



بررسی تاثیر HPFRCC در ظرفیت خمشی و شکل پذیری تیرهای بتن مسلح

محمد رضا اسدی^{*۱}

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

Asadi5671@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۲۷

چکیده

با توجه به گسترش روز افزون صنعت ساختمان در ابعاد مختلف، استفاده از ایده های نو و جدید در کیفیت و نحوه اجرا، انتخاب مصالح و ... از ملزومات این پیشرفت ها می باشد. لذا براساس نیاز کشور به توسعه روش های نوین با استفاده از مصالح توانمند، استفاده از بتن مسلح به الیاف HPFRCC در جهت مقاوم سازی، مورد توجه واقع شده است. هر چند HPFRCC دارای ویژگیهایی است که در بتن معمولی و FRC وجود ندارد اما به علت مسائل اقتصادی و اجرایی، کاربرد آن ها بیشتر به امور تحقیقاتی و کاربردهای خاص محدود گشته است. این تحقیق با رویکرد آزمایشگاهی انجام گرفته که طی آن پنج تیر بتن مسلح کامل تحت آزمایش بارگذاری چهار نقطه ای قرار می گیرند. یکی از تیرها به عنوان نمونه مرجع انتخاب شده و چهار تیر دیگر در سطوح پایینی تیرهای بتنی بصورت قالب بندی شکل با لایه ای از مصالح HPFRCC مقاوم سازی می شوند و رفتار خمشی و شکل پذیری تیرها باهم مقایسه می شوند. بیشترین شکل پذیری در تیر مقاوم سازی شده با مصالح ۱-۲ HPFRCC نمونه ۱ (B-H-۱) و ۲ (B-H-۲) با ۴۱٪ افزایش نسبت به نمونه مرجع، اتفاق می افتد که ناشی از کرنش کششی نهایی بالاتر این مصالح توانمند نسبت به بتن معمولی و مطلوبیت سیستم اجرا میباشد و در نمونه های دارای ۱٪ الیاف به طور متوسط ۲۳٪ افزایش ظرفیت خمشی و در نمونه های ۳٪ الیاف به طور متوسط ۲۶٪ افزایش ظرفیت خمشی حاصل می گردد.

کلمات کلیدی: HPFRCC، بتن، ظرفیت خمشی، شکل پذیری

۱- مقدمه

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 HPFRCC در جهت مقاوم‌سازی، مورد توجه واقع شده 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-کرنش، 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 پایه‌ی روابط حاکم بر رفتار مصالح انجام می‌گیرد. بتن یکی از مهم‌ترین مصالح ساختمانی است که استفاده از آن در همه کشورهای دنیا رو به افزایش است. دلایل این امر در دسترس بودن مصالح، ارزانی نسبی آن‌ها، تولید نسبتاً آسان و گستره وسیع استفاده‌ی آن در ساختمان‌ها و سازه‌ها می‌باشد. علاوه بر آن، از حدود سی سال قبل مفهومی تحت عنوان بتن توانمند نیز مطرح شده است.

در حال حاضر برای بهسازی خمشی تیرهای بتنی با استفاده از FRP چندین دستورالعمل وجود دارد. با توجه به این دستورالعمل‌ها توجه به دو نکته ضروری به نظر می‌رسد: ۱- در فرایندهای طراحی براساس مقاومت پیشنهاد می‌شود، کلیه پارامترهای اثرگذار لحاظ شوند، برای مثال همان طور که در ادامه بیشتر توضیح داده خواهد شد، پارامترهایی مانند درصد آرماتور خمشی موجود در تیر بر میزان اثر بخشی روش تاثیر زیادی دارد. در حالی که چنین پارامتری در دستورالعمل‌ها دیده نمی‌شود که ناشی از کمبود اطلاعات حین تدوین آن‌ها می‌باشد. لذا لازم است که مطالعات جامع‌تری به منظور شناخت هر چه بیشتر پارامترهای اثرگذار انجام پذیرد و در روابط وارد شوند. ۲- در دستورالعمل‌های پیشنهادی تقویت غالباً از نقطه نظر مقاومتی مورد توجه قرار گرفته است، به این مفهوم که فرآیندهای طراحی بیشتر میزان افزایش مقاومت‌های خمشی و برش را در خود دارند. در حالی که می‌دانیم دیدگاه صرف مقاومتی برای اهداف طراحی در برابر زلزله به تنهایی کافی نبوده و آنچه حاکم بر عملکرد المان و نهایتاً یک سازه است، شکل‌پذیری و رفتار المان تحت بارهای دینامیکی می‌باشد. گرچه سختی و عدم افت مقاومتی نیز از پارامترهایی هستند که همراه شکل‌پذیری بایستی مطرح شوند. در این صورت لازم است که سختی رفتاری المان تحت بارهای وارده به صورت کالیبره شده‌ای تعیین گردیده تا بتوان از آن در تحلیل‌های غیر خطی مانند تحلیل بار افزودن (پوش‌آور) استفاده نمود. این منحنی‌ها خواص هیستریک المان را نیز در خود دارند. در این تحقیق بنا بر آن است که تاثیر HPFRCC در ظرفیت خمشی و شکل‌پذیری تیرهای با هم مقایسه می‌شوند.

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 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 و رفتار خمشی و شکل‌پذیری تیرها باهم مقایسه می‌شوند.

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. خاموت‌گذاری به شکلی در طول تیرها انجام شد که شکست برشی حاکم نبوده و انهدام همگی 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 ۳۰/۵٪ آرماتور حداکثر در تیرهای بتن مسلح معمولی بود تا با توجه به وجود الیاف در لایه تحتانی که شبیه فولاد مازاد عمل می‌کنند، مقطع به حالت پرفولاد نزدیک نگردد و انهدام خمشی حاکم باشد و همچنین با ضعف خمشی تیر تاثیر مقاوم‌سازی 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:

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

و ساخت خاموت‌های مورد استفاده در این نمونه‌های آزمایشگاهی برابر ۱۵۷ میلی‌متر مربع است که از آرماتورهای حداقل بسیار بیشتر

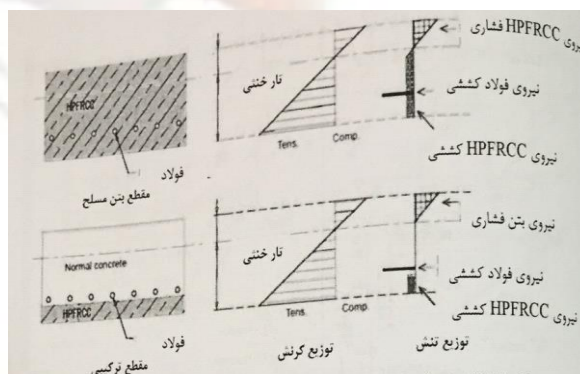
است و لذا شکست برشی در این تیرها رخ نخواهد داد و رفتار خمشی حاکم خواهد بود.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

۳-۱- مشخصات خمشی

رفتار خمشی HPFRCC متاثر از شکل‌پذیری کششی آن است. در این خصوص بررسی‌های فراوانی توسط مالچ، لی، ونگ، روکوگو و کونیدا انجام شده است [۷،۵،۲]. بر اثر خمش، میکروتَرَک‌های چندگانه در انتهای تیر شکل می‌گیرند و اجازه تحمل انحنای بزرگ را به آن می‌دهند. مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی تیر به ۱۰ تا ۱۵ مگاپاسکال می‌رسد و تغییر شکل‌های بزرگ به سادگی قابل دستیابی است. این موارد توسط ونگ، لی و استانگ بررسی شده‌اند [۷،۴،۲].

از آنجایی که مصالح HPFRCC دارای ویژگی تشکیل ترک‌های چندگانه و رفتار سخت شوندگی کرنش پس از ترک خوردگی اولیه، تحت نیروی کششی می‌باشند، لذا صرف نظر از مقاومت کششی و حذف ناحیه ترک خورده تیر در مورد این مصالح، به کار نمی‌رود. شکل (۱) منحنی‌های توزیع تنش و کرنش را در دو مقطع نشان می‌دهد. مقطع اول کاملاً از HPFRCC ساخته شده است و لذا مصالح در قسمت کششی نیز تنش تحمل می‌کنند. اما در مقطع دوم که ترکیبی از بتن معمولی و HPFRCC است، بخش بتنی، تنش کششی را تحمل نمی‌کند و تنها قسمت کوچکی که از مصالح کامپوزیتی ساخته شده، تحت تنش قرار می‌گیرد.



شکل ۱- نمودارهای توزیع تنش و کرنش در تیر با بتن معمولی و HPFRCC

اگر یک مقطع HPFRCC که با میلگردهای فولادی نیز مسلح شده است، تحت اثر خمش قرار گیرد، مطابق شکل (۲) می‌تواند رفتاری در ۵ مرحله زیر از خود نشان دهد:

مرحله اول: بخش‌های کششی و فشاری HPFRCC و میلگردهای فولادی کششی در حالت خطی هستند.

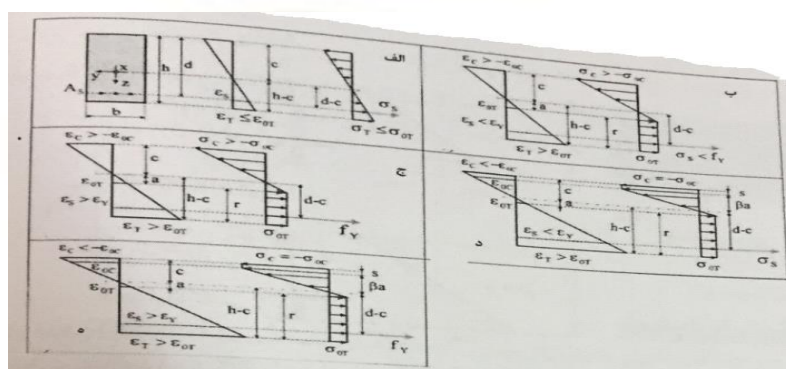
مرحله دوم: بخش کششی مصالح HPFRCC وارد فاز پلاستیک می‌شود. اما بخش فشاری آن و میلگردهای فولادی کششی در حالت خطی هستند.

مرحله سوم: بخش کششی مصالح HPFRCC و میلگردهای فولادی کششی وارد فاز پلاستیک می‌شوند و HPFRCC فشاری، همچنان خطی است.

مرحله چهارم: بخش‌های کششی و فشاری HPFRCC وارد حالت پلاستیک می‌شوند و میلگردهای فولادی کششی در حالت خطی هستند.

مرحله پنجم: بخش‌های کششی و فشاری HPFRCC و میلگردهای فولادی کششی وارد حالت پلاستیک می‌گردند.

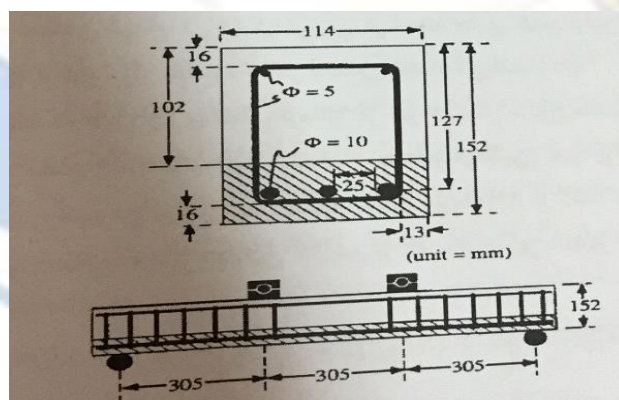
این مراحل به ترتیب و با افزایش مقدار گشتاور خمشی اتفاق می‌افتند. البته در مراحل سوم و چهارم، یکی از آن‌ها رخ می‌دهد [۶].



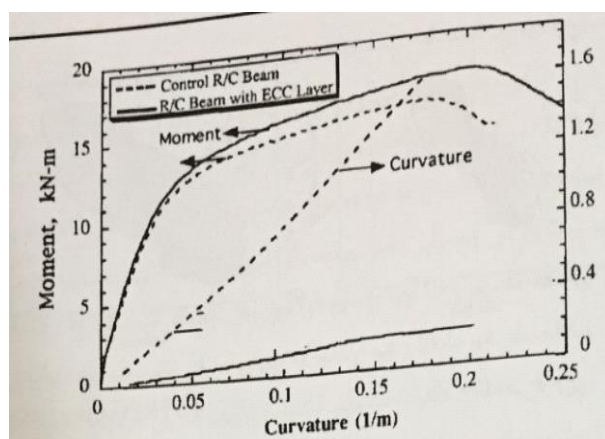
شکل ۲- مراحل مختلف رفتاری مصالح HPFRCC تحت خمش

۳-۲-۳- اعضای خمشی HPFRCC

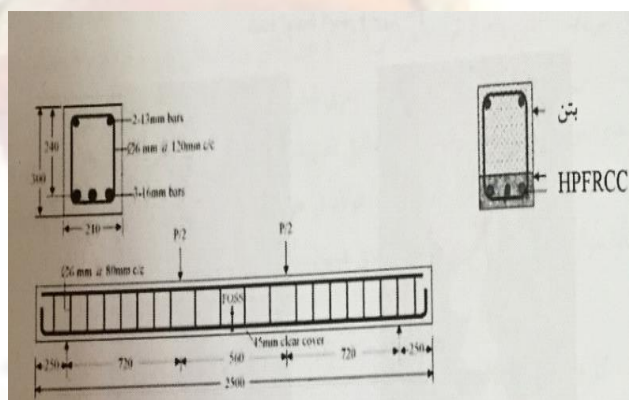
میشرا و لی، یک تیر بتن مسلح و یک تیر بتن مسلح با لایه پایینی HPFRCC را مطابق شکل (۳) تحت آزمایش بارگذاری دو نقطه‌ای قرار دادند و الگوهای ترک خوردگی آن‌ها را با یکدیگر مقایسه نمودند. منحنی ممان انحنای این تیرها نیز در شکل (۴) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در تیر ترکیبی تفاوت چندانی در لنگر نهایی ایجاد نمی‌شود و عمده تمرکز این محققان بر روی مبحث دوام و عرض ترک‌های این تیرها بوده است [۳]. آزمایش مشابهی نیز توسط مالچ و همکاران مطابق شکل (۵) انجام گرفت و بر بحث دوام متمرکز بود [۳].



شکل ۳- ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری تیرهای مورد آزمایش توسط میشرا و لی



شکل ۴- منحنی لنگر - انحنای تیرهای مورد آزمایش توسط میسرا و لی



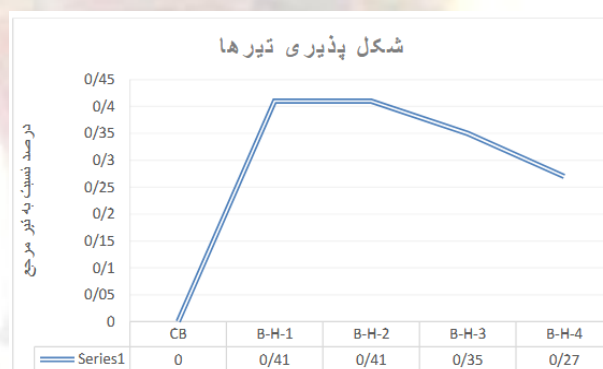
شکل ۵- ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری تیرهای مورد آزمایش توسط مالج و همکاران

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 کاهش 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٪ نیروی حداکثر، به عنوان تغییر مکان نهایی استفاده می‌شود. جدول (۱) مقادیر محاسبه شده شکل‌پذیری و میزان درصدهای افزایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱؛ 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 |

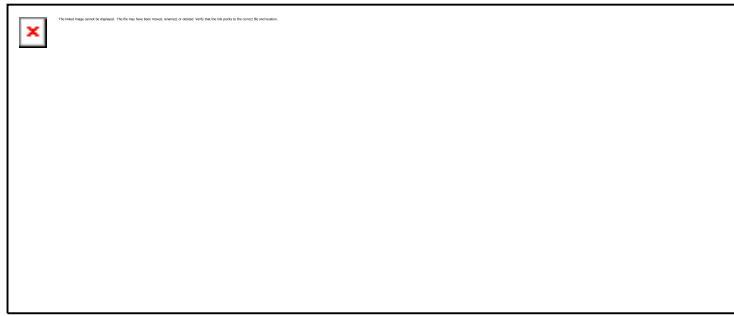


شکل ۶- درصد افزایش شکل پذیری تیرهای ساخته شده

از مشاهده جدول (۱) و شکل (۶) افزایش شکل پذیری نمونه‌های مقاوم سازی شده به میزان حداکثری ۴۱ درصد، قابل برداشت می‌باشد. که این میزان درصد افزایش در نمونه های 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 HPRFRC کششی تحت خمش بصورت تئوری در شکل (۷) نشان داده شده است. توزیع کرنش در ارتفاع، خطی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۷- توزیع تنش و کرنش در ارتفاع یک مقطع بتن مسلح با لایه HPFRCC کششی

عمق بلوک تنش فشاری معادل $(\alpha = \beta_1 c)$ و لنگر مقاوم یک مقطع بتن مسلح با لایه HPFRCC کششی (M_r) تحت خمش از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود، مقدار ارتفاع تار خنثی برابر C می‌باشد:

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

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

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

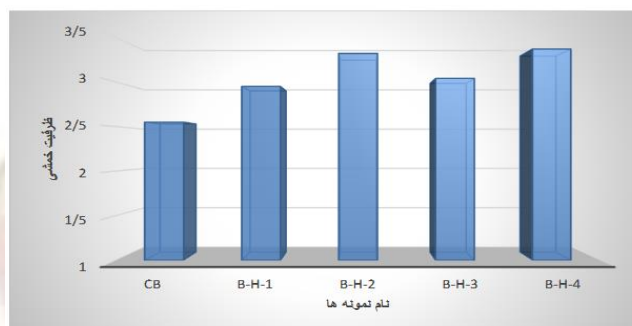
همانگونه که در این مجموعه معادلات مشخص است، استفاده از HPFRCC در بخش پایینی تیر بتن مسلح معمولی سبب افزایش عمق بلوک تنش فشاری معادل $(\alpha = \beta_1 c)$ زایش نیز به نوبه خود سبب افزایش لنگر مقاوم مقطع می‌گردد. باید توجه داشت که در این حالت اثر افزایشی این پارامتر از اثر کاهش عبارت:

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

بیشتر است [۴]. در جدول (۲) مقادیر ظرفیت خمشی آزمایشگاهی و ظرفیت خمشی تئوری محاسبه شده با استفاده از معادله نشان داده شده و با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۲؛ مقایسه ظرفیت خمشی آزمایشگاهی نمونه‌ها

| نام تیر | M_{exp} | $\frac{M_{exp}}{M_{exp}(CB)}$ |
|----------------------|-----------|-------------------------------|
| 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 |



شکل ۸- مقایسه ظرفیت خمشی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه مرجع

در نمونه‌های دارای ۱٪ الیاف به طور متوسط ۲۳٪ افزایش ظرفیت خمشی و در نمونه‌های ۳٪ الیاف به طور متوسط ۲۶٪ افزایش

ظرفیت خمشی حاصل می‌گردد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تشکیل ترک‌های ریز چندگانه مشخصه اصلی تامین شکل‌پذیری مصالح HPFRCC است. مطالعات یانگ و همکاران نشان داد که

بین کرنش مربوط به تشکیل اولین ترک حدود ۱۰٪ و کرنش ۱٪، بازشدگی میکروترک‌های اولیه افزایش یافته و از صفر به حدود ۶۰

میکرومتر می‌رسد. بر اثر بارگذاری بیشتر از کرنش ۱٪، ترک‌های چندگانه شکل می‌گیرد اما میزان بازشدگی ترک‌ها از مقدار ثابت ۶۰

میکرومتر بیشتر نمی‌شود. برخلاف بتن و FRC، عرض ترک پایدار یک ویژگی ذاتی HPFRCC است که مستقل از نوع بارگذاری، ابعاد

سازه، هندسه سازه، تعداد و نوع آرماتورهای مسلح کننده است. شکل‌گیری این ترک‌های با عرض پایدار تا زمان موضعی شدن ترک‌ها و

تشکیل صفحه شکست ادامه دارد [۹،۸].

بیشترین شکل پذیری در تیر مقاوم سازی شده با مصالح ۱-۲ HPFRCC نمونه (B-H-۱ و B-H-۲) با ۴۱ درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع، اتفاق می افتد که ناشی از کرنش کششی نهایی بالاتر این مصالح توانمند نسبت به بتن معمولی و مطلوبیت سیستم اجرا می باشد.

افزایش شکل پذیری در تیرهای دارای ۱٪ الیاف از تیرهای ۳٪ الیاف می باشد.

با افزایش آرماتور کششی، ضریب شکل پذیری تیرها کاهش می یابد، لذا با افزایش آرماتور کششی تیرها (قبل از مقاوم سازی)، اثربخشی تقویت به روش این تحقیق کاهش می یابد. از همین نکته می توان استنباط نمود، با افزایش مقاومت کششی HPFRCC، ضریب شکل پذیری تیرها کاهش می یابد، چرا که مقاومت کششی بیشتر HPFRCC همانند آرماتور مازاد عمل می نماید و سبب کاهش ضریب شکل پذیری می گردد.

به سبب رفتار سخت شونده گی 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 می یابد. 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 ۳٪ الیاف حدود ۲۶٪ می باشد.

۵-پیشنهادهات

۱. بررسی رفتار تیرهای مقاوم سازی شده با HPFRCC تحت بارگذاری های متمرکز، گسترده، رفت و برگشی.
۲. بررسی خصوصیات مفاصل پلاستیک در تیرهای مقاوم سازی شده با HPFRCC تحت بارگذاری های متمرکز، دونقطه ای و گسترده.
۳. بررسی عواملی نظیر تاثیر ضخامت لایه مقاوم سازی شده با HPFRCC، میزان فولاد کششی و فشاری، میزان مقاومت کششی و فشاری بتن و ... بر کلیه پارامترها.
۴. تاثیر مقاوم سازی با لایه HPFRCC در محیط های خورنده و بررسی دوام.

مراجع و منابع

۱. Giorgio monti "seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP" university spienza roma, Italy.
۲. Kunieda, M. and rokugo K. ۲۰۰۶ "measurement of crack opening behavior within Ecc under bending moment" in proc. Intl RILEM workshop HPFRCC in structural applications. EDs fischer G and V.C Li ۳۱۳-۳۲۲.
۳. Mishra. D and li V.C ۱۹۹۵ "performance of ductile plastic hinge designed with ECC" UMCEE rep. no ۹۵۰۶ university of Michigan.

۴. Stang H. and Li V.C ۲۰۰۴ “classification of fiber reinforced cementitious materials for structural applications “in fiber-Reinforced concrets, proc BEFIB ۲۰۰۴ ed . m . di prisco R. felicetti and G.A plizzari ۱۹۷-۲۱۸.
۵. Suwannakarn. S.W. ۲۰۰۹ “post-cracking characteristics of high performance fiber reinforced cementitious composites” PhD dissertation, Michigan university.
۶. Szerszen M.M szwed A. and Li V.C ۲۰۰۶ “flexural response of reinforced beam wigh high ductility concrete material “ in proc ont symp. “Brittle matrix composites ۸.A.M brandt V.C. Li and I.H marshall eds. ۲۶۳-۲۷۴.
۷. Wang. S. ۲۰۰۵ “micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites” PhD thesis, unirersity of Michigan.
۸. Wnag. S. ۲۰۰۵ “michromechanics based matrix design for engineered cementitious composites” PhD dissertation , Michigan University.
۹. Yang. E.H yang Y. and Li V.C ۲۰۰۷ “use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness” ACI materials journal.

