با سرعت بارگذاری ۰/۱ میلی متر بر دقیقه و با استفاده از فنک طراحی شده، نمونه مطابق با شکل ۷ ب در دستگاه آزمایش قرار گرفت. در طی آزمایش، نیروی بارگذاری و تغییر طول اندازه گیری شده و به منظور تعیین تغییر طول از یک دستگاه LVDT در وجه مرکز نمونه کششی در راستای بارگذاری استفاده شده است. نتایج آزمایش کشش محوری در جدول ۵ ارائه گردیده و در شکل ۸ منحنی تنش- کرنش کششی نمونه های کششی بتن

میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای بتن ۳۴/۶۶ الگوی ترک خوردگی و مود شکست نمونه‌ها. الگوی ترک خوردگی و مود شکست تیرهای سراسری مورد آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. مگاپاسکال و کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند ۶۵/۸۳ الگوی ترک خوردگی و مود شکست تیرهای سراسری مورد بدست آمد.

جدول ۵- نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن و HPRCC

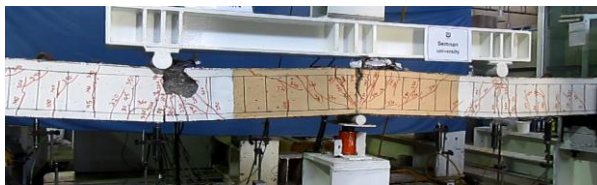
ماکزیمم مقاومت کششی (میانگین)		ترک‌های ابتدایی (میانگین)		نام نمونه
کرنش کششی (%)	تنش کششی (MPa)	کرنش کششی (%)	تنش کششی (MPa)	
-	-	۰/۰۲۳	۲/۷۱	بتن معمولی
۰/۶۰	۴/۹۰	۰/۰۳۴	۴/۴۷	HPRCC



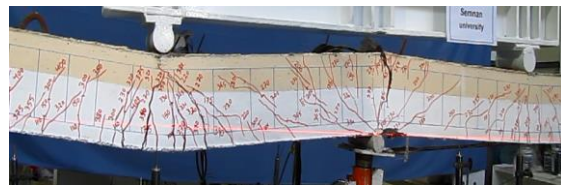
a) RCN



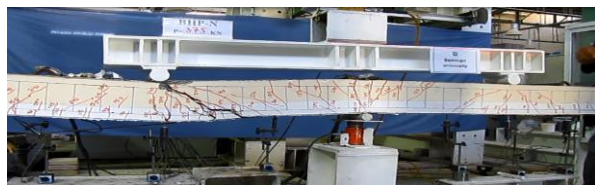
b) RCS



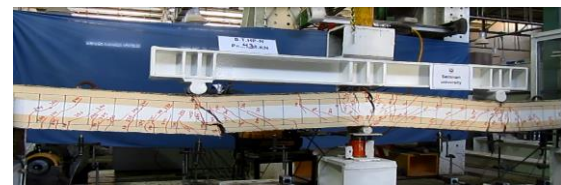
c) MHPN



d) THPN



e) BHPN



f) BTHPN



J) FHPN



h) FHPS

شکل ۹- الگوی ترک خوردگی نمونه‌های آزمایش

در تیر RCN اولین ترک خوردگی بصورت خمشی در وسط دهانه اتفاق افتاد. ترک خوردگی‌ها نیز با ترک‌های کششی در ناحیه ممان منفی (تکیه‌گاه وسط) و همچنین در ناحیه ممان مثبت (تکیه‌گاه وسط) شروع می‌شود و به تدریج گسترش یافته و به سمت تکیه‌گاه‌ها حرکت می‌کند و عرض آن‌ها نیز زیاد می‌شود. با افزایش مقدار نیرو، عرض ترک‌ها افزایش یافته و عمیق‌تر شده و در نهایت تیر با خرد شدن ناگهانی بتن در وسط دهانه تخریب شد. در تیر RCS با افزایش مقدار نیرو، عرض ترک‌ها افزایش یافته و عمیق‌تر می‌شوند و در نهایت میلگردها کششی در زیر بار نقطه‌ای گسیخته شدند. شکست تیر از نوع شکست خمشی و با پارگی

میلگردهای کششی در ناحیه ممان منفی و ممان مثبت همراه بود. آرماتورهای کششی تیر MHPN به دلیل وجود HPFRCC در ناحیه تکیه گاه میانی تیر در بار تسلیم بالاتری نسبت به تیر مرجع جاری شد. با افزایش مقدار نیرو، عرض ترک‌ها افزایش یافته و عمیق‌تر می‌شوند و در نهایت تیر با پارگی میلگردهای کششی ناحیه ممان منفی و مثبت گسیخته شد. تیر THPN اولین ترک خوردگی در وسط دهانه اتفاق افتاد. ترک خوردگی‌ها نیز با ترک‌های کششی در ناحیه ممان منفی و همچنین در ناحیه ممان مثبت شروع شد و به تدریج گسترش یافته و به سمت تکیه‌گاه‌ها حرکت کرد و عرض آن‌ها نیز زیاد شد. در نهایت میلگردها کششی در زیر بار نقطه‌ای گسیخته شدند. در تیر BHPN اولین ترک خوردگی در تکیه‌گاه میانی تیر ایجاد گردید. ترک خوردگی‌ها با ترک‌های خمشی در تکیه‌گاه میانی تیر شروع شده و به تدریج با افزایش بار عمق و عرض آن‌ها گسترش یافت. با افزایش بار ترک‌های برشی خمشی در زیر نقطه بارگذاری ظاهر گشته و با افزایش نیرو وارد بخش فشاری تیر گردید. الگوی شکست تیرهای BHPN و

۵-۴- پاسخ بار- تغییر مکان نمونه‌ها
 خلاصه‌ای از نتایج آزمایش‌ها شامل بار ترک خوردگی، تسلیم‌شدگی و نهایی و خیز متناظر آن‌ها، در وسط دهانه، برای تمامی نمونه‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. در جدول مذکور، P_{cr} و Δ_{cr} به ترتیب مشخص کننده بار ترک خوردگی و تغییر مکان متناظر با بار ترک خوردگی، P_y و Δ_y مشخص کننده بار تسلیم و تغییر مکان متناظر با بار تسلیم و P_{max} و Δ_u مشخص کننده ظرفیت باربری ماکزیمم (پیک منحنی) و تغییر مکان نهایی در تیر است. اگر میزان افت بعد از پیک کمتر از ۱۵ درصد باشد تغییر مکان لحظه شکست همان تغییر مکان نهایی است ولی اگر میزان افت بعد از پیک بیش از ۱۵ درصد باشد تغییر مکان نهایی در لحظه ۱۵ درصد افت به‌عنوان تغییر مکان نهایی است. نمودار نیرو - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مورد آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۶- خلاصه نتایج بار و خیز نمونه‌ها در وسط دهانه

گروه	نام نمونه‌ها	لحظه ترک خوردگی		لحظه جاری شدن		لحظه نهایی	
		Δ_{cr} (mm)	P_{cr} (kN)	Δ_y (mm)	P_y (kN)	Δ_u (mm)	$\frac{P_u}{P_{u(RCN)}}$
گروه A	RCN	۱/۷۶	۳۱/۲۵	۶/۲۱	۱۴۷/۴۸	۳۴/۰۳	۱/۰۰
	RCS	۱/۶۳	۳۵/۹۳	۶/۷۷	۱۵۶/۳۷	۴۴/۹۵	۱/۰۱
	THPN	۱/۶۱	۳۷/۰۸	۶/۴۵	۱۶۱/۳۴	۴۳/۸۶	۱/۱۲
گروه B	MHPN	۱/۵۸	۳۸/۸۴	۵/۲۵	۱۶۸/۰۶	۳۷/۳۲	۱/۰۸
	BHPN	۱/۵۳	۴۰/۹۸	۵/۵۳	۱۷۳/۲۶	۴۴/۳۵	۱/۱۶
	BTHPN	۱/۵۱	۴۱/۳۰	۵/۴۶	۱۷۸/۶۲	۴۵/۶۴	۱/۲۶
گروه C	FHPN	۱/۴۸	۴۲/۳۲	۵/۷۷	۱۸۴/۱۵	۴۶/۹۳	۱/۳۰
	FHPS	۱/۴۱	۴۶/۲۷	۵/۸۴	۱۹۸/۷۳	۵۶/۹۲	۱/۳۵

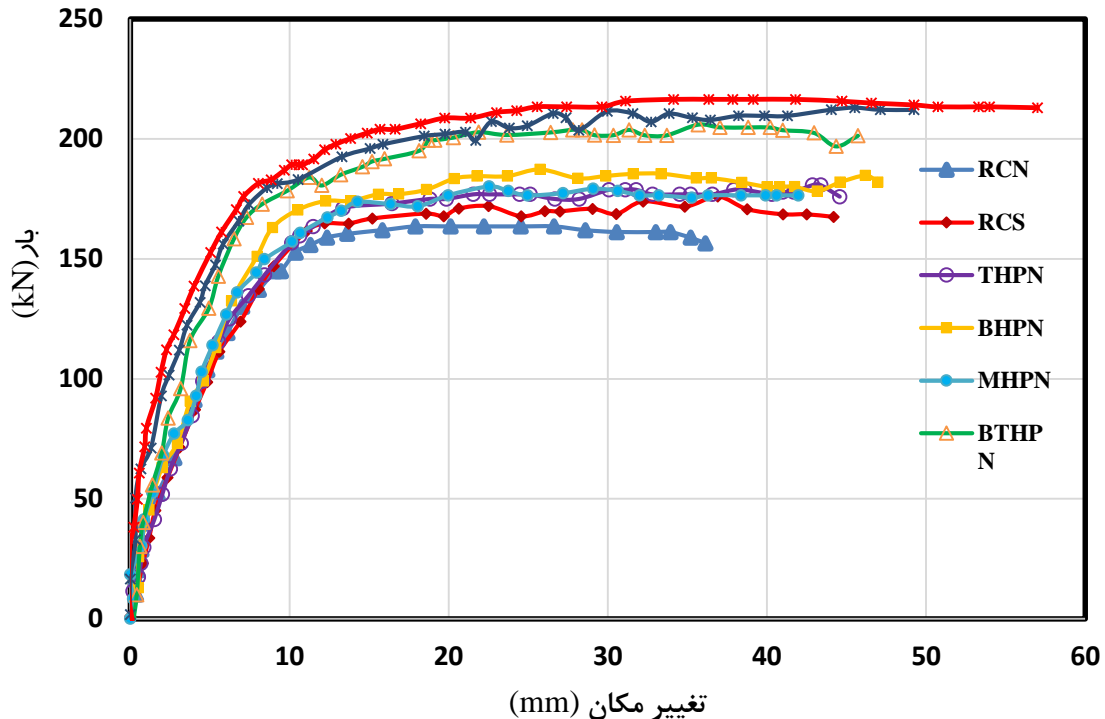
۵-۵- شکل پذیری نمونه‌ها

$\mu_E = \frac{E_{u80\%}}{E_y}$ بدست آورد که Δ_y و E_y به ترتیب جابجایی

و انرژی در لحظه جاری شدن و $\Delta_{u80\%}$ و $E_{u80\%}$ به ترتیب جابجایی و انرژی در لحظه شکست نهایی و ماکزیمم تا ۱۵٪ افت پس از بار

برای تیرهای آزمایش شده می‌توان شاخص شکل پذیری را بر مبنای نسبت جابجایی $\mu_\Delta = \frac{\Delta_{u80\%}}{\Delta_y}$ یا انرژی جذب شده

ماکزیمم نمونه هستند. مقادیر E_u و E_y مساحت زیر منحنی بار-قرائت کرنش سنج ها بر روی میلگرد کششی در بخش بعدی، نیروی متناظر جاری شدن به دست می آید و براساس آن نیرو، تغییر مکان جاری شدن هم به دست می آید و در جدول برای هر نمونه نوشته شده است.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی های آزمایشگاهی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه تیرهای مورد بررسی

۷۷٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است. در جدول ۷ مقدار جذب انرژی نمونه های مختلف آورده شده است. این مقدار از اندازه گیری مساحت زیر نمودار نیرو- تغییر مکان به دست آمده است. همانطور در شکل ۱۲ مشاهده می شود، شکل پذیری جذب انرژی نمونه ها با استفاده از مصالح HPFRCC افزایش نشان می دهد. به طوریکه در نمونه FHPS میزان شکل پذیری جذب انرژی به میزان ۸۳٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است.

۵-۶- تغییرات بار - کرنش در میلگرد و بتن

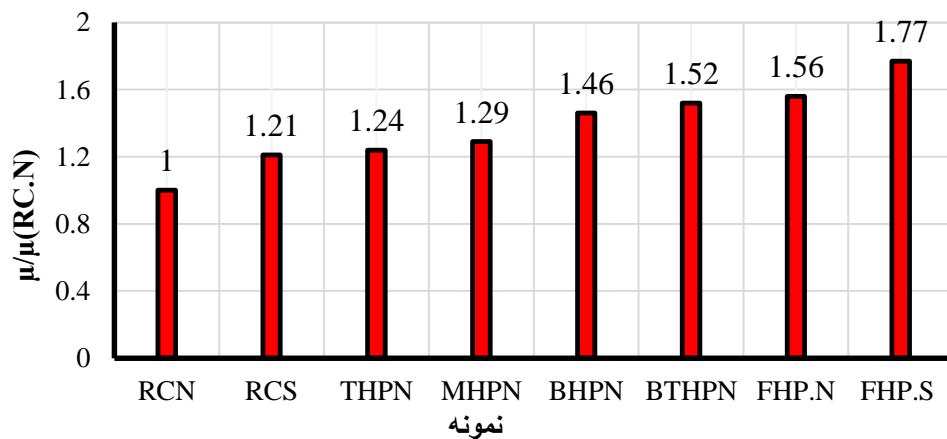
با استفاده از کرنش سنج های نصب شده بر روی میلگردهای کششی و فشاری در مقاطع بحرانی تکیه گاه میانی، مقادیر کرنش میلگردهای کششی در مقطع تکیه گاه میانی و همچنین مقادیر کرنش فشاری آرماتورهای تکیه گاه میانی و وسط دهانه تیرهای سراسری در طول مراحل بارگذاری ثبت شد. شکل ۱۲ مقادیر کرنش میلگردهای کششی و فشاری در ناحیه ممان منفی (تکیه گاه

نتایج شکل پذیری جابجایی $(\mu_{\Delta} = \frac{\Delta u_{80\%}}{\Delta y})$ و کمیت شکل-پذیری انرژی $(\mu_E = \frac{E_u}{E_y})$ نمونه ها در جدول ۷ ارائه شده است. در گروه A، با کاهش فاصله خاموت ها در نواحی برش ماکزیمم، شکل پذیری افزایش یافته است بطوری که شکل پذیری نمونه RCS با خاموت فشرده به میزان ۲۱٪ افزایش یافته است. با جایگزینی بخشی از مصالح HPFRCC به جای بتن معمولی بصورت لایه ای شکل پذیری جابجایی نسبت به تیر مرجع افزایش یافته است. شکل پذیری جابجایی نمونه های THPN، MHPN، BHPN و BTHPN به ترتیب به مقدار ۲۴٪، ۲۹٪، ۴۶٪ و ۵۲٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است. همچنین با جایگزینی کامل مصالح HPFRCC با بتن معمولی در نمونه FHPN ظرفیت باربری نهایی و شکل پذیری نهایی نسبت به نمونه مرجع به ترتیب به مقدار ۳۰٪ و ۵۶٪ افزایش داشته است. با توجه به شکل ۱۱ در نمونه FHPS با جایگزینی کامل HPFRCC و خاموت فشرده ظرفیت نهایی و شکل پذیری نمونه به ترتیب به مقدار ۳۵٪ و

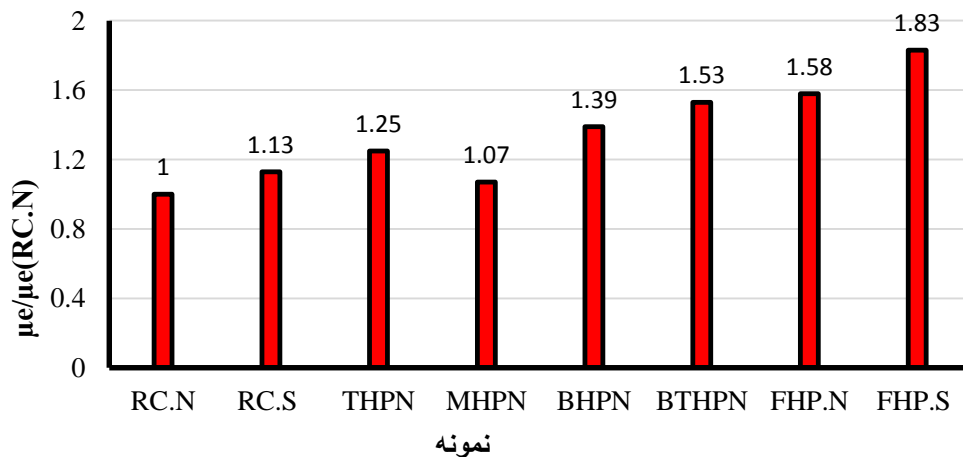
میانی) تیرها را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل ملاحظه به کارگیری مصالح HPFRCC و خاموت فشرده در نمونه‌های می‌گردد، کرنش‌های نهایی آرماتورهای کششی و فشاری با آزمایشگاهی افزایش می‌یابد (شکل ۱۳).

جدول ۷- مقایسه مقادیر شکل پذیری تغییر مکان و جذب انرژی نمونه‌ها

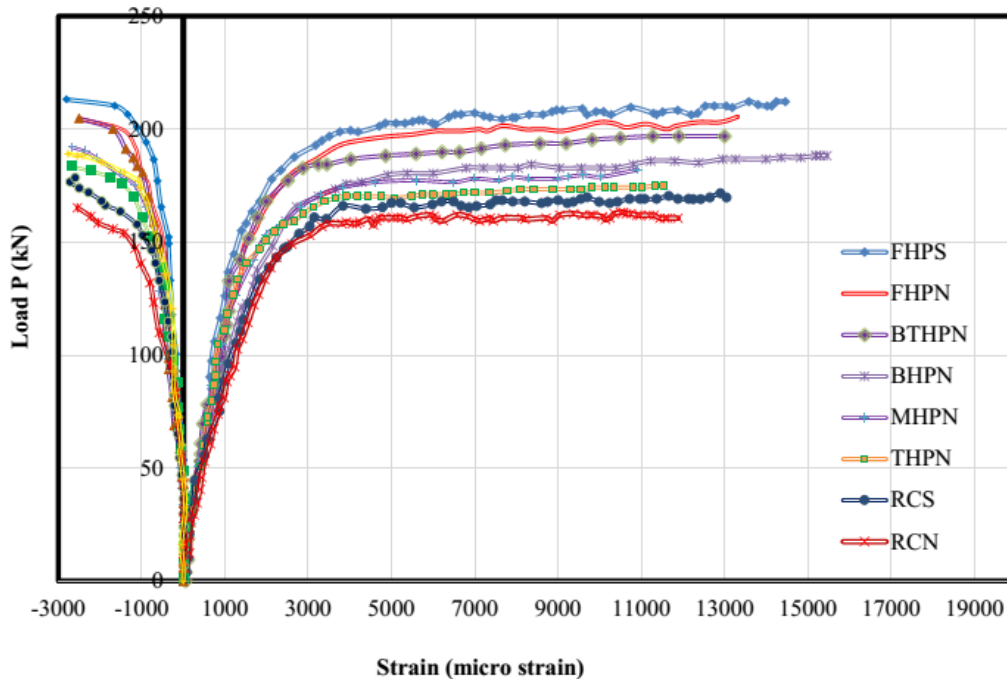
گروه	نمونه	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	$\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	E_y (KN.mm)	E_u (KN.mm)	$\mu_E = \frac{Eu}{E_y}$
A	RCN	۶/۲۱	۳۴/۰۳	۵/۴۸	۶۳۵/۶۵	۶۶۵۱/۶۱	۱۰/۴۶
	RCS	۶/۷۷	۴۴/۹۵	۶/۶۴	۷۰۶/۰۱	۸۳۴۱/۷۵	۱۱/۸۱
	THPN	۶/۴۵	۴۳/۸۶	۶/۸۰	۶۹۳/۷۶	۹۰۵۶/۲۴	۱۳/۰۵
B	MHPN	۵/۲۵	۳۷/۳۲	۷/۱۱	۶۶۷/۴۳	۷۴۹۱/۹۲	۱۱/۲۲
	BHPN	۵/۵۳	۴۴/۳۵	۸/۰۲	۶۷۱/۲۹	۹۷۵۶/۰۹	۱۴/۵۳
	BTHPN	۵/۴۶	۴۵/۶۴	۸/۳۶	۶۸۳/۶۲	۱۰۹۴۶/۹۶	۱۶/۰۱
C	FHPN	۵/۷۷	۴۶/۹۳	۸/۵۸	۷۰۴/۱۲	۱۱۶۴۵/۶۴	۱۶/۵۳
	FHPS	۵/۸۴	۵۶/۹۲	۹/۷۳	۷۷۵/۰۴	۱۴۸۸۳/۵۳	۱۹/۲۰



شکل ۱۱- مقایسه شکل پذیری جابجایی نمونه‌ها با تیر مرجع



شکل ۱۲- مقایسه شکل پذیری جذب انرژی نمونه‌ها با نمونه مرجع



شکل ۱۳- تغییرات کرنش آرماتورهای کششی و فشاری با بار در مقطع تکیه گاه میانی نمونه های آزمایش

۷-۵- محاسبه ممان مقاوم و انحناء در مقطع بحرانی

تکیه گاه میانی

در شکل ۱۴ رابطه ممان و انحنای در تکیه گاه میانی نمونه های آزمایشگاهی نشان داده شده است. شکل پذیری انحناء به صورت نسبت انحناء نهایی ϕ_u به انحناء جاری شدن ϕ_y به صورت $\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$ تعریف می گردد. انحناء نسبت کرنش فشاری بتن به ارتفاع تار خنثی در هر لحظه بارگذاری می باشد و به صورت $\phi = \frac{\epsilon_c}{x}$ تعریف می شود که از قرائت کرنش سنجها متصل به آرماتورهای فشاری و کششی در هر لحظه، می توان مقدار ϵ_c و x را با فرض خطی بودن به دست آورد.

با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می گردد که با استفاده از مصالح HPFRCC به جای بتن معمولی مقدار انحنای نمونه ها افزایش پیدا کرده است. به طوری که مقدار انحنای در نمونه FHPS به که با استفاده از مصالح HPFRCC به جای بتن معمولی مقدار انحنای در نمونه ها افزایش پیدا کرده است. به طوری که مقدار انحنای در نمونه FHPS به مقدار ۶۲٪ نسبت به نمونه مرجع افزایش پیدا کرده است. دلیل این امر را می توان به ماهیت وجود لایه های HPFRCC و افزایش ظرفیت دوران مقطع پلاستیک در نمونه ها اشاره نمود.

۸-۵- مفصل پلاستیک

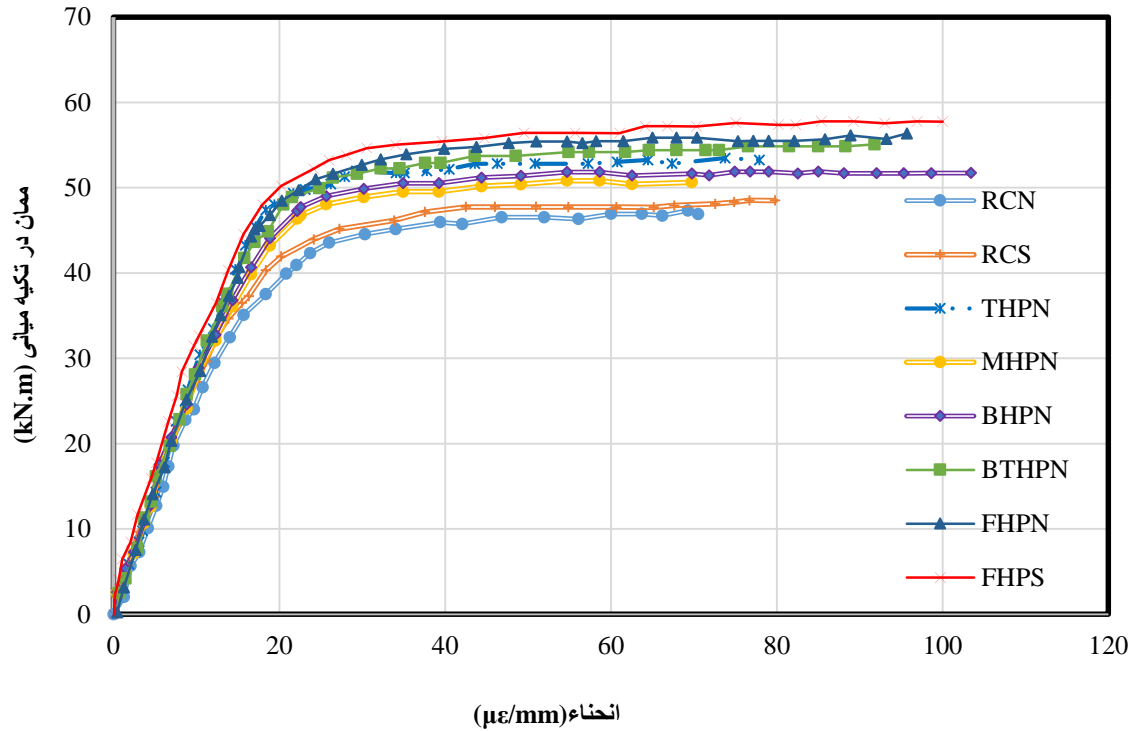
روابط متعددی برای محاسبه طول مفصل پلاستیک (l_p) و ظرفیت دورانی تیرها (θ_p) ارائه شده است. شرایطی که یک تیر بتن آرمه طره ای تحت بار گسترده بکنواخت در حالت نهایی در معرض آن قرار می گیرد در شکل ۱۵ نشان داده شده است. دوران کلی تیر (θ_{total}) را نیز می توان به دو قسمت دوران الاستیک (θ_e) و پلاستیک (θ_p) تقسیم کرد. دوران پلاستیک مقطع به صورت معادله (۱) تعریف می شود [۱۴].

$$\theta_p = \int_0^{l_y} [\phi(x) - \phi_y] dx \quad (1)$$

طول تسلیم (l_y) شامل طولی از تیر است که در آن، لنگر موجود در تیر از لنگر تسلیم بیشتر است و انحنای مربوط به هر مقطع از تیر نیز با $\phi(x)$ نشان داده شده است. دوران پلاستیک مقطع که از معادله (۱) محاسبه می شود برابر با مساحت هاشور خورده در شکل ۱۵ است که اگر این سطح هاشور خورده با یک مستطیل معادل گردد، طول این مستطیل از معادله (۲) به دست می آید:

$$l_p = \frac{1}{\phi_u - \phi_y} \int_0^{l_y} [\phi(x) - \phi_y] dx \quad (2)$$

بنابراین رابطه ی بین (θ_p) و (l_p) را می توان با استفاده از معادله (۳) محاسبه نمود:



شکل ۱۴- رابطه ممان- انحنا در تکیه گاه میانی تیرهای مورد آزمایش

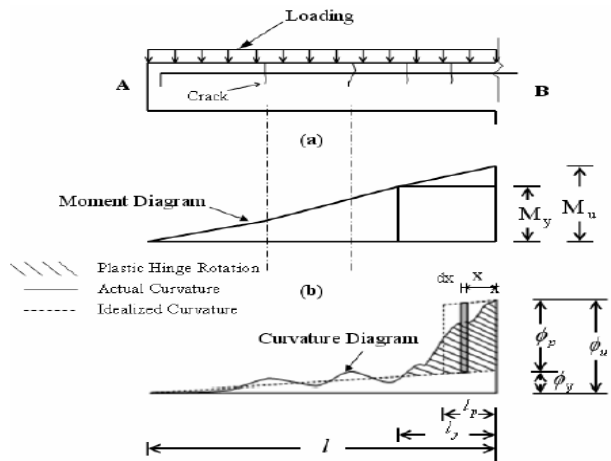
رابطه $R=0.312P$ و مقدار عکس العمل الاستیک تکیه گاه داخلی از رابطه $R=1.376P$ بدست می آید. مقادیر عکس العمل آزمایشگاهی در هر یک از تکیه گاهها توسط نیروسنج های نصب شده در محل تکیه گاه بدست می آید.

$$(\phi_u - \phi_y)l_p = \phi_p l_p \quad (3)$$

مشخصات پلاستیک نمونه های مورد آزمایش شامل طول مفصل پلاستیک (l_p) و ظرفیت دورانی (θ_p) در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸- مشخصات مفصل پلاستیک نمونه های آزمایش

گروه	نام مدل	l_p (mm)	θ_p (rad)	$\frac{l_p}{(l_p)_{RCN}}$	$\frac{\theta_p}{(\theta_p)_{RCN}}$
A	RCN	۱۲۵	۰/۰۰۵	۱	۱
	RCS	۱۴۵	۰/۰۰۸	۱/۱۶	۱/۶۰
B	THPN	۱۵۰	۰/۰۰۸	۱/۲۰	۱/۶۰
	MHPN	۱۴۵	۰/۰۰۶	۱/۱۶	۱/۲۰
	BHPN	۱۵۰	۰/۰۰۹	۱/۲۰	۱/۸۰
	BTHPN	۱۵۵	۰/۰۱۱	۱/۲۴	۲/۲۳
C	FHPN	۱۵۷	۰/۰۱۲	۱/۲۵	۲/۴۰
	FHPS	۱۶۰	۰/۰۱۳	۱/۲۸	۲/۶۰



شکل ۱۵- نحوه ی توزیع انحنا در طول تیر در حالت نهایی [۱۴]

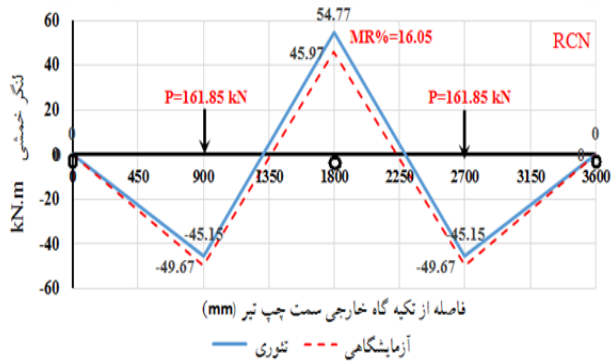
۹-۵- باز توزیع لنگر

عکس العمل تکیه گاه داخلی و خارجی تیر توسط نیروسنج های نصب شده در هر یک از تکیه گاه های خارجی و داخلی، تعیین شده است. مقدار عکس العمل الاستیک تکیه گاه خارجی با استفاده از

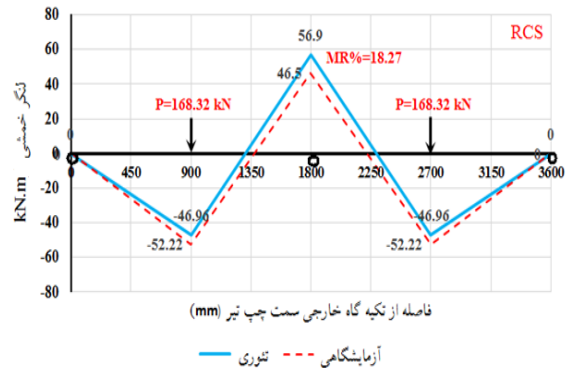
در تمام نمونه ها، در بارهای بیشتر از بار تسلیم فولاد کششی، در تراز بار یکسان، عکس العمل های تکیه گاهی آزمایشگاهی در تکیه گاه

روابط الاستیک می‌باشند. نمودارهای مربوط به دیاگرام لنگر خمشی در دو حالت لنگر تئوری و آزمایشگاهی در حالت نهایی برای تیرهای آزمایش شده در شکل‌های ۱۶ نشان داده شده است.

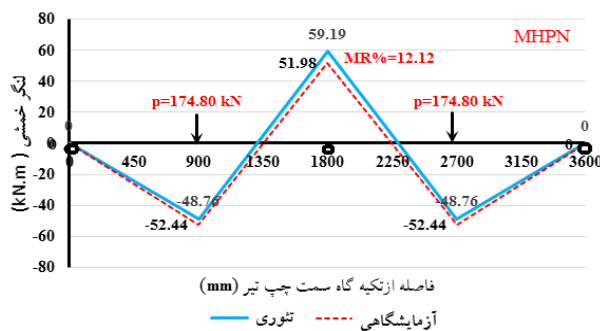
خارجی بیشتر از عکس‌العمل‌های محاسبه شده از روابط الاستیک می‌باشند. و همچنین مقادیر نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی آزمایشگاه در تکیه‌گاه داخلی کمتر از عکس‌العمل محاسبه از



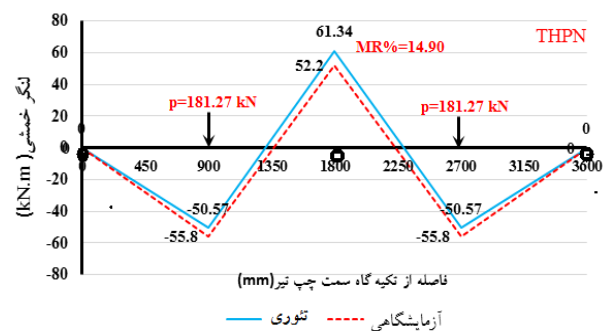
a)RCN



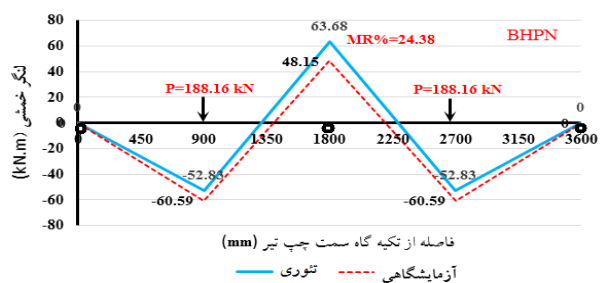
b)RCS



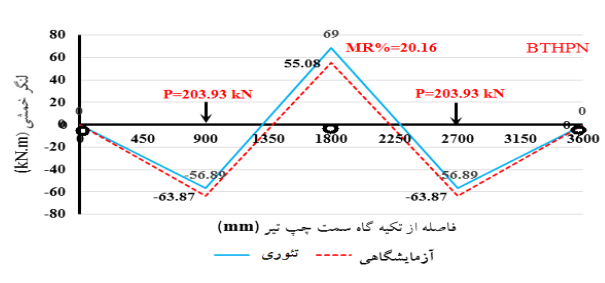
فاصله از تکیه‌گاه سمت چپ تیر (mm)
تئوری ——— آزمایشگاهی



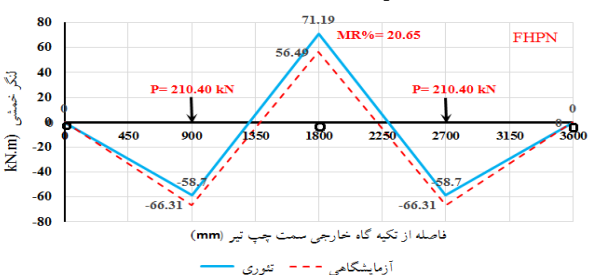
فاصله از تکیه‌گاه سمت چپ تیر (mm)
تئوری ——— آزمایشگاهی



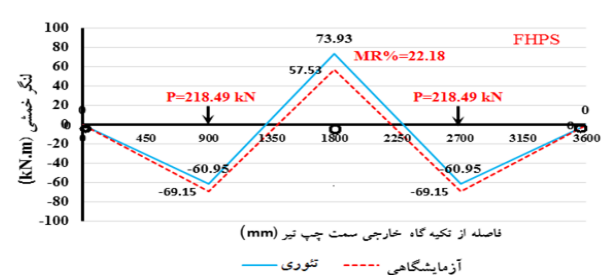
فاصله از تکیه‌گاه سمت چپ تیر (mm)
تئوری ——— آزمایشگاهی



فاصله از تکیه‌گاه سمت چپ تیر (mm)
تئوری ——— آزمایشگاهی



فاصله از تکیه‌گاه سمت چپ تیر (mm)
تئوری ——— آزمایشگاهی



فاصله از تکیه‌گاه سمت چپ تیر (mm)
تئوری ——— آزمایشگاهی

شکل ۱۶- تغییرات لنگر تئوری و آزمایشگاهی در بار نهایی در تکیه‌گاه داخلی و زیر بار نمونه‌های آزمایش

لنگر آزمایشگاهی می‌باشد که ناشی از باز توزیع لنگر می‌باشد.

$$\beta = \frac{M_e - M_{exp}}{M_e} \times 100 \quad (4)$$

مقدار لنگر بدست آمده از آنالیز خطی و آزمایشگاهی و مقدار بازپخش لنگر تیرهای آزمایش شده در جدول ۹ آورده شده است.

لنگر در تکیه‌گاه میانی و وسط دهانه با استفاده از تعادل استاتیکی و بر اساس عکس‌العمل تکیه‌گاه داخلی و خارجی تیر، محاسبه شده است. بر اساس رابطه ۴ مقدار بازپخش لنگر در ناحیه ممان منفی (تکیه‌گاه میانی) و (ممان مثبت) وسط دهانه تعیین گردید. در این رابطه M_e لنگر الاستیک تیر است که بر اساس آنالیز خطی بدست می‌آید و M_{exp}

جدول ۹- مقدار عکس العمل تکیه گاه میانی، لنگر و بازپخش لنگر تیرهای آزمایش شده

تیر	عکس العمل		عکس العمل		تکیه گاه میانی				وسط دهانه						
	بار نهایی در آزمایش (kN)	تکیه گاه خارجی (kN)	تکیه گاه داخلی (kN)		ممان خمشی الاستیک (kN.m)	ممان خمشی آزمایش (kN.m)	باز توزیع لنگر $\beta u\%$	ممان خمشی الاستیک (kN.m)	ممان خمشی آزمایش (kN.m)	باز توزیع لنگر $\beta u\%$	ممان خمشی الاستیک (kN.m)	ممان خمشی آزمایش (kN.m)	باز توزیع لنگر $\beta u\%$		
			$\frac{R_{exp}}{R_{elastic}}$	$\frac{R_{exp}}{R_{elastic}}$										$\frac{\beta u}{\beta u_{(RC)}}$	$\frac{\beta u}{\beta u_{(RC)}}$
RCN	۱۶۱,۸۵	۵۰,۴۹	۵۵,۱۸	۱,۰۹	۲۲۲,۷۰	۲۱۳,۰۰	۰,۹۵	۵۴,۷۷	۴۵,۹۷	۱۶,۰۵	۱,۰۰	۴۵,۱۵	۴۹,۶۷	۱۰,۰۱	۱,۰۰
RCS	۱۶۸,۳۲	۵۲,۵۱	۵۸,۲۸	۱,۱۱	۲۳۱,۶۰	۲۲۰,۰۸	۰,۹۵	۵۶,۹۵	۴۶,۵۰	۱۸,۳۴	۱,۱۴	۴۶,۹۶	۵۲,۲۲	۱۱,۲۱	۱,۱۲
THPN	۱۸۱,۲۷	۵۶,۵۵	۶۲,۰۰	۱,۰۹	۲۴۹,۴۹	۲۳۸,۵۴	۰,۹۵	۶۱,۳۴	۵۲,۲۰	۱۴,۹۰	۰,۹۲	۵۰,۵۷	۵۵,۸۰	۱۰,۳۴	۱,۰۳
MHPN	۱۷۴,۸۰	۵۴,۵۳	۵۸,۲۶	۱,۰۶	۲۴۰,۵۲	۲۳۳,۰۸	۰,۹۷	۵۹,۱۵	۵۱,۹۸	۱۲,۱۲	۰,۶۳	۴۸,۷۶	۵۲,۴۴	۷,۵۶	۰,۷۵
BHPN	۱۸۸,۱۶	۵۸,۷۰	۶۷,۳۳	۱,۱۴	۲۵۸,۹۲	۲۴۱,۶۶	۰,۹۳	۶۳,۶۸	۴۸,۱۵	۲۴,۳۸	۱,۵۱	۵۲,۸۳	۶۰,۵۹	۱۴,۷۰	۱,۴۷
BTHPN	۲۰۳,۹۳	۶۳,۶۲	۷۰,۹۶	۱,۰۹	۲۸۰,۶۰	۲۶۵,۹۴	۰,۹۵	۶۹,۰۰	۵۵,۰۸	۲۰,۱۶	۱,۲۵	۵۶,۸۹	۶۳,۸۷	۱۲,۲۸	۱,۲۲
FHPN	۲۱۰,۴۰	۶۵,۶۴	۷۳,۶۷	۱,۰۷	۲۸۹,۵۱	۲۷۳,۴۶	۰,۹۴	۷۱,۱۹	۵۶,۴۹	۲۰,۶۵	۱,۲۸	۵۸,۷۰	۶۶,۳۱	۱۲,۹۸	۱,۲۹
FHPS	۲۱۸,۴۹	۶۸,۱۶	۷۶,۸۳	۱,۰۸	۳۰۰,۶۴	۲۸۳,۳۲	۰,۹۴	۷۳,۹۳	۵۷,۵۳	۲۲,۱۸	۱,۳۸	۶۰,۹۵	۶۹,۱۵	۱۳,۴۷	۱,۳۴

از نتایج بدست آمده از این جدول پیداست که مقدار بازپخش لنگر تیرهای RCN و RCS در تکیه گاه میانی به ترتیب برابر ۱۶,۰۶ و ۱۸,۳۴ و در وسط دهانه به ترتیب ۱۰,۰۱ و ۱۱,۲۱ درصد و برای تیرهای THPN، MHPN، BHPN و BTHPN در تکیه گاه میانی به ترتیب برابر ۱۴,۹۰، ۱۲,۱۲، ۱۴,۳۸ و ۲۰,۱۶ و در وسط دهانه به ترتیب ۱۰,۳۴، ۷,۵۶، ۱۴,۷۰ و ۱۲,۲۸ درصد و برای نمونه های FHPN و FHPS در تکیه گاه میانی به ترتیب ۱۲,۹۸ و ۲۰,۶۵ و در وسط دهانه به ترتیب معادل ۱۲,۹۸ و ۱۳,۴۷ درصد می باشد.

با جایگزینی مصالح HPFRCC بجای بتن معمولی در بخش های مختلف مقطع تیر شکل پذیری انحنای تا میزان ۶۲ درصد در تیر FHPS نسبت به تیر مرجع افزایش یافته است. میزان انحنای تیرهای ساخته شده با مصالح HPFRCC و خاموت فشرده بدلیل افزایش شکل پذیری نسبت به نمونه تیر مرجع افزایش دارد. میزان انحنای تیر FHPS در حدود ۶۲ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش داشته است.

نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از مصالح HPFRCC و خاموت فشرده باعث بهبود ظرفیت دورانی مقطع و افزایش طول مفصل پلاستیک در نمونه های گردیده است. به طوری که طول مفصل پلاستیک در نمونه FHPS به میزان ۲۸ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است.

نتایج آزمایش نشان داد که مقدار باز توزیع لنگر خمشی در تیرهای سراسری به مقدار زیادی به رفتار ممان انحنای تیر وابسته است. با

از نتایج بدست آمده از این جدول پیداست که مقدار بازپخش لنگر تیرهای RCN و RCS در تکیه گاه میانی به ترتیب برابر ۱۶,۰۶ و ۱۸,۳۴ و در وسط دهانه به ترتیب ۱۰,۰۱ و ۱۱,۲۱ درصد و برای تیرهای THPN، MHPN، BHPN و BTHPN در تکیه گاه میانی به ترتیب برابر ۱۴,۹۰، ۱۲,۱۲، ۱۴,۳۸ و ۲۰,۱۶ و در وسط دهانه به ترتیب ۱۰,۳۴، ۷,۵۶، ۱۴,۷۰ و ۱۲,۲۸ درصد و برای نمونه های FHPN و FHPS در تکیه گاه میانی به ترتیب ۱۲,۹۸ و ۲۰,۶۵ و در وسط دهانه به ترتیب معادل ۱۲,۹۸ و ۱۳,۴۷ درصد می باشد. همانطور که مشاهده می شود با توجه به موقعیت لایه HPFRCC در مقطع تیر مقدار باز توزیع لنگر برای تیرهای ساخته شده متغیر می باشد. بیشترین مقدار باز توزیع لنگر مربوط به نمونه BHPN که دارای یک لایه HPFRCC در قسمت تحتانی تیر می باشد. کمترین مقدار باز توزیع لنگر مربوط به نمونه MHPN که در ناحیه تکیه گاه میانی مصالح HPFRCC جایگزین بتن شده است می باشد.

۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر هشت نمونه تیر سراسری دو دهانه با بتن معمولی و کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند HPFRCC با دو نوع متفاوت فاصله خاموت ها (نصف و یک چهارم ارتفاع مؤثر) با چیدمان متفاوت بتن ریزی لایه ای ساخته و به صورت آزمایشگاهی بارگذاری شدند که نتایج مربوطه بصورت زیر داده شده اند:

Sharbatdar, Plastic hinge rotation capacity of reinforced HPFRCC beams. *Journal of Structural Engineering*, 2013. 141(2): p. 04014111.

[12] ACI 318-14, 2014. Building code requirements for structural concrete and commentary, Michigan (USA), American Concrete Institute

[13] Committee, J.C., Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks. Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 2008

[14] Kheyroddin, A., (1996). "Non linear Finite Element Analysis of Flexure-Dominant Reinforced Concrete Structures", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, 290p.

افزایش انحنای تیر مقدار باز توزیع در نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در نمونه RCS مقدار انحنا تیر در حدود ۴۴ درصد نسبت به نمونه مرجع افزایش دارد. که این افزایش می‌تواند به دلیل خاموت گذاری فشرده و افزایش ظرفیت دوران مفصل پلاستیک در این نمونه نسبت به تیر مرجع باشد. همچنین بیشترین انحنا در نمونه FHPS با ۶۲ درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد.

۷- مراجع

[1] Ghods, A., Sharbatdar, M.K., (2020). "An investigation on the behavior of two fixed end beams cast with HPFRCC composite", *Case Stud. Constr. Mater.* 13 (2020) e00466.

[2] Do Carmo, R. N., & Lopes, S. M., 2008. Available plastic rotation in continuous high strength concrete beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(10), 1152-1162.

[3] Farahbod, F., & Mostofinejad, D., 2011. Experimental study of moment redistribution in RC frames strengthened with CFRP sheets. *Composite Structures*, 93(3), pp. 1168-1177.

[5] Mousavi Esfahani, S.V., Sharbatdar, M.K., (2020). "Substitution effects of conventional concrete with high-performance fiber-reinforced cementitious composite (HPFRCC) in beams reinforced with GFRP bars", *Case Stud. Constr. Mater.* 13 (2020) e00440.

[6] Visintin, P. Ali, M. A. Xie, T. Sturm, A. B. Experimental Investigation of Moment Redistribution in Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Beams, *Construction and Building Materials*, 2018. 166, p: 433-444

[7] Lin, C.H and Chien, Y.M. (2000). "Effect of Section Ductility On Moment redistribution of Continuous Concrete Beams". *Journal of the Chinese institute of engineering*, 23(2) 131-141

[8] Lopes, S.M.R. and Bernando, L.F.A. (2003). "Plastic rotation capacity of high strength concrete beams." *Journal of materials and structures*, 36(1), 23-31

[9] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. 2003. "Setting the stage: toward performance – based classification of FRC composites "in high performance fiber reinforced cement composites, proc. of the 4th int 1 RILEM workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt.

[10] Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K., Increasing the flexural capacity of RC beams using partially HPFRCC layers. *Computers and Concrete*, Vol. 16, No. 4 (2015) 545-568

[11] Hemmati, A., A. Kheyroddin, and M.K.

Effect of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) and Transverse Reinforcement on the plastic Hinge Characteristics and Moment Redistribution in Continuous Concrete Beams

Ramin Ehsani

Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

Mohammad Kazem Sharbatdar *

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Ali Kheyroddin

Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

Abstract

In this paper, the results of Experimental Investigation Determination the Moment Redistribution and Plastic Hinge in continuous concrete Beams by replacing normal Concrete with HPFRCC and reducing the spacing of the stirrups are presented. Eight specimens of beam with reinforced concrete and fiber reinforced cement composites with bending distance were considered as three groups of A, B and C. Group A consisted of two conventional bending beams with standard bending intervals ($d/2$) (reference sample) and compact ($d/4$). Group B consists of four beams made of reinforced cement composites reinforced as a layer with non-compressive bending intervals ($d/2$) and Group C comprises two beams made of reinforced cement composites. Strong fibers were fully compressed ($d/2$) and compressed ($d/4$). Experimental results showed that using reinforced cement composite reinforced fibers instead of normal concrete in different parts of beams and the use of compacted stirrups increased the ductility of beams. In the specimens made of HPFRCC with compressive stirrups, bearing capacity, displacement ductility and energy ductility increased by 35, 77 and 83%, respectively, compared to the reference sample. The highest amount of moment redistribution, occurred in the specimen made with HPFRCC in the lower part with 1.51 times the reference beam.

Keywords: reinforced concrete continuous beams, High performance fiber reinforced cementitious composites (HPFRCC), ductility, moment redistribution, moment capacity.

* Corresponding Author: msharbatdar@semnan.ac.ir

