

بررسی آزمایشگاهی تاثیر جایگزینی بتن الیافی توانمند در رفتار خمشی و شکل پذیری تیرهای بتن مسلح سراسری دو دهانه

رامین احسانی¹، محمد کاظم شربتدار²، علی خیرالدین³

1- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

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

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

raminehsani@semnan.ac.ir

چکیده

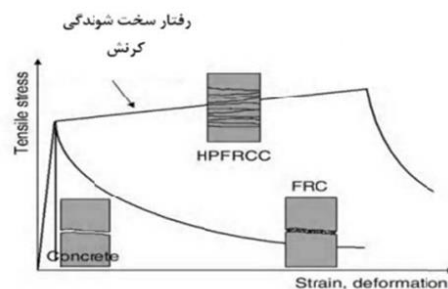
در یک تیر سراسری بتن آرمه، با رسیدن لنگر در مقطع بحرانی به حد نهایی، تیر دچار خرابی نمی شود، بلکه اگر سازه از شکل پذیری کافی برخوردار باشد پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نقطه بحرانی، بازتوزیع تنش و لنگر به وقوع پیوسته و سبب می شود که سایر نقاط سازه نیز به مقاومت و ظرفیت نهایی خود برسند. رفتار سخت شوندگی کرنش تحت کشش، از بتن الیافی توانمند یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و قابلیت ترک خوردگی های زیاد قبل از شکست، ساخته است. هدف از این تحقیق، بررسی رفتار خمشی، الگوی ترک خوردگی، شکل پذیری تیرهای سراسری دو دهانه ساخته شده با مصالح بتن الیافی توانمند حاوی 2٪ درصد الیاف فولادی در مقایسه با تیرهای ساخته شده با بتن معمولی می باشد. بدین منظور دو عدد تیر بتن آرمه که نمونه اول به عنوان تیر مرجع و نمونه دوم با بتن الیافی توانمند بطور کامل دارای بتن الیافی توانمند می باشند ساخته شدند. ابعاد هر یک از تیرها 4000*250*200 میلیمتر و فاصله مرکز به مرکز هر یک از تکیه گاه های تیر از یکدیگر 1800 میلی متر می باشد. طول آزاد هر یک از دهانه ها به دو قسمت مساوی تقسیم و نیروی متمرکز در وسط و به صورت متقارن و به صورت افزایشی اعمال گردید. نتایج تحقیق نشان داد که استفاده از مصالح بتن الیافی توانمند با 2٪ الیاف فولادی در نمونه ها باعث افزایش شکل پذیری جابجایی و انرژی به ترتیب به میزان 2.5 و 1.76 گردیده و بارهای ترک خوردگی و نهایی تیر دارای بتن الیافی توانمند به ترتیب 50 و 27 درصد نسبت به تیر ساخته شده با بتن معمولی افزایش یافته نشان می دهد. با بکارگیری بتن الیافی توانمند بجای بتن معمولی در ساخت تیرهای سراسری، ظرفیت باربری در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند بطور کامل به میزان 35٪ نسبت به تیرهای سراسری ساخته شده با بتن معمولی افزایش داشته است. سطح زیر منحنی نیرو - تغییر مکان که نشان دهنده میزان جذب انرژی میباشد؛ در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند بطور کامل به مقدار 38٪ افزایش نسبت به تیرهای ساخته شده با بتن معمولی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، تیر سراسری، شکل پذیری، باز توزیع لنگر، الیاف فولادی

1. مقدمه

بتن های الیافی توانمند (HPFRCC) در سال های اخیر شاهد پیشرفت های چشمگیر و زیادی بوده اند. عمده ی این پیشرفت ها به سبب توسعه ی هر چند بیشتر ملات، گونه های مختلف الیاف، اندرکنش ملات-الیاف فرایند تولید کامپوزیت درک مناسب تر در خصوص مکانیزم های اصلی کنترل رفتار و بهبود مستمر میزان هزینه های اجرایی می باشد. علاوه بر آن می توان به مواردی مانند معرفی نسل جدید مواد افزودنی (فوق روان کننده ها) با امکان دستیابی به مقاومت های بالا همراه با کم ترین کاهش در کارایی ملات، کاربرد ریز پر کننده ها مثل دوده سیلیسی و خاکستر بادی و فهم بهتر از چگونگی تاثیر آنها در تخلخل، مقاومت و دوام ملات اشاره نمود. این موارد همگی باعث پیشرفت های اساسی در ساخت و مدل سازی رفتار این بتن ها شده اند. نسبت

دادن واژه های پیشرفته یا توانمند به مصالح مهندسی بیانگر تفاوت آنها با مصالح متداول و معمولی است که با توجه به آخرین فناوری ها و موقعیت مکانی آنها در سازه به کار می رود. یکی از این مصالح توانمند که در سالیان اخیر، پیشرفت چشمگیری داشته، بتن های الیافی توانمند میباشد. در دهه 1960، رامولدی و همکاران بررسی تاثیر الیاف فولادی بر کاهش شکنندگی بتن را در دستور کار قرار دادند [1 و 2]. این روند با کاربرد سایر انواع الیاف ادامه یافت و در سال های اخیر ترکیب انواع الیاف با طول های مختلف در دستور کار قرار گرفت. گسترش دانش در خصوص چگونگی تاثیر الیاف بر ملات، منجر به تدوین توصیه هایی در مورد طراحی سازه ای توسط موسسه RILEM گردید [3 و 4]. در اوایل دهه 1980، تولید یک مصالح بتن الیافی با رفتار کششی شکل پذیر مورد توجه قرار گرفت که شروع آن توسط اوستون و همکاران در سال 1971 بود [5]. در سال 1989 کرنچل و استانگ با کاربرد مناسب الیاف به هم پیوسته به شکل پذیری کششی 100 برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند [6]. در سال 1999 کورباچ و جسی و در سال 2003 نامان و رینهارت و همکاران نوع جدیدی از بتن الیافی با الیاف بهم پیوسته تحت عنوان بتن مسلح بافته شده (TRC) را ارائه نمودند [7 و 8]. نامان و رینهارت در سال 2003 مصالحی را معرفی نمودند که جدا از FRC ها طبقه بندی می شدند و شامل یک بخش سخت شوندگی کرنش در منحنی تنش - کرنش کششی خود بودند و در رده بتن های الیافی توانمند قرار گرفتند. رفتار سخت شوندگی کرنش بتن های الیافی توانمند (HPFRCC) در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1. مقایسه رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و بتن الیافی توانمند (HPFRCC)

بتن های الیافی توانمند (HPFRCC) کاربردهای فراوانی چه به شکل جداگانه و چه در ترکیب با آرماتورهای فولادی و مهارهای پیش تنیدگی دارند. رفتار خمشی بتن الیافی توانمند (HPFRCC) متأثر از شکل پذیری کششی آن است. در این خصوص بررسی های فراوانی توسط مالچ، لی، ونگ، روکوگو و کونیدا انجام شده است [9 و 10]. همچنین فوکویاما و همکارانش یک تیر با مصالح بتن معمولی کامل (RC) و یک تیر با مصالح HPFRCC کامل را تحت بارگذاری سیکلی مورد آزمایش قرار دادند [11]. نامان و همکاران با آزمایش بر روی 18 تیر بتن مسلح الیافی دو دهانه به نتایجی در خصوص ویژگی های پلاستیک این تیرها دست یافتند [12]. تیرهای رابط در دیوار برشی کوبله که شربتدار، خیرالدین، دهقان و امیری بر مبنای کار کنبلات و همکاران، با ساخت نمونه های آزمایشگاهی به مقاومت و شکل پذیری بالاتری نسبت به بتن معمولی دست یافتند [13, 14, 15]. بر اثر خمش، میکروترک های چند گانه در انتهای تیر شکل می گیرند و اجازه تحمل انحنای بزرگ را به آن می دهند. مقاومت خمشی یا مدول گسختگی افزایش یافته و تغییر شکل های بزرگ به سادگی قابل دستیابی است. در تحقیق دیگری که توسط همتی و همکاران بر روی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح با استفاده از بتن های الیافی توانمند (HPFRCC) انجام شد مشاهده گردید که با جایگزینی بتن الیافی توانمند بجای بتن معمولی، ظرفیت باربری و شکل پذیری تیرها افزایش قابل توجهی می یابد [16, 17, 18].

2. مطالعه آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی جهت بررسی تاثیر بتن الیافی توانمند بر رفتار خمشی، الگوی ترک خوردگی، شکل پذیری تیرهای سراسری دو دهانه بتن مسلح انجام گردید.

2-1- نمونه های آزمایش

برای بررسی رفتار خمشی تیرهای سراسری (دو دهانه) بتن معمولی و بتن الیافی توانمند، می بایست نمونه هایی انتخاب شوند که تا حد امکان به مقیاس واقعی نزدیک باشند تا بتوان به نتایج قابل اعتمادی دست یافت لذا دو نمونه تیر سراسری مطابق جدول 1 با ابعاد هندسی (مقطع و طول) و چیدمان آرماتورهای طولی و عرضی (خاموت ها) و شرایط تکیه گاهی یکسان در نظر گرفته شدند بطوریکه تیر RC بعنوان تیر مرجع با بتن معمولی بود و در تیر FHP از بتن الیافی توانمند HPCRCC در کل تیر بعنوان جایگزین بتن معمولی استفاده شده است. تکیه گاه های تیرها نیز از نوع ساده انتخاب شدند. فاصله مرکز به مرکز هر یک از تکیه گاه های تیر از یکدیگر 1800 میلی متر می باشد و طول کل نمونه ها برابر 4000 میلی متر انتخاب شد. طول آزاد هر یک از دهانه ها به دو قسمت مساوی تقسیم و نیروی متمرکز در وسط و به صورت متقارن اعمال شد. در کلیه نمونه های تحت آزمایش، ابعاد مقطع عرضی تیرها دارای ارتفاع 250 میلی متر و عرض 200 میلی متر انتخاب گردید. نسبت آرماتور مصرفی در این تیرها به طریقی انتخاب خواهد شد که مقطع به حالت پر فولاد نزدیک نگردد و انهدام خمشی حاکم باشد. ضمن اینکه نسبت آرماتور مصرفی از نسبت آرماتور حداقل نیز بزرگتر بوده و خطر انهدام ترد در نمونه ها ایجاد نشود و مساحت خاموت های مورد استفاده در این نمونه های آزمایشگاهی به طریقی انتخاب گردید که از آرماتورهای حداقل برشی بیشتر باشد لذا شکست برشی در این تیرها رخ نداده و رفتار خمشی حاکم بود. از دو عدد آرماتور فوقانی به قطر 14 میلی متر به عنوان میلگرد طولی سراسری در بالا و پایین مقطع تیر و در محل لنگر ماکزیمم وسط دهانه و تکیه گاه میانی از سه عدد میلگرد نمره 14 استفاده گردید. همچنین از آرماتورهای با قطر 8 میلی متر به فاصله مرکز به مرکز 100 میلی متر جهت خاموت گذاری تیرها استفاده گردید. نحوه آرماتور گذاری و چیدمان آرماتورها در شکل 4 نشان داده شده است. بمنظور اندازه گیری کرنش در میلگردها از کرنش سنج های الکتریکی استفاده گردید. محل نصب کرنش سنج ها در شکل 3 نشان داده شده است. همچنین به منظور اندازه گیری خیز نمونه ها از سه عدد تغییر مکان سنج الکتریکی (LVDT) با دقت 1/1000 در زیر هر دهانه استفاده گردید. شکل 2 جهت اندازه گیری بار کل اعمالی از طرف جک از (Load Cell) با ظرفیت 100 تن استفاده شد. قبل از بارگذاری تیرها، تمامی کرنش سنج های نصب شده و نیروسنج ها به دستگاه ثبت داده ها (Data Logger) و کامپیوتر وصل شده و عملیات پایش، در طول بارگذاری به صورت کامل انجام گردید. در شکل 2 ابعاد و جزئیات چیدمان دستگاه آزمایش بطور شماتیک و در شکل 5 نحوه انتقال بار به نمونه ها بطور واقعی نشان داده شده است.

جدول 1. نحوه نام گذاری و مشخصات تیرهای سراسری دو دهانه

شماره	نام نمونه	شرح نمونه
1	RC	نمونه ی تیر سراسری با بتن معمولی (مرجع)
2	FHP	نمونه ی تیر سراسری و استفاده از بتن الیافی توانمند بطور کامل در طول تیر

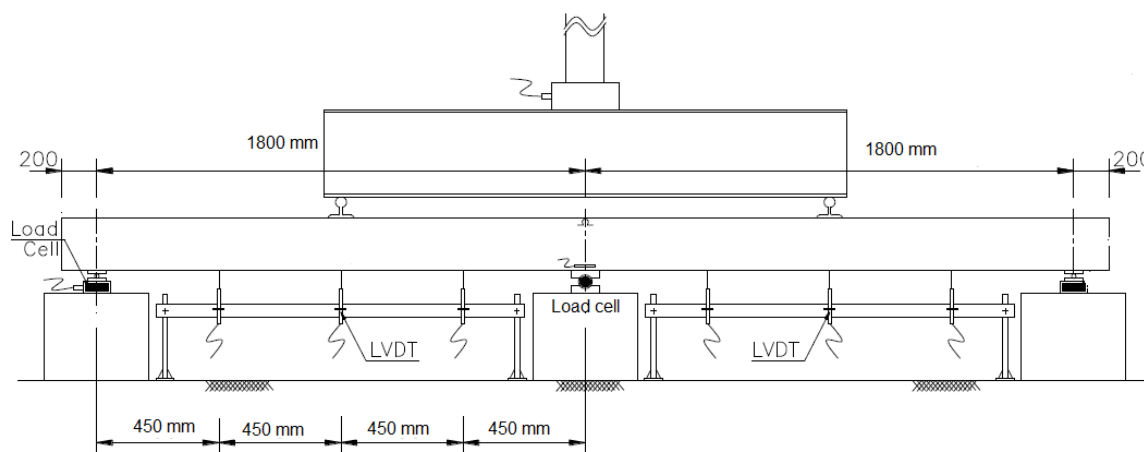
2-2- خواص مصالح مصرفی

سیمان بکار رفته در ساخت تیرها، سیمان پرتلند نوع 2 بوده و سنگدانه ها از نوع سیلیسی و گرد گوشه که اندازه بزرگترین دانه آن 10mm است. همچنین از میکرو سیلیس و فوق روانساز با پایه پلیمری در ساخت تیرهای بتنی استفاده شده است. الیاف مصرفی در ساخت بتن الیافی توانمند از نوع فولادی به طول 30mm و به قطر 0.6mm می باشد. نسبت های وزنی اختلاط مصالح در بتن الیافی توانمند و بتن معمولی در جدول 2 ارائه شده است که بر مبنای وزن سیمان مصرفی می باشد. باید توجه داشت که در ساخت بتن الیافی توانمند، الیاف به آرامی و طی چندین مرحله به مخلوط اضافه می شوند تا از پدیده گلوله شدن الیاف جلوگیری به عمل آید. برای تعیین مقاومت فشاری بتن معمولی و بتن الیافی توانمند از نمونه های مکعبی 15*15 سانتی متری استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی و بتن الیافی توانمند ای پس از گذشت 28 روز و پس از تبدیل به مقاومت معادل نمونه استوانه در جدول 2 ارائه شده است. فولاد مورد استفاده در ساخت نمونه

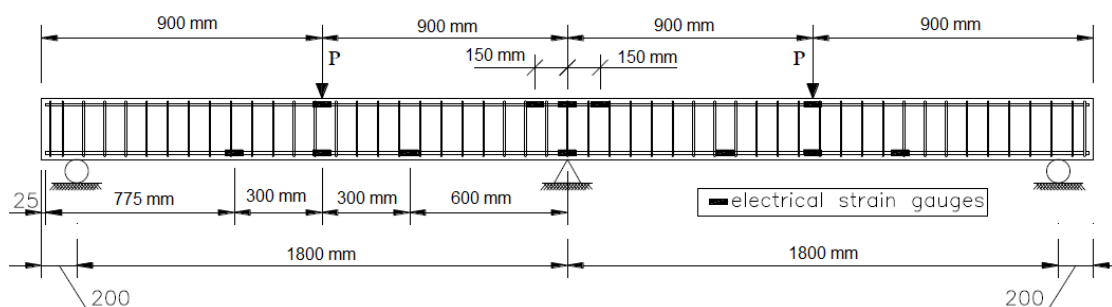
های آزمایشگاهی از نوع فولاد A3 که بوسیله دستگاه کشش یونیورسال مورد نتایج قرار گرفته و نتایج حاصل از آزمایش کششی میلگردها در جدول 3 آمده است. الیاف مورد استفاده در طرح اختلاط بتن از نوع الیاف فولادی قلابدار و مشخصات آنها مطابق با استاندارد ASTM A 820 می باشند که در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 2. نسبت های اختلاط مصالح در بتن الیافی توانمند و بتن معمولی

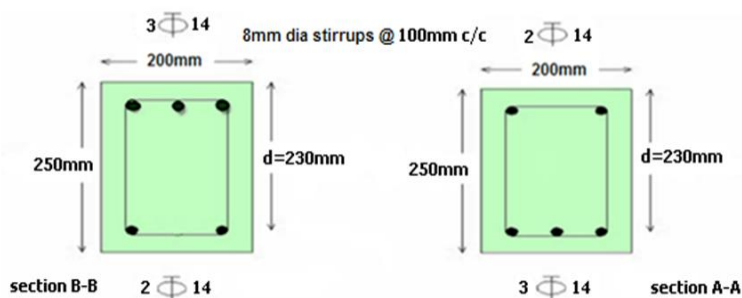
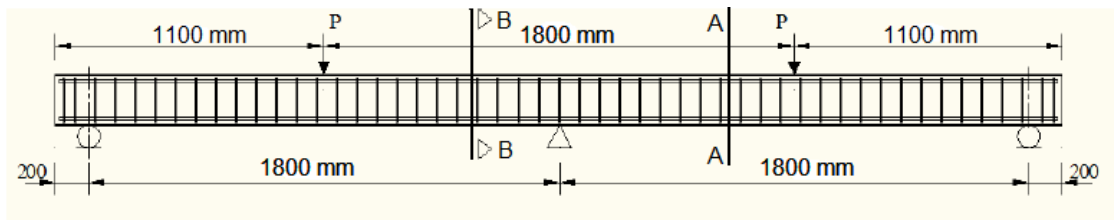
مقاومت فشاری نمونه استوانه ای 28 روزه (MPa)	الیاف فولادی (٪2)	فوق روان کننده	میکرو سیلیس	ماسه	شن	سیمان	آب	مصالح
60	0.2	0.07	0.08	1.35	-	1	0.35	بتن توانمند
55	-	0.07	0.08	0.60	1	1	0.35	بتن معمولی



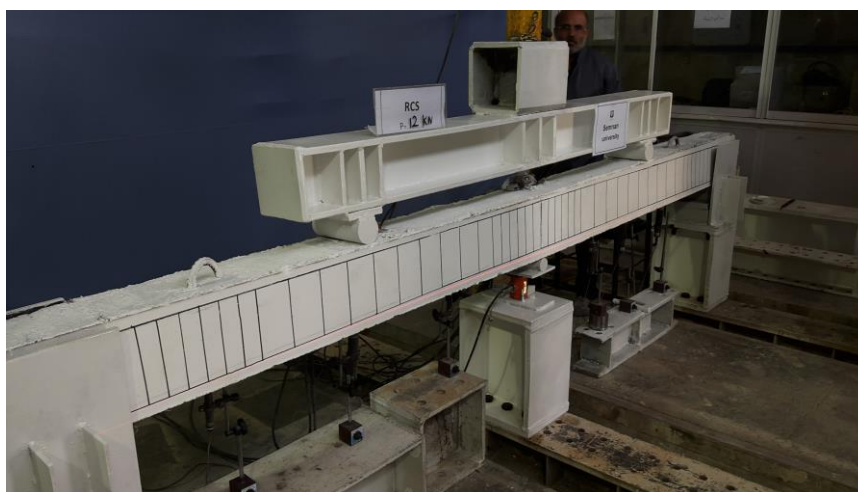
شکل 2. نمای شماتیک چیدمان آزمایش



شکل 3. محل نصب کرنش سنج ها



شکل 4. نحوه میلگرد گذاری تیر سراسری دو دهانه، مقطع عرضی در وسط دهانه و تکیه گاه میانی تیر



شکل 5. نمای واقعی سیستم آزمایش

جدول 3. نتایج آزمایش مقاومت کششی میلگردهای مورد استفاده در این آزمایش

کرنش نهایی	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش تسلیم	مقاومت تسلیم (MPa)	میلگرد (mm)
0.165	658.23	0.0021	530	14

جدول 4. مشخصات الیاف مورد استفاده در آزمایش

30	طول (mm)
0.6	قطر (mm)
50	نسبت طول به قطر (نسبت ظاهری)
1000	مقاومت کششی (MPa)
200	مدول الاستیسیته (GPa)

3. مشاهدات و نتایج آزمایش

3-1- الگوی ترک خوردگی، مد شکست و رفتار نیرو - تغییر مکان تیرها

ابتدا تیر RC مورد آزمایش قرار گرفت و نیروی قائم متمرکز به آن اعمال گردید. اولین ترک خوردگی تحت نیروی حدود 35 کیلونیوتن و تغییر شکل حدود 2 میلی متر در وسط هر یک از دهانه اتفاق افتاد که در شکل 3 نشان داده شده است. تسلیم آرماتورهای کششی در نیروی حدود 130 کیلونیوتن و تغییر شکل 7.28 میلی متر رخ داد. ترک خوردگی ها نیز با ترک های کششی در وسط دهانه شروع می شود و به تدریج گسترش یافته و به سمت تکیه گاه حرکت می کند و عرض آنها نیز زیاد می شود و در نهایت تیر RC تحت نیروی 160 و تغییر مکان حداکثر 25.81 میلی متر منهدم گردید. در مرحله دوم تیر FHP که با بتن الیافی توانمند ساخته شده بود، تحت آزمایش قرار گرفت. اولین ترک خوردگی تحت نیروی 52.5 کیلو نیوتن و تغییر شکل 3 میلی متر در وسط دهانه اتفاق افتاد. ترک خوردگی ها با ترک های کششی در وسط دهانه شروع شده و به تدریج گسترش یافته و عرض آنها زیاد می گردد در نهایت تیر دارای نیروی 215 کیلو نیوتن و تغییر مکان حداکثر 47.97 میلی متر گردیده است. الگوی ترک خوردگی تیر در لحظه انهدام و منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه های تیر در شکل 6 نشان داده شده است. منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه های تیرها در شکل 7 نشان داده شده است. نتایج منحنی شکل 7 و جدول شماره 5 نشان می دهد که بارهای ترک خوردگی و نهایی تیر دارای بتن الیافی توانمند به ترتیب 50 و 27 درصد افزایش یافته است و تغییر مکان نهایی تیر دارای بتن الیافی هم 70 درصد بیش از تیر با بتن معمولی است که نشان از عملکرد مناسب بتن الیافی توانمند در افزایش ظرفیت و تحمل تغییر شکل های زیاد می باشد.



الف- تیر RC

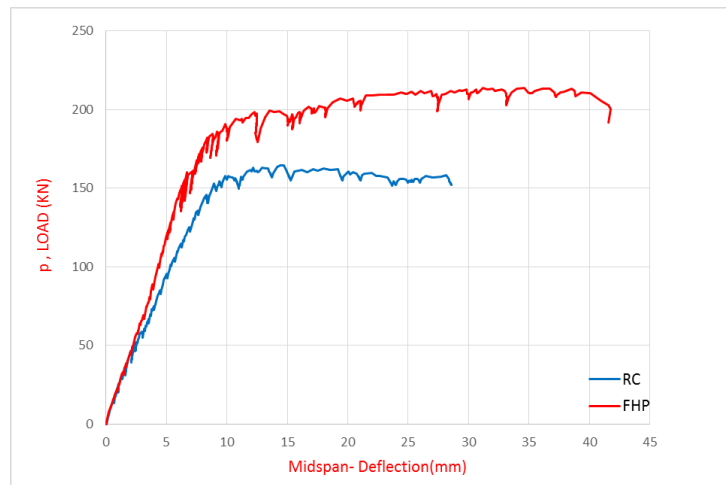


ب- تیر FHP

شکل 6. الگوی انهدام تیرها در تغییر مکان نهایی

جدول 5. نتایج آزمایش نیرو - تغییر مکان تیرهای تحت آزمایش

$\frac{P_{crFHP}}{P_{crRC}}$	P_{cr} بار ترک خوردگی (kN)	$\frac{\Delta_{uFHP}}{\Delta_{uRC}}$	Δ_u تغییر مکان نهایی (mm)	$\frac{P_{uFHP}}{P_{uRC}}$	P_u بار نهایی (kN)	نوع تیر
1	35	1	28.31	1	168.16	RC
1.5	52.5	1.70	47.97	1.27	213.5	FHP



شکل 7. منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه تیرها

3-2- شکل پذیری

شکل پذیری جابجایی از نوع شکل پذیری خیز عضو است و به لحاظ اندازه گیری آزمایشگاهی از سهولت بیشتری نسبت به دیگر شکل پذیری برخوردار است. در این تحقیق میانگین خیز وسط دهانه چپ و راست متناظر با تسلیم شدگی فولادهای کششی در تکیه گاه میانی، به عنوان خیز تسلیم و میانگین خیز وسط دهانه چپ و راست هنگام شکست تیر، به عنوان خیز نهایی در نظر گرفته شده است. شاخص شکل پذیری μ_{Δ} با رابطه $\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ تعریف می شود که Δ_u و Δ_y خیز نهایی و تسلیم می باشد. روش دیگر تعریف شکل پذیری، بر مبنای مفهوم انرژی است، بنابراین شاخص شکل پذیری انرژی μ_E ، بر اساس نسبت انرژی جذب شده تیر در بار نهایی به انرژی جذب شده در بار تسلیم است. کمیت شکل پذیری انرژی با رابطه $\mu_E = \frac{E_u}{E_y}$ بیان می شود که E_u و E_y انرژی جذب شده تیر در بار نهایی و بار تسلیم است. بمنظور ارزیابی شکل پذیری تیرهای آزمایش شده، رفتار تیرها از ابتدا تا انتهای بارگذاری بکمک انواع حسگرهای نصب شده بر قسمت های مختلف اعضاء، پایش و مورد ارزیابی قرار گرفت. منحنی های بار - خیز تیرها در شکل 8 نشان داده شده است.

جدول 6. تغییر مکان و انرژی آزاد شده نمونه ها در لحظه جاری شدن فولاد کششی در تکیه گاه میانی

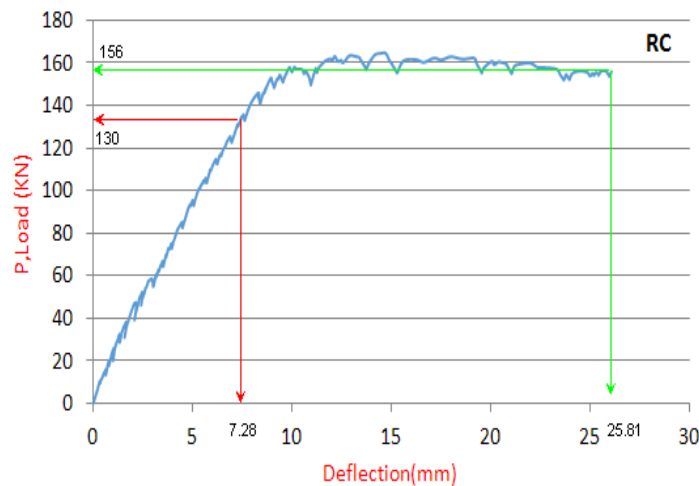
$\frac{\mu_{Ei}}{\mu_{ERC}}$	μ_E	E_u (KN.mm)	E_y (KN.mm)	$\frac{\mu_{\Delta i}}{\mu_{\Delta RC}}$	μ_{Δ}	Δ_u (mm)	Δ_y (mm)	نمونه
1	11.73	5830.1	496.86	1	3.54	25.81	7.28	RC
1.76	20.67	8073.3	390.54	2.5	8.83	47.97	5.43	FHP

همانگونه که از شکل 7 و جدول 6 مشاهده می شود تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند دارای رفتار مناسب تر و شکل پذیری بیشتری از تیر ساخته شده با بتن معمولی می باشد بطوری که شکل پذیری جابجایی و انرژی تیر FHP دارای بتن الیافی توانمند به ترتیب بیش از 2.5 و 1.76 برابر مقادیر مشابه در تیر ساخته شده با بتن معمولی بودند.

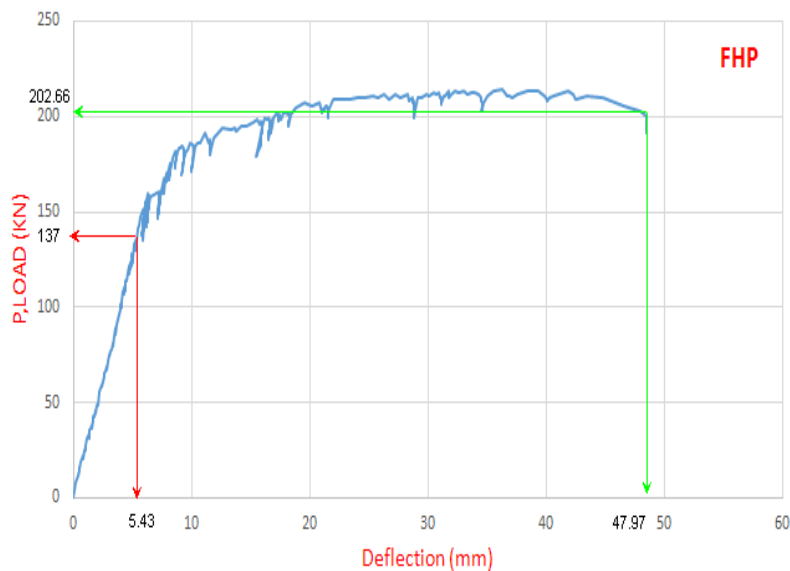
3-3- عکس العمل تکیه گاهی تیرها و باز توزیع لنگر

نمودار مقدار بار انتقالی به تکیه گاه میانی و کناری نسبت به بار اعمالی به تیرهای آزمایش شده در شکل 9 نشان داده شده است. عکس العمل تکیه گاه میانی و تکیه گاه کناری توسط Load cell نصب شده در زیر تیر تعیین شده است. در اشکال

مربوطه، مقدار عکس العمل تکیه گاه میانی و کناری که از آنالیز خطی و آزمایش بدست آمده است ترسیم شده است. همانگونه که از شکل 9 مشهود است در بارهای بیشتر از بار تسلیم فولاد کششی، در تراز بار یکسان، عکس العمل های تکیه گاهی آزمایشگاهی در تکیه گاه میانی و کناری به ترتیب کمتر و بیشتر از عکس العمل محاسبه شده از روابط الاستیک می باشند. همچنین نمودار لنگر در ناحیه مثبت (وسط دهانه) و منفی (تکیه گاه میانی) نسبت به با اعمالی برای تیرهای آزمایش شده در



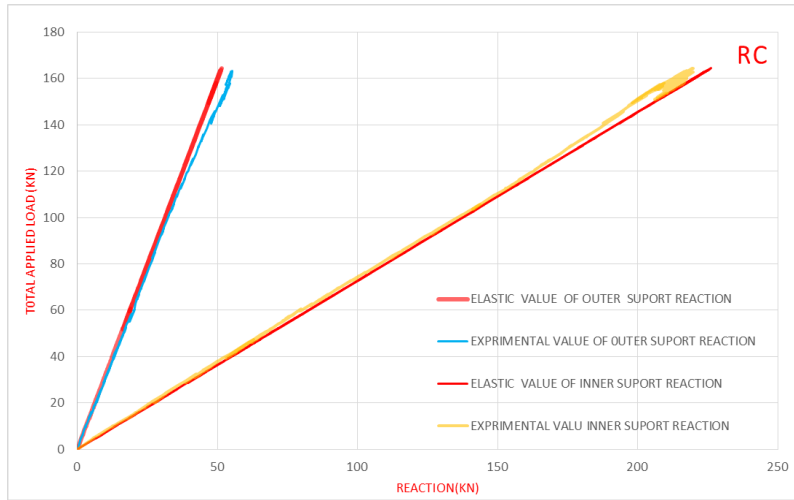
الف- تیر RC



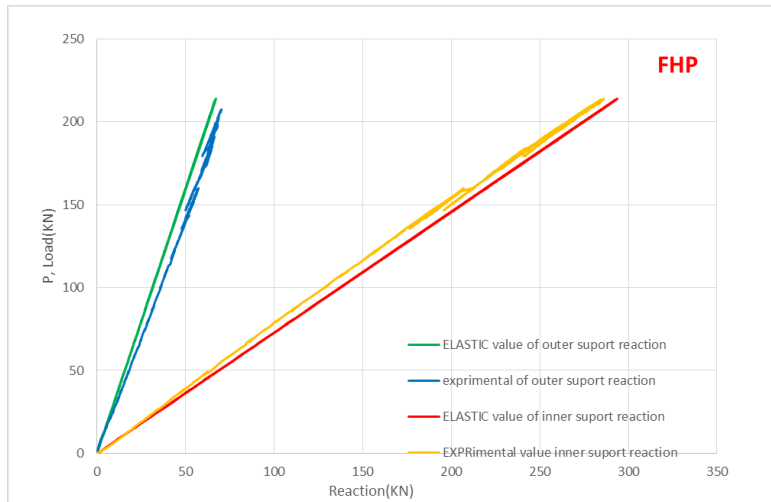
ب- تیر FHP

شکل 8. محاسبه سطح زیر منحنی نیرو - تغییر مکان تیرهای آزمایش

شکل 10 نشان داده شده است. لنگر در تکیه گاه میانی و وسط دهانه از تعادل استاتیکی و بر اساس عکس العمل میانی و کناری تیر محاسبه شده است. دیاگرام لنگر خمشی در دو حالت لنگر الاستیک و آزمایشگاهی در حالت نهایی برای تیرهای آزمایش شده در شکل 11 نشان داده شده است.

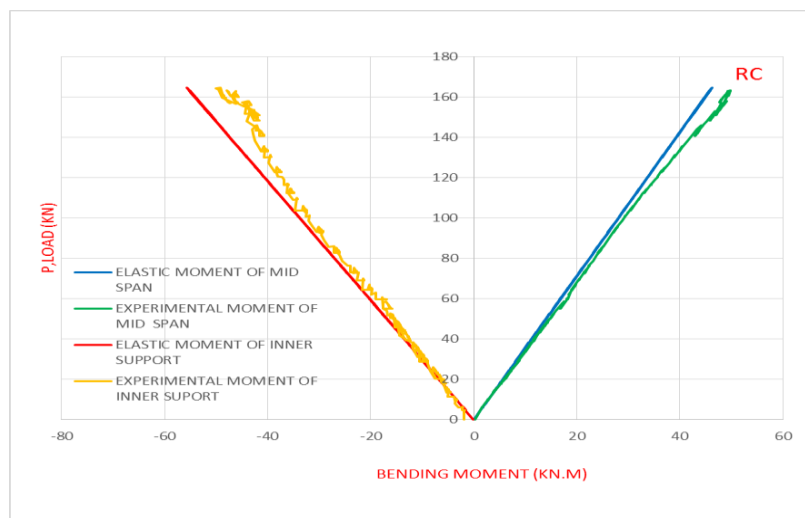


الف- تیر RC

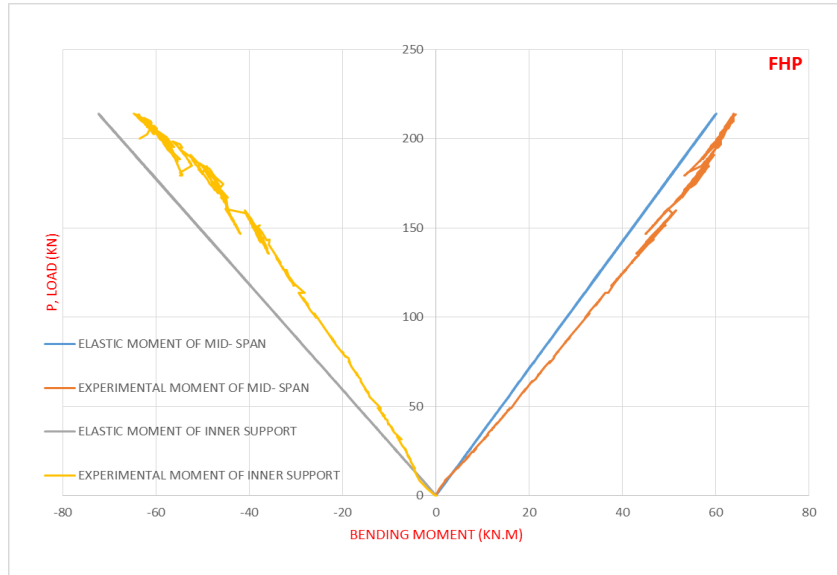


ب- تیر FHP

شکل 9. تغییرات عکس العمل تکیه گاهی الاستیک و آزمایشگاهی تیرها با افزایش بار در تکیه گاه میانی و کناری

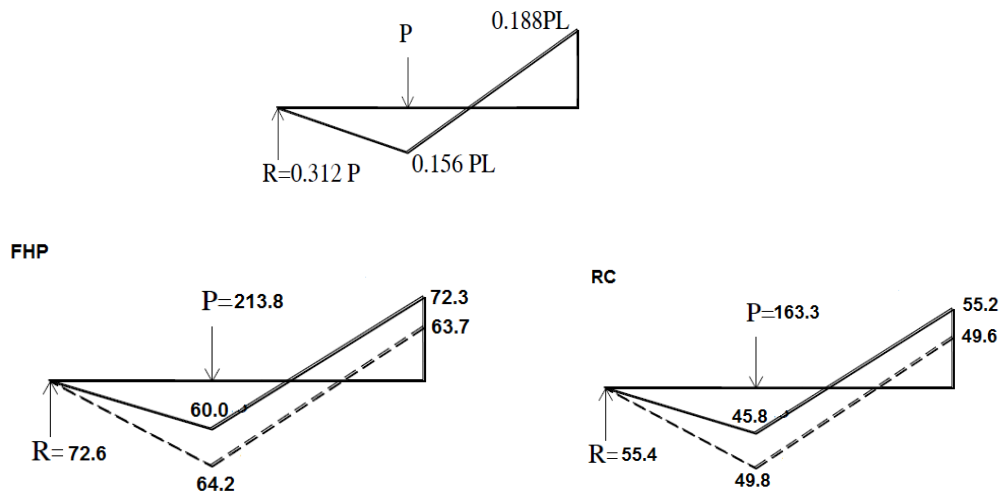


الف- تیر RC



ب- تیر FHP

شکل 10. تغییرات لنگر الاستیک و آزمایشگاهی با افزایش بار در تیرها



--- دیاگرام ممان خمشی پس از توزیع لنگر (کیلو نیوتن . متر) ، P بار نهایی (کیلو نیوتن)
- دیاگرام ممان خمشی الاستیک (کیلونیوتن . متر) ، R عکس العمل تکیه گاه کناری در بار نهایی پس از بازتوزیع لنگر

شکل 11. دیاگرام لنگر خمشی در دو حالت لنگر الاستیک و آزمایشگاهی در حالت نهایی برای تیرهای آزمایش شده

4. نتیجه گیری

در این تحقیق دو تیر سراسری دو دهانه به طول 4 متر با بتن الیافی توانمند و همچنین بتن معمولی ساخته و سپس تا مرحله تخریب بارگذاری و پایش شده و نتایج زیر بدست آمد.

- مقایسه الگوی ترک خوردگی در ناحیه مفصل پلاستیک تیرها نشان می دهد که میزان ترک خوردگی در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند بیشتر از تیرهای ساخته شده با بتن معمولی می باشد.
- با بکارگیری بتن الیافی توانمند بجای بتن معمولی در ساخت تیرهای سراسری، ظرفیت باربری در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند بطور کامل به میزان 35٪ نسبت به تیرهای سراسری ساخته شده با بتن معمولی افزایش داشته است .
- شکل پذیری جابجایی تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند بطور کامل به میزان 2.5 برابر نسبت به تیرهای سراسری ساخته شده با بتن معمولی افزایش داشته است .
- سطح زیر منحنی نیرو - تغییر مکان که نشان دهنده میزان جذب انرژی میباشد؛ در تیرهای ساخته شده با بتن الیافی توانمند بطور کامل به مقدار 38٪ افزایش نسبت به تیرهای ساخته شده با بتن معمولی را نشان می دهد .

5. مراجع

- [1] Romualdi .j.p. and Baston G.B., 1963 “Mechanics of crack arrest in concrete”.journal of Engineering Mechanics , ASCE Proc ,89(EM3):147-168
- [2] Romualdi .j.p .Mandel j.A.1964. “Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement ‘. Jornal of ACI: 657-670
- [3] Bolander, j. 1999.“Spring network model of fiber reinforced cement composites”.High performance fiber Reinforced Cement Composite. HPFRCC. 3H.W.Reinhardt and A.E.Naaman, 341-350
- [4] Vandewalle, L.,et al, 2003. RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fiber reinforced concrete “Sigma – epsilon- design method – final Recommendation. Material and Structures.36(262):560-567.
- [5] Aveston,j,Cooper,G,A.and Kelly,A.1971.”Singleand multiple fracture,the properties of fiber composites”. Conference proceedings of national physical laboratory,IPC,Science and Technology prss,Ltd,14-24
- [6]Krenchel,H. and Stang,H.1989.”Stable microcracking in cementitious materials”. In Brittle Matrix Composites 2.A.M.Brandl and j,H.Marshall,eds.,20-30.
- [7]Cubach, M. and Jesse,F.1999.”High-performance Textile-reinforced concrete “,Structural Engineering International 9(4,1):289-291(3).
- [8]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(HPFRCC-4),Proc. Of the 4th int RILEM Workshop.A.E.Naaman and H.W.Reinhurdt.
- [9]Wang,S.2005.”Micromechanics based matrix desine for engineered cementitious composites”,phD Thesis,Uniwersity of Michigan.
- [10]Kunieda, M. and Rokugo ,K.2006.”Measurment of crack opening behavior within ECC under bending moment “. In proc.,int 1RILEM Workshop HPFRCC in Structural Applications,Eds.Fischer,G.,and V.C.Li,313-322.

[11] Fukuyama, H., Matuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M. and Suwada, H. 2000. "Structural performance of engineered cementitious composite element" Composite and Hybrid Structures, 6th ASCCS Int 1 Conf. on Steel- concrete Composite Structural, 969-976.

[12] Naman, A.E., Paramasivam, P., Balazs, G., Bayasi, Z.M., Eibl, J., Erdelyi, L., Hassoum, N.M., Krstulovic, N., Li, V.C. and Lohrmann, G. 1996. "Reinforced and prestressed concrete using HPFRCC matrices". High performance fiber reinforced cement composites 2.

[13] Canbolat, B.A., Parra-Montesinos, G.J. and Wight, J.K., 2005. "Experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams", Structural Journal, 102(1), 159-166.

[14] امیری سوادرودباری، 1390، " بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار برشی و خمشی تیرهای کوپله بتنی ساخته شده با بتن های الیافی توانمند (HPFRCC) در دیوار برشی کوپله "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان .

[15] دهقان، م، 1390، " بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی اثر جریات آرماتور گذاری در تیرهای کوپله ساخته شده با بتن های الیافی توانمند (HPFRCC)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان .

[16] همتی، ع، مهر ماه 1390، "بررسی رفتار تیر بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)"، سومین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.

[17] همتی، ع، 1390، " بررسی عددی افزایش ظرفیت باربری قاب بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC)"، مجله مهندسی عمران شریف.

[18] همتی، ع، 1392، " بررسی رفتار خمشی تیرها و قابهای بتن مسلح کامپوزیتی الیافی توانمند (HPFRCC)"، پایان نامه دکتری، دانشگاه سمنان.