



www.cpjournals.com

نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal (CPJ)

بررسی و مقایسه آزمایشگاهی تیر بتن آرمه با و بدون الیاف پلی پروپیلن، مقاومسازی شده با فناوری نوین HPRCC

محمد رضا اسدی^{۱*}

۱- کارشناس عمران، مدیر عامل شرکت طرح گسترش وارنا، ایران

پست الکترونیکی:

Asadi5671@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۴

چکیده

امروزه در کشور ما به دلیل شرایط لرزه خیزی، وجود سازه‌های قدیمی، نواقص ناشی از شرایط محیطی یا داخلی مصالح و نیز ضعف‌های موجود در طراحی و اجرای سازه‌ها، بحث مقاومسازی و بهسازی با سطح اهمیت بالا مطرح است. با توجه به گسترش روز افزون صنعت ساختمان در ابعاد مختلف، استفاده از ایده‌های نو و جدید در کیفیت و نحوه اجرا، انتخاب مصالح و ... از ملزومات این پیشرفت‌ها می‌باشد. لذا براساس نیاز کشور به توسعه روش‌های نوین با استفاده از مصالح توانمند، استفاده از بتن مسلح به الیاف HPRCC در جهت مقاومسازی، مورد توجه واقع شده است. از آنجایی که HPRCC یک مصالح نسبتاً جدید است در این تحقیق بنا بر آن است تا تاثیر HPRCC بر عملکرد سازه‌های تیرهای بتن مسلح به واسطه تست همزمان نمونه‌های مقاومسازی شده و نمونه‌ی فاقدسازی، همراه با و بدون الیاف پلی پروپیلن با مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش مورد بررسی واقع گردد. در این راستا یک تیر مرجع و چهار تیر مقاومسازی شده با یک لایه نازک HPRCC در قسمت تحتانی تیرها با همراه با الیاف پلی پروپیلن، تحت آزمایش چهار نقطه‌ای خمشی خالص قرار گرفته و تاثیر مقاومسازی بر پارامترهایی نظیر ظرفیت خمشی، شکل پذیری، جذب انرژی و ... مورد بررسی و مقایسه واقع می‌گردد. براساس کارهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مورد نظر، نتایج کمی و کیفی متعدد حاصل شد. از جمله این نتایج می‌توان به قیاس ظرفیت خمشی و شکل پذیری نمونه‌ها اشاره نمود. اثر مقاومسازی بر شکل پذیری نمونه‌ها به مراتب بیش از ظرفیت خمشی می‌باشد، به گونه‌ای که حداکثر افزایش در ضریب شکل پذیری ناشی از مقاومسازی ۴۱ درصد بوده، حال آنکه این عدد در بحث ظرفیت خمشی به ۳۲ درصد محدود می‌گردد.

کلمات کلیدی: مقاومسازی، رفتار خمشی، شکل پذیری، HPRCC

۱- مقدمه

امروزه در کشور ما به دلیل شرایط لرزه‌خیزی، وجود سازه‌های قدیمی، نواقص ناشی از شرایط محیطی یا داخلی مصالح و نیز ضعف‌های موجود در طراحی و اجرای سازه‌ها، بحث مقاوم‌سازی و بهسازی با سطح اهمیت بالا مطرح است.

با توجه به گسترش روزافزون صنعت ساختمان در ابعاد مختلف، استفاده از ایده‌های نو و جدید در کیفیت و نحوه اجرا، انتخاب مصالح و ... از ملزومات این پیشرفت‌ها می‌باشد. لذا براساس نیاز کشور به توسعه روش‌های نوین با استفاده از مصالح توانمند، استفاده از یک لایه نازک بتن، مسلح به الیاف HPFRCC در جهت مقاوم‌سازی تیرهای آسیب دیده تحت شرایط بارگذاری یا خوردگی و همین‌طور بهسازی تیرها و دال‌های بتنی با رویکرد آزمایشگاهی و با هدف افزایش خمشی و ظرفیت شکل‌پذیری و افزایش دوام المان مذکور، مطلوب این تحقیق می‌باشد.

استفاده از مصالح توانمند به جای مصالح متداول از مدت‌ها پیش مد نظر پژوهشگران قرار گرفته و مطالعات بسیاری را به خود اختصاص داده است. این مصالح علاوه بر افزایش ظرفیت سازه‌ها در برابر زلزله، به تامین پایایی بیشتر سازه‌ها در برابر عوامل مضر محیطی نیز کمک می‌کنند. نسبت دادن واژه‌های پیشرفته یا توانمند به مصالح مهندسی بیانگر تفاوت آن‌ها با مصالح متداول و معمولی است که با توجه به آخرین فناوری‌ها و موقعیت مکانی آنها در سازه بکار می‌رود. در این مقاله، واژه توانمند به رده خاصی از مصالح بتن الیافی اطلاق می‌شود که دارای رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش پس از بروز اولین ترک خوردگی‌ها هستند که همراه با شکل‌گیری ترک‌های چندگانه و رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد است. یکی از این مصالح توانمند که در سالیان اخیر، پیشرفت چشم‌گیری داشته، کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند می‌باشد.

از آنجاییکه که عیب‌یابی در درون بتن می‌تواند یکی از مشکلات دردسر ساز برای مهندسين سازه باشد، لذا با شناخت عملکرد این مقاوم‌سازی بر روی تیرهای با عیوب میلگرد و نحوه بازده آن‌ها، می‌توان به نتایج مهمی جهت بازسازی و تعمیر تیرهای آسیب دیده پرداخت. رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش که با سایر کامپوزیت‌های سیمانی و بتنی متفاوت است، از HPFRC یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و قابلیت ترک‌خوردگی‌های زیاد قبل از شکست، ساخته است. از آنجایی که HPFRCC یک مصالح نسبتاً جدید است، عمده‌ی پژوهش‌های انجام گرفته، بر روی شناخت ماهیت این مصالح، ترکیبات مختلف آن، نسبت‌های مختلف اختلاط مصالح، روابط حاکم بر منحنی تنش و کرنش، ابداع کامپوزیت‌های جدید و سایر موارد مشابه متمرکز بوده است. تحقیقاتی نیز بر روی کاربرهای 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 پایه‌ی روابط حاکم بر رفتار مصالح انجام می‌گیرد.

پیشنهاد مقدار استفاده بهینه از مصالح HPFRCC در ترکیب با بتن معمولی، در قسمتهایی از سازه که تحت تنش‌های بالایی قرار دارند و شکست سازه بر روی آن بخش‌ها متمرکز است، ضروری به نظر می‌رسد و می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد. لذا به نظر می‌رسد که ضرورت دارد مطالعات بیشتری بر روی مباحث سازه‌ای و کاربردی این مصالح انجام گیرد و رفتار خمشی تیرهای ساخته شده با این مصالح توانمند بررسی گردد. ضمن اینکه اکثر مطالعات انجام گرفته در مورد مصالح HPFRCC با الیاف فولادی و ^۱ PVA بوده است و با توجه به اینکه این الیاف در داخل کشور تولید نمی‌شود، لذا در این مقاله از الیاف ^۲ PP که در داخل کشور وجود دارد به آسانی می‌توان آن را تهیه نمود، استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش‌های اجرای تحقیق

این تحقیق با رویکرد آزمایشگاهی انجام گرفته که طی آن پنج تیر بتن مسلح کامل تحت آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای نقطه‌ای قرار می‌گیرند. یکی از تیرها به عنوان نمونه مرجع انتخاب شده و چهار تیر دیگر در سطوح پایینی تیرهای بتنی بصورت قالب‌بندی شکل با لایه ای از مصالح HPFRCC مقاوم‌سازی می‌شوند. منحنی‌های نیرو تغییر مکان، الگوهای ترک‌خوردگی، و مقادیر کرنش آرماتورها در این نمونه‌های آزمایشگاهی استخراج گردیده و با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

برای بررسی رفتار خمشی تیرها می‌بایست نمونه‌هایی انتخاب می‌شدند که تا حد امکان به مقیاس واقعی نزدیک باشند تا بتوان به نتایج قابل اعتمادی دست یافت. از آنجایی که هدف از انجام این آزمایش‌ها، بررسی رفتار خمشی بود، الگوی بارگذاری چهار نقطه‌ای انتخاب گردید. تکیه‌گاه‌ها نیز از نوع مفصلی انتخاب گردید تا علاوه بر سادگی اجرا، خمش قابل دستیابی باشد [۱]. با در نظر گرفتن محدودیت، طول نمونه‌ها (طول کلی تیر) برابر ۲۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شد تا امکان جاگذاری تیرها و اعمال نیرو به آن‌ها میسر گردد.

تکیه‌گاه‌ها به نحوی در دو طرف تیر اجرا شدند که فاصله‌ی مرکز تا مرکز آن‌ها ۱۸۰۰ میلی‌متر باشد. این طول آزاد به سه قسمت مساوی تقسیم و نیروهای متمرکز به فاصله‌ی ۶۰۰ میلی‌متر از یکدیگر و به صورت متقارن اعمال شدند. خاموت گذاری به شکلی در طول تیرها انجام شد که شکست برشی حاکم نبوده و انهدام همه‌ی تیرها، خمشی باشد ابعاد مقطع عرضی تیرها به عرض ۲۵۰ و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متر انتخاب گردید. یک تیر بتن مسلح به عنوان نمونه‌ی مرجع و چهار تیر با لایه‌های HPFRCC تحتانی U شکل به ضخامت یکسان و با مقدار الیاف متفاوت برای این آزمایش در نظر گرفته شدند. ضخامت لایه‌ی HPFRCC در کلیه نمونه‌ها برابر ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شد. نسبت آرماتور مصرفی در این تیرها ۰/۰۰۸ بود که حدود ۳/۵٪ آرماتور حداکثر در تیرهای بتن مسلح معمولی بود تا با توجه به وجود

^۱ Poly Vinyl Alcohol

^۲ Poly Propylene

الیاف در لایه تحتانی که شبیه فولاد مازاد عمل می‌کنند، مقطع به حالت پر فولاد نزدیک نگردد و انهدام خمشی حاکم باشد و همچنین با ضعف خمشی تیر تاثیر مقاوم سازی مشهود باشد، ضمن اینکه این نسبت آرماتور از نسبت آرماتور حداقل که ۰/۰۳۷ می‌باشد نیز بزرگتر بوده و خطر انهدام ترد، نمونه‌ها را تهدید نمی‌کرد.

در مورد خاموت‌ها نیز، آرماتورهای حداقل برشی از معادله‌ی زیر ، ۳۲/۸۱ میلی‌متر مربع بدست می‌آید:

$$0.35 \frac{b.s}{\phi_r} = 0.35 \frac{250 * 150}{400} = 32.81 mm^2$$

مساحت خاموت‌های مورد استفاده در این نمونه‌های آزمایشگاهی برابر ۱۵۷ میلی‌متر مربع است که از آرماتورهای حداقل بسیار بیشتر است و لذا شکست برشی در این تیرها رخ نخواهد داد و رفتار خمشی حاکم خواهد بود.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح:

برای مقاوم‌سازی تیرهای بتنی و تأمین شکل‌پذیری و مقاومت لرزه‌ای مورد نیاز در آن‌ها، روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است به طور کلی این روش‌ها به یکی از سه گروه زیر تعلق دارند:

الف-مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه با FRP^۳

FRP به یک ماده مرکب اطلاق می‌شود که از فیبر یا الیاف تقویتی و ماتریس و یا رزین از پلیمر تشکیل شده است استفاده از پلیمرهای الیافی مسلح برای تقویت تیرها و دال‌ها از سال ۱۹۸۶ میلادی و در کشور سوئیس آغاز شده است. از مزایای آن می‌توان به مواردی نظیر دوام بالا، سبک وزن بودن، مقاومت در برابر خوردگی، اجرای ساده ورقه‌ها، حمل و نقل آسان به دلیل وزن کم، توجه اقتصادی برای تقویت پروژه‌های سنگین و افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌ها و تیرها و دال‌ها اشاره نمود [۳].

ب-مقاوم‌سازی تیرهای بتن آرمه با ژاکت‌های فولادی

استفاده از ورقه‌ی فولادی که به وسیله رزین‌های مخصوصی به وجه کششی تیرهای بتنی متصل می‌شود یکی از روش‌های بسیار معمول و قابل قبول در تقویت خمشی تیرهای مسلح است، طی چندین دهه گذشته تحقیقات وسیعی در این زمینه انجام گرفته است. یکی از دلایل آن مشاهده مودهای خرابی مختلف در تحقیقات انجام گرفته است. در برخی موارد مود خرابی به صورت خمشی، در برخی برشی و

^۳ Fiber Reinforced polymer of plastic

در سایر موارد به صورت جداشدگی^۴ ورق بوده است. جداشدگی ورق فولادی ناگهانی بوده و بسیار خطرناک است. جداشدگی مانع رسیدن تیر تقویت شده به ظرفیت کامل خمشی خود گشته و بر اثر تمرکز شدید رخ می‌دهد، این پدیده بسیار پیچیده بوده و یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در مقاوم‌سازی تیرهای بتنی در خمش به این روش است. در روش‌های کلاسیک تحلیل، تیرهای بتنی تقویت شده توسط این روش معمولاً به کمک اصول سازگاری تغییر شکل‌ها و تعادل نیروها تحلیل می‌شوند. در این روش‌ها فرض می‌شود که ورق کاملاً به تیر چسبیده و اتصال کامل وجود دارد. تحلیل تیرهای تقویت شده به روش اجزا محدود و روش المان‌های فیبری پلاستیک نیز امکان‌پذیر است. در این روش‌ها کلیه اجزا از جمله رزین مدل شده و رفتار المان تقویت شده قابل پیش بینی است [۵].

ج- مقاوم سازی تیرهای بتن آرمه با ژاکت بتنی

استفاده از ژاکت بتنی در واقع افزایش ابعاد مقطع برای افزایش مقاومت خمشی و برشی تیر بتنی است. شاید بتوان گفت که این روش، قدیمی‌ترین روش مقاوم‌سازی اجزای بتنی است که هم در مورد ستون‌ها و هم تیرها به کار برده شده است. در این تکنیک با قالب‌بندی مجدد دور مقطع اصلی و آرماتورگذاری آن ابعاد مقطع افزایش می‌یابد. در زمانی که عضو بتنی در شرایط اولیه نیروهای برشی رفت و برگشتی را تحمل می‌کند. می‌توان با استفاده از روش ایجاد ژاکت بتنی در اطراف بتن قدیم، بر مدهای گسیختگی زود هنگامی که بر عملکرد عضو غلبه خواهند کرد، مقابله کرد. به وسیله ایجاد ژاکت در اطراف عضو سختی و مقاومت عضو افزایش یافته و تغییر شکل‌های وابسته به آن کاهش می‌یابد. معمولاً در اهداف اجرایی، پاسخ عضو که شامل مقاومت و تغییر مکان در شرایط نهایی و تسلیم شدگی می‌شود، از مقادیر متناظر به عضو یکپارچه با شرایط هندسی مشابه و یکسان به دست می‌آید. بنابراین می‌توان با اعمال ضریب اصلاحی که کوچکتر از یک در نظر گرفته می‌شود، مقدار مقاوم عضو ژاکت‌دار را به مقدار واقعی خود نزدیک کرد [۲].

۳-۱- برداشت‌های اولیه از تیرهای ساخته شده

مقادیر اولیه کلیه نمونه‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. مقدار بار ترک خوردگی در لحظه‌ای است که شیب منحنی بار تغییر مکان در مرحله اول تغییر می‌کند و بار جاری شدن نیز در لحظه‌ای است که شیب منحنی بار تغییر مکان در مرحله دوم تغییر می‌کند. مقادیر تغییر مکان‌های ترک خوردگی و جاری شدن نیز متناسب با همین نقاط بدست می‌آید. مقادیر بار نهایی و در نهایت تغییر مکان نهایی لحظه شکست نیز از روی منحنی قابل ثبت می‌باشند.

^۴ Debonding

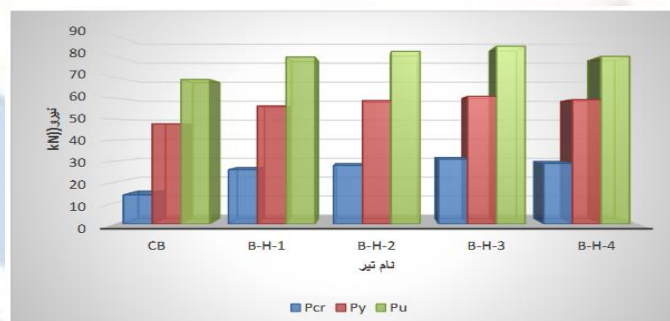
جدول ۱- برداشتهای اولیه از تیرهای ساخته شده

شماره نمونه	نام نمونه	شرح نمونه	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)
۱	CB (Control Beam)	تیر مرجع	۱۴	۱/۶۸	۴۷/۸	۴/۵۹	۶۸/۸	۹۳/۷
۲	B-H-1	مقاوم سازی با HPFRCC 1	۲۶	۱/۵۷	۵۶/۳	۵/۱۲	۷۹/۵	۱۴۷/۹
۳	B-H-2	مقاوم سازی با HPFRCC 2	۲۸	۱/۸۹	۵۸/۸	۵/۴۱	۸۲/۱	۱۵۶/۳
۴	B-H-3	مقاوم سازی با HPFRCC 3	۳۱	۱/۹۲	۶۰/۸	۵/۸	۸۴/۶	۱۶۰/۲
۵	B-H-4	مقاوم سازی با HPFRCC 4	۲۹	۱/۹	۵۹/۳	۵/۸۶	۷۹/۸	۱۵۱/۳

از مقایسه منحنی‌های بار تغییر مکان نمونه‌ها، تفاوت در خصوص متغیر تغییر شکل نهایی تیرهای مقاوم‌سازی شده به وضوح قابل رویت است. در بخش خطی اولیه نیز همانگونه که انتظار می‌رود، این رفتار بسیار به هم نزدیک بوده و اختلاف آن‌ها بسیار اندک می‌باشد. نیروهای ترک‌خوردگی، تسلیم و نهایی در کلیه تیرها و همچنین میزان رشد بارهای مذکور در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه مرجع در جدول (۲) قابل ملاحظه می‌باشد.

جدول ۲- نیروهای نمونه‌ها در تیرهای مرجع و تقویت شده

نام تیر	P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	$\frac{P_{cr}}{P_{cr}(CB)}$	$\frac{P_y}{P_y(CB)}$	$\frac{P_u}{P_u(CB)}$
CB (Control Beam)	14	47.8	68.8	1.0	1.0	1.0
B-H-1	26	56.3	79.5	1.86	1.18	1.16
B-H-2	28	58.8	82.1	2	1.23	1.19
B-H-3	31	60.8	84.6	2.21	1.27	1.23
B-H-4	29	59.3	79.8	2.07	1.24	1.16



نمودار ۱- نیروهای ترک‌خوردگی، تسلیم و نهایی تیرها

همانطور که در نمودار (۱) مشاهده می‌شود تمامی تیرهای مقاوم‌سازی شده نیروی ترک‌خوردگی بیشتری نسبت به تیر مرجع دارند که در تیر B-H-۳ به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

۳-۲- تاثیر نوع و مواد مقاوم‌سازی بر نیروهای حاصله

در کلیه نمونه‌ها مقاوم‌سازی بطور کلی باعث افزایش نیروی اولین ترک‌خوردگی می‌گردد. بدیهی است این موضوع به دلیل افزایش مقاومت کششی بتن ناشی از HPFRCC در ناحیه کششی تیر قابل توجیه می‌باشد.

میزان افزایش نیروی ترک‌خوردگی در این پژوهش از ۸۶ تا ۱۲۱ درصد می‌باشد. نیروی ترک‌خوردگی در تیرهای دارای الیاف ۳ درصد به طور محسوسی بیشتر از تیرهای الیاف ۱ درصد می‌باشد. نیروی ترک‌خوردگی در تیرهای مقاوم‌سازی شده تحت شیوه اجرای قالب بندی، بیش از تیر مرجع می‌باشد. علت این موضوع را می‌توان همگرایی بهتر بتن مورد کاربری جهت مقاوم‌سازی در ناحیه کششی تیرها تحت سیستم اجرا دانست.

براساس داده‌های جدول (۲)، نیروی جاری شدن آرماتورهای کششی، به واسطه مقاوم‌سازی به طور کلی افزایش می‌یابد، میزان این افزایش حداکثر ۲۷ درصد می‌باشد. همچنین نیروی نهایی نمونه‌ها نسبت به نمونه مرجع بین ۱۶ تا ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش در نمونه الیاف ۳ درصد و نسبت آب به سیمان کمتر می‌باشد.

مقادیر کرنش‌های فشاری در نقاط نشان داده شده در جدول (۳) ارائه شده است. با وجود این که لنگر در فاصله‌ی بین دو نیروی متمرکز ثابت است اما در هر پنج تیر، حداکثر کرنش در آرماتورهایی رخ داده که به محل اعمال بار قائم نزدیک‌ترند. البته باید توجه داشت که این موضوع به فاصله‌ی بین دو نیروی متمرکز هم بستگی دارد. در این نمونه‌ها که فاصله‌ی بین نیروها ۶۰۰ میلی‌متر است، چنین روندی مشاهده می‌شود. در خصوص تیرهای دیگر و فاصله‌ی نیروهای متمرکز مختلف، به کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی بیشتری نیاز می‌باشد. ضمناً مقادیر کرنش آرماتورها در تیرهای مقاوم‌سازی شده با HPFRCC نسبت به تیر مرجع BC بیشتر است. این امر ناشی از این است که الیاف در تیرهای مقاوم‌سازی شده سبب حفظ یکپارچگی آن می‌گردد. تغییر شکل‌های بزرگتری را تحمل می‌کند و آرماتورها نیز کرنش‌های بزرگتری را تجربه می‌کنند.

جدول ۳- کرنش‌های فشاری میلگرد و بتن در لحظه تسلیم آرماتور کششی

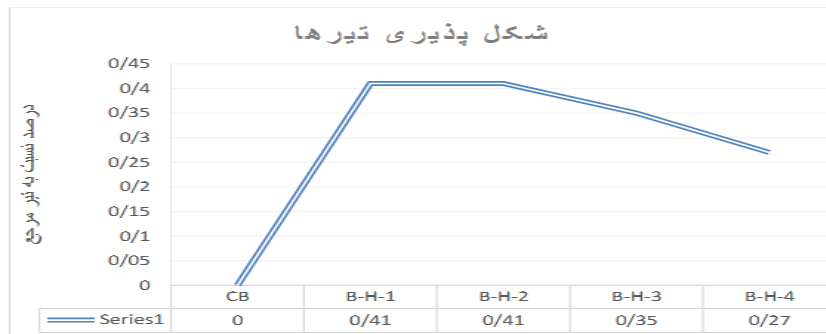
نام تیر	کرنش فشاری میلگرد ($\times 10^{-6}$)	کرنش متوسط فشاری میلگرد ($\times 10^{-6}$)	طول تار ختشی در تسلیم میلگرد کششی (mm)	کرنش فشاری بتن در تسلیم میلگرد کششی ($\times 10^{-6}$)
CB (Control Beam)	۲۱۸	۲۲۹	۵/۶۸	۴۸۸
	۲۳۹			
B-H-1	۲۸۶	۲۹۱	۶/۱۴	۶۴۹
	۲۹۷			
B-H-2	۲۸۲	۲۹۲	۶/۳۷	۶۵۱/۳
	۳۰۱			
B-H-3	۲۸۵	۲۹۴	۶/۲۲	۶۶۰/۷
	۳۰۳			
B-H-4	۲۹۲	۳۰۱	۶/۴۸	۶۶۷/۸
	۳۱۰			

۳-۳- شکل پذیری نمونه‌ها

شکل پذیری خمشی به صورت نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان جاری شدن تعریف می‌گردد. چنانچه میزان افت بار بیش از ۱۵ درصد بار نهایی باشد، مقدار در بار متناظر در نظر گرفته می‌شود. این عدد با توجه به وضعیت بتن فشاری از نظر میزان خردشدگی و کنده شدن بتن تعیین می‌شود و هر چه بتن از یکپارچگی و استحکام بیشتری برخوردار باشد، می‌توان از افت‌های بزرگتری برای این منظور استفاده نمود. البته محققان مختلف، اعداد دیگری را نیز برای این منظور پیشنهاد داده‌اند که افت ۲۰٪ (تغییر مکان متناظر با ۸۰٪ نیروی حداکثر) و گاهی ۳۰٪ (تغییر مکان متناظر با ۷۰٪ نیروی حداکثر) نیز ارائه شده است. برای بتن‌های با کرنش‌های نهایی فشاری بالاتر از میزان افت ۸۰٪ و ۷۰٪ و برای بتن‌های معمولی از تغییر مکان متناظر با ۸۵٪ درصد نیروی حداکثر، به عنوان تغییر مکان نهایی استفاده می‌شود. جدول (۴) مقادیر محاسبه شده شکل پذیری و میزان درصدهای افزایش را نشان می‌دهد.

جدول ۴- شکل پذیری تیرها

نام تیر	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$	$\frac{\mu}{\mu(CB)}$
CB (Control Beam)	۴/۵۹	۹۳/۷	۲۰/۴۱	۱/۰
B-H-1	۵/۱۲	۱۴۷/۹	۲۸/۸۹	۱/۴۱
B-H-2	۵/۴۱	۱۵۶/۳	۲۸/۸۸	۱/۴۱
B-H-3	۵/۸	۱۶۰/۲	۲۷/۶۲	۱/۳۵
B-H-4	۵/۸۳	۱۵۱/۳	۲۵/۹۵	۱/۲۷



نمودار ۲- درصد افزایش شکل پذیری تیرهای ساخته شده

از مشاهده جدول (۴) و نمودار (۲) افزایش شکل پذیری نمونه‌های مقاوم‌سازی شده به میزان حداکثری ۴۱ درصد، قابل برداشت می‌باشد؛ که این میزان درصد افزایش در نمونه‌های B-H-۱ و B-H-۲ با توجه به تفاوت نسبت آب به سیمان در این دو طرح به شکل یکسان بدست آمده است.

۳-۴- ظرفیت خمشی تیرها

توزیع تنش و کرنش در ارتفاع یک مقطع بتن مسلح با لایه‌ی HPFRCC کششی تحت خمش بصورت تئوری در جدول (۵) نشان داده شده است. توزیع کرنش در ارتفاع، خطی در نظر گرفته می‌شود. عمق بلوک تنش فشاری معادل و $(a = \beta_1 c)$ لنگر مقاوم یک مقطع بتن مسلح با لایه‌ی HPFRCC کششی (M_r) تحت خمش از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود [۴]، مقدار ارتفاع تار خنثی برابر C می‌باشد.

$$\sum F_x = 0 \implies 0.85 \cdot f'_c \cdot ab + A'_s \cdot f_y - A_s \cdot f_y - \sigma_{ot} \cdot b \cdot t_{HPFRCC} = 0$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) \cdot f_y + \sigma_{ot} \cdot b \cdot t_{HPFRCC}}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} = \beta_1 c$$

$$M_r = 0.85 \cdot f'_c \cdot ab \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + A'_s \cdot f_y (d - d') - \sigma_{ot} \cdot b \cdot t_{HPFRCC} \cdot \left[\frac{t_{HPFRCC}}{2} - (t - d)\right]$$

همانگونه که در این مجموعه معادلات مشخص است، استفاده از HPFRCC در بخش پایینی تیر بتن مسلح معمولی سبب افزایش عمق

بلوک تنش فشاری معادل $(a = \beta_1 c)$ شده که این افزایش نیز به نوبه خود سبب افزایش لنگر مقاوم مقطع می‌گردد. باید توجه

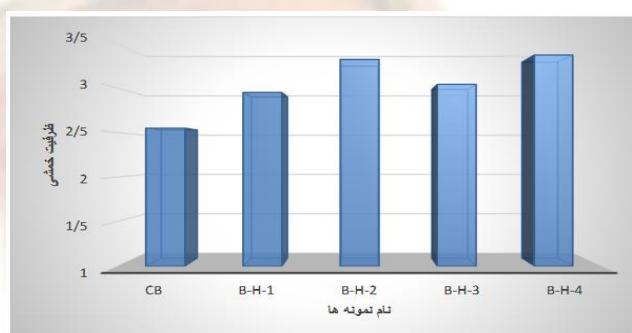
داشت که در این حالت اثر افزایشی این پارامتر از اثر کاهش عبارت؛

$$\sigma_{ot} \cdot b \cdot t_{HPFRCC} \cdot \left[\frac{t_{HPFRCC}}{2} - (t - d)\right]$$

بیشتر است [۴]. در جدول (۵) مقادیر ظرفیت خمشی آزمایشگاهی و ظرفیت خمشی تئوری محاسبه شده با استفاده از معادله نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۵- مقایسه ظرفیت خمشی آزمایشگاهی نمونه‌ها

نام تیر	M_{exp}	$\frac{M_{exp}}{M_{exp}(BC)}$
CB (Control Beam)	2.55	1
B-H-1	2.95	1.16
B-H-2	3.32	1.3
B-H-3	3.04	1.19
B-H-4	3.37	1.32



نمودار ۳- مقایسه ظرفیت خمشی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه مرجع

۳-۵- میزان جذب انرژی نمونه‌ها

میزان جذب انرژی هر نمونه برابر سطح زیر منحنی تانگنطه شکست نمونه می‌باشد که قدرت استهلاک انرژی توسط هر نمونه را نشان می‌دهد. جدول (۶) درصد تغییر در میزان انرژی جذب شده نمونه‌ها ناشی از مقاوم‌سازی را نشان می‌دهد.

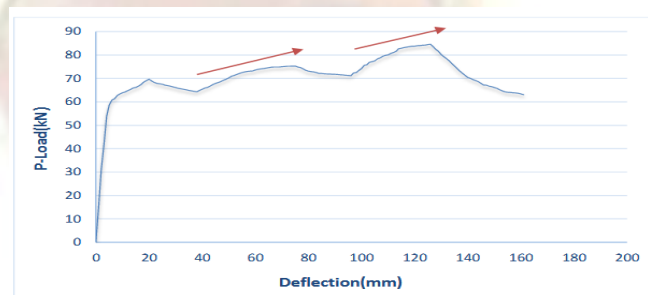
جدول ۶- درصد تغییر در میزان انرژی جذب شده نمونه‌ها ناشی از مقاوم‌سازی

نام تیر	میزان انرژی W (سطح زیر نمودار) kN-mm	$\frac{W}{W(BC)}$
CB (Control Beam)	5862	1
B-H-1	10895	1.85
B-H-2	10547	1.8
B-H-3	11267	1.92
B-H-4	11354	1.94

از ملاحظه جدول (۶)، افزایش جذب انرژی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در قیاس با نمونه مرجع به وضوح قابل دریافت است تا آنجا که میزان این افزایش در برخی نمونه‌ها تا حدود دو برابر انرژی نمونه مرجع می‌باشد و این افزایش انرژی در نمونه‌های دارای ۳٪ الیاف بیشتر از نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با ۱٪ الیاف می‌باشد.

۳-۶- بررسی پدیده سخت‌شوندگی رفتار نمونه‌ها

با توجه به منحنی‌های حاصله، اثر پدیده سخت‌شوندگی ناشی از پل زدن الیاف‌ها دیده می‌شود. نمودار (۴) اثر این پدیده را در نمونه‌های ۳٪ الیاف B-H-۳، B-H-۴ نشان می‌دهد. تغییر شیب بین نقطه جاری شدن اولیه و نقطه بار نهایی نشان از بروز سخت‌شوندگی در تیر بدلیل وجود الیاف می‌باشد.



نمودار ۴- اثر پدیده سخت‌شوندگی ناشی از پل زدن الیافها را در نمونه‌های ۳٪ الیاف B-H-۳، B-H-۴

با توجه به نمودار (۴) دو مرحله پدیده سخت‌شوندگی در نمونه مشاهده می‌شود که اثر الیاف، تاثیر اصلی بر این پدیده دارد. همچنین از توجه به مباحث انرژی و سخت‌شوندگی این نکته قابل دریافت است که هر نمونه‌ای که رفتار سخت‌شونده بیشتری دارا می‌باشد، جذب انرژی آن نیز بالاتر است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

کاربرد موفقیت آمیز مصالح HPFRCC در سازه‌ها که نتیجه منحنی جالب توجه تنش-کرنش آن به ویژه تحت کشش است، باعث تمرکز بسیاری از تحقیقات بر روی آن شده است. رفتار سخت‌شوندگی کرنش تحت کشش که با سایر کامپوزیت‌های سیمانی و بتنی متفاوت است، از HPFRCC یک مصالح توانمند با قابلیت جذب انرژی بالا و تشکیل ترک‌های زیاد ساخته است.

در تیر بتنی مرجع CB، ترکها با نرم‌شوندگی منحنی تنش-کرنش کششی همراه شده و ظرفیت باربری سازه با افزایش ترکها کاهش می‌یابد. لذا تکیه بر آرماتور برای حفظ سازه ضروری است. اما در تیرهای با لایه تحتانی HPFRCC میکروتترکها باعث ورود مصالح به مرحله سخت‌شوندگی شده و ظرفیت باربری بالا می‌رود که این افزایش در نمونه‌های با الیاف بیشتر محسوس تر می‌باشد.

در تیر بتن مسلح مرجع CB، جاری شدن فولاد در نقاطی متمرکز می‌شود که آرماتور ترک‌های بتن را قطع کند و بخاطر عدم تطابق تغییر شکل بین بتن و فولاد، انهدام ایجاد می‌شود. در حالی که در تیرهای مقاوم‌سازی شده با HPFRCC، جاری شدن فولاد در طول و سطح بزرگتری اتفاق می‌افتد و از فولاد استفاده موثرتر و بهتری به عمل می‌آید. در نمونه‌های با الیاف ۳٪ تا حدود کمی این گسترش محسوس‌تر می‌باشد.

بیشترین شکل‌پذیری در تیر مقاوم‌سازی شده با مصالح ۱-۲ HPFRCC (نمونه B-H-۱ و B-H-۲)، با ۴۱٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع، اتفاق می‌افتد که ناشی از کرنش کششی نهایی بالاتر این مصالح توانمند نسبت به بتن معمولی و مطلوبیت سیستم اجرا می‌باشد.

افزایش شکل‌پذیری در تیرهای دارای ۱٪ الیاف از تیرهای ۳٪ الیاف می‌باشد.

با افزایش آرماتور کششی، ضریب شکل‌پذیری تیرها کاهش می‌یابد، لذا با افزایش آرماتور کششی تیرها (قبل از مقاوم‌سازی)، اثربخشی تقویت به روش این تحقیق کاهش می‌یابد. از همین نکته می‌توان استنباط نمود، با افزایش مقاومت کششی HPFRCC، ضریب شکل‌پذیری تیرها کاهش می‌یابد، چرا که مقاومت کششی بیشتر HPFRCC همانند آرماتور مازاد عمل می‌نماید و سبب کاهش ضریب شکل‌پذیری می‌گردد.

به سبب رفتار سخت‌شوندگی کرنش HPFRCC، عمق تار خنثی مقطع و در نتیجه متغیر (a) و به تبع آن لنگر مقاوم تیر مقاوم سازی شده با HPFRCC نسبت به تیر بتن معمولی CB افزایش می‌یابد. مقادیر ظرفیت خمشی بر اساس آزمایشگاهی در خصوص تیر بتن مسلح تقویت شده با HPFRCC نسبت به تیر معمولی برای ۱٪ الیاف حدود ۲۳٪ و برای ۳٪ الیاف حدود ۲۶٪ می‌باشد. جذب انرژی در نمونه‌های ۱٪ الیاف کمتر از نمونه‌های ۳٪ الیاف می‌باشد.

۵- پیشنهادات

۱. بررسی رفتار تیرهای مقاوم‌سازی شده با HPFRCC تحت بارگذاری‌های متمرکز، گسترده، رفت و برگشتی.
۲. بررسی خصوصیات مفاصل پلاستیک در تیرهای مقاوم‌سازی شده با HPFRCC تحت بارگذاری‌های متمرکز، دونقطه‌ای و گسترده.
۳. بررسی عواملی نظیر تاثیر ضخامت لایه مقاوم‌سازی شده با HPFRCC، میزان فولاد کششی و فشاری، میزان مقاومت کششی و فشاری بتن و ... بر کلیه پارامترها.
۴. تاثیر مقاوم‌سازی با لایه HPFRCC در محیط‌های خورنده و بررسی دوام.

مراجع و منابع

۱. Canbolat B. A. parra-Montesions. G.J and wight J.K ۲۰۰۵ “experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber reinforced cement composite coupling beams” structural journal ۱۰۲(۱), ۱۵۹-۱۶۶.
۲. Ghassan K.A.I. Char and Georgy E. lamb “Design of Fiber-Reinforced Polymer Materials for Seismic Rehabilitation of infilled Concrete structures “-December ۲۰۰۲- US Army Corps of Engineering –Research and Development center Irancivilcenter. Com- the Construction industry portal of iran copuright ۲۰۰۳-۲۰۰۷ iran civil Center, All rights reserved worldwide.
۳. Jong Wha Bai “Seismic retrofit for reinforced concrete building structures” consequencebased Engineering (CEB)-institute final report- Texas University- August ۲۰۰۳.
۴. Hemati, A. Kheyroodin .A, Sharbtadar. M,k, ۲۰۱۳ “plastic hing rotation capacity of reinforced HPFRCC beam” journal of structural engineering ASCE.
۵. Tetsuo yamakawa, mehdi banazadeh, shogo fujikawa” Emergency retrofit of Damaged RC columns right after seismic attack using pre-Tensioned aramid Fiber Belts” ۱st conference on Application of FRP Composite in construction and Rehabilitation of Structures May ۴, ۲۰۰۴, Tehran, iran.