



### مقایسه نیروی ترک خوردگی در تیرهای مقاوم سازی شده با HPFRCC نسبت به تیر نمونه مرجع

علی قربانی<sup>۱\*</sup>، امین قربانی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

[ghorbani@pnu.ac.ir](mailto:ghorbani@pnu.ac.ir)

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران

[aghorbani@pnu.ac.ir](mailto:aghorbani@pnu.ac.ir)

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۰۳، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۳۰

#### چکیده

تشکیل ترک‌های ریز چندگانه مشخصه اصلی تامین شکل پذیری مصالح HPFRCC است. در این تحقیق نیروی ترک خوردگی در تیرهای مقاوم سازی شده با HPFRCC نسبت به تیر مرجع مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا یک تیر مرجع و چهار تیر مقاوم سازی شده با یک لایه نازک HPFRCC در قسمت تحتانی تیرها، تحت آزمایش چهار نقطه‌ای خمش خالص قرار گرفته و در نهایت تاثیر مقاوم سازی بر نیروهای حاصله مورد بررسی و مقایسه واقع می‌گردد. در تیر بتنی مرجع، ترک‌ها با نرم‌شوندگی منحنی تنش-کرنش کششی همراه شده و ظرفیت باربری سازه با افزایش ترک‌ها کاهش می‌یابد. لذا تکیه بر آرمان‌تور برای حفظ سازه ضروری است. اما در تیرهای با لایه تحتانی HPFRCC میکروتکرک‌ها باعث ورود مصالح به مرحله سخت‌شوندگی شده و ظرفیت باربری بالا می‌رود. که این افزایش در نمونه‌های با الیاف بیشتر محسوس‌تر می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مقاوم سازی، بتن، ترک خوردگی، HPFRCC

## ۱- مقدمه

امروزه بحث مقاوم‌سازی لرزه‌های سازه‌ها و ساختمان‌های موجود به یکی از محوری‌ترین مسائل موجود در مهندسی زلزله مبدل شده است. غالباً ساختمان‌هایی که نیاز به مقاوم‌سازی در برابر زلزله دارند در دو گروه عمده قرار می‌گیرند. گروه اول ساختمان‌هایی هستند که قبل از تدوین هر گونه ضوابط لرزه‌ای و یا پس از تدوین آن‌ها اما بدون رعایت آن ضوابط طراحی و ساخته شده‌اند و بهره‌برداری از آن‌ها در حال حاضر نیز ادامه دارد. چنین ساختمان‌هایی در بیشتر موارد صرفاً برای بارهای ثقلی طرح شده و فاقد هر گونه پایداری لرزه‌ای به ویژه در برابر حرکات قوی و شدید زمین می‌باشند. در گروه دوم ساختمان‌هایی قرار می‌گیرند که مطابق ضوابط لرزه‌ای شخصی طراحی و اجرا شده‌اند و اکنون به علت تغییر آن ضوابط و احیاناً افزایش سطح نیروهای طرح و یا تغییر در ضوابط شکل‌پذیری نیاز به بهسازی دارند. در کشور ما به دلایل مختلف و به ویژه به علت جنبه‌های اقتصادی مسئله، در حال حاضر تمرکز بر روی مقاوم‌سازی ساختمان‌های گروه اول می‌باشد. مقاوم‌سازی سازه‌ها در دو سطح کلی<sup>۱</sup> و محلی<sup>۲</sup> می‌تواند انجام‌پذیرد. در مقاوم‌سازی کلی، کل سیستم ساز تقویت و بهسازی می‌شود در روش‌های محلی بهسازی لرزه‌ای، برخی از المان‌ها بهسازی می‌شوند. به عبارت دیگر اولین روش مقاوم‌سازی سطحی یا عمومی ساختمان که شامل اصطلاحات کلی و افزایش مقاومت عمومی ساختمان با افزودن عناصر مقاوم سازه‌ای مانند اضافه کردن دیوارهای سازه‌ای و بادبندهای فولادی و جداکننده‌های پایه است. دومین روش، مقاوم‌سازی سطحی یا محلی اعضا است. در این روش اعضای که ظرفیت شکل‌پذیری ناکافی دارند ظرفیتشان به منظور بر آورده کردن حالات حدی افزایش می‌یابد و مقاوم‌سازی سطح عضو شامل روش‌هایی مبتنی بر افزودن ورق و نوارهای تقویتی از قبیل اضافه کردن بتن و فولاد و یا رزوه پوش کردن عضو سازه‌ای با الیاف پلیمری مرکب به منظور افزایش مقاومت برشی و خمشی و یا فشاری عضو بتنی است.

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. این مصالح نوین، بتنی است که خصوصیتی از آن برای کاربردها و محیط‌های خاصی توسعه یافته است. این خصوصیات شامل مقاومت، دوام، مقاومت در برابر عوامل مهاجم خارجی، سخت‌شوندگی کرنش بالا، نمای ظاهری مناسب و ... می‌باشد. یکی از معایب بتن، شکنندگی آن مقاومت کششی پایین و مقاومت کم در برابر بازشدگی و گسترش ترک‌ها است. در گسترش و توسعه مصالح شبیه بتن، الیاف مسلح کننده نقش مهمی داشته‌اند.

<sup>۱</sup> Global  
<sup>۲</sup> Local

در سال ۱۹۸۹ کرنچل و استانگ با کاربرد مناسب الیاف به هم پیوسته به شکل پذیری کششی ۱۰۰ برابر نسبت به بتن معمولی دست یافتند [۲]. نامان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ مصالحی را معرفی نمودند که جدا از بتن‌های الیافی<sup>۳</sup> طبقه‌بندی می‌شدند و شامل یک بخش سخت‌شوندگی کرنش کششی در منحنی تنش - کرنش کششی خود بودند و در رده مصالح توانمند با نام کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند<sup>۴</sup> قرار گرفتند [۳، ۱]. بیشتر اعضای ساخته شده با این مصالح، شامل ملات سیمانی بدون درشت دانه هستند و به همین دلیل ملات یا خمیر سیمانی مسلح شده توسط الیاف نام گرفته‌اند. در طول رفتار نرم شوندگی، تغییر شکل‌ها به یک صفحه شکست سازه ای متمرکز می‌شود، اما در طول رفتار سخت‌شوندگی، تغییر شکل سازه متشکل از باز شدگی ترک‌های ریز چندگانه و کشیدگی الاستیک مصالح بین این ترک‌ها است.

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 ۰/۰۱٪) و کرنش ۱٪، بازشدگی میکروتورک‌های 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 مسلح‌کننده است. شکل‌گیری این ترک‌های با عرض پایدار تا زمان موضعی شدن ترک‌ها و تشکیل صفحه شکست ادامه دارد [۵، ۴].

در این تحقیق نیروی ترک‌خوردگی در تیرهای مقاوم‌سازی شده با HPFRCC نسبت به تیر مرجع مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا یک تیر مرجع و چهار تیر مقاوم‌سازی شده با یک لایه نازک HPFRCC در قسمت تحتانی تیرها، تحت آزمایش چهار نقطه‌ای خمش خالص قرار گرفته و در نهایت تاثیر مقاوم‌سازی بر نیروهای حاصله مورد بررسی و مقایسه واقع می‌گردد. در تیر بتنی مرجع، 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 میکروتورک‌ها باعث ورود مصالح به مرحله سخت‌شوندگی شده و ظرفیت باربری بالا می‌رود. که این افزایش در نمونه‌های با الیاف بیشتر محسوس تر می‌باشد.

<sup>۳</sup>FRC  
<sup>۴</sup>HPFRCC

## 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 به صورت قالب‌بندی شکل با لایه ای از مصالح HPFRCC مقاوم‌سازی می‌شوند. الگوهای ترک‌خوردگی در این نمونه‌ها باهم مقایسه می‌شوند.

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 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 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.

## ۳- تجزیه و تحلیل

### ۳-۱- نحوه نامگذاری تیرها

پنج تیر با ابعاد مشابه و جزئیات آرماتورگذاری یکسان که یکی از آن‌ها به عنوان نمونه مرجع، فاقد مقاوم‌سازی بوده و چهار تیر دیگر با لایه‌ای از HPFRCC مقاوم‌سازی شده‌اند، تحت آزمایش بارگذاری چهار نقطه‌ای قرار گرفتند. طول تیرها ۲۱۰۰ میلی‌متر و فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه مفصلی آن‌ها ۱۸۰۰ میلی‌متر بود. فاصله‌ی بین دو نیروی متمرکز از هم برابر با ۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. عرض و ارتفاع مقطع این تیرها ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت پوشش آن‌ها نیز حدود ۲۰ میلی‌متر انتخاب گردید. دو کرنش‌سنج بر روی آرماتورهای فشاری تیرها نصب می‌گردد.

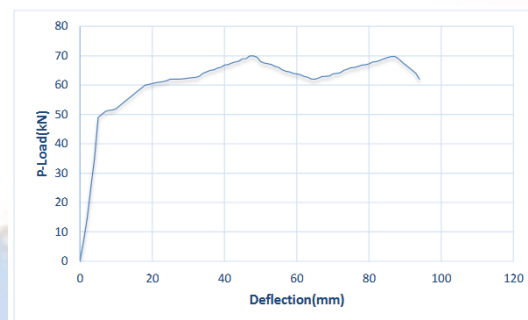
روند مقاوم‌سازی بدین صورت است که چهار تیر ساخته شده مشابه تیر مرجع، با مصالح ۱ HPFRCC، ۲ HPFRCC، ۳ HPFRCC، ۴ HPFRCC به روش قالب‌بندی و بتن‌ریزی در قالب‌ها در قسمت تحتانی تیرها بصورت U شکل اجرا می‌شوند. در تمامی تیرهای مذکور سطح تحتانی تیرها مضرس می‌باشد.

جدول ۱- نحوه نامگذاری و مشخصات تیرهای مورد آزمایش

ردیف	نام نمونه	شرح نمونه	$t_{HPFRCC}$ mm	$f_c(Concrete)$ MPa	$f_c(HPFRCC)$ MPa
۱	CB (Control Beam)	نمونه بتنی مرجع	۰	۲۸/۴	-
۲	B-H-1	مقاوم سازی با مصالح HPFRCC 1	۲۰	۲۸/۴	۲۶/۳
۳	B-H-2	مقاوم سازی با مصالح HPFRCC 2	۲۰	۲۸/۴	۲۲/۹
۴	B-H-3	مقاوم سازی با مصالح HPFRCC 3	۲۰	۲۸/۴	۲۶/۵
۵	B-H-4	مقاوم سازی با مصالح HPFRCC 4	۲۰	۲۸/۴	۲۲/۱

## تیر CB

ابتدا تیر مرجع CB مورد آزمایش قرار گرفت و نیروی قائم به صورت دو نقطه‌ای به آن اعمال گردید اولین ترک خوردگی تحت نیروی حدود ۱۴ کیلونیوتن و تغییر شکل ۱/۶۸ میلی‌متر در وسط دهانه اتفاق می‌افتد. ترک خوردگی‌ها نیز با ترک‌های کششی در وسط دهانه شروع می‌شود، به تدریج گسترش یافته و به سمت تکیه‌گاه‌ها حرکت می‌کند و عرض آن‌ها نیز زیاد می‌شود. ترک‌های برشی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها ظاهر می‌گردند. این ترک‌ها با افزایش نیرو، گسترش یافته و به سمت بخش فشاری تیر حرکت می‌کنند. با افزایش مقدار نیرو، بخش فشاری تیر نیز در قسمت بالایی آن و در بین نیروهای وارده منهدم می‌شود و در نهایت تیر CB دارای نیروی ۸/۶۸ کیلونیوتن و تغییر مکان حداکثر ۹۳/۷ میلی‌متر گردیده و بتن نیز در محل اعمال نیروهای متمرکز خرد می‌گردد. ضمن اینکه خاموت‌های مورد بررسی نیز جاری نمی‌شوند. الگوی ترک خوردگی تیر CB در هنگام انهدام و منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی این تیر در شکل (۱) نشان داده شده است.

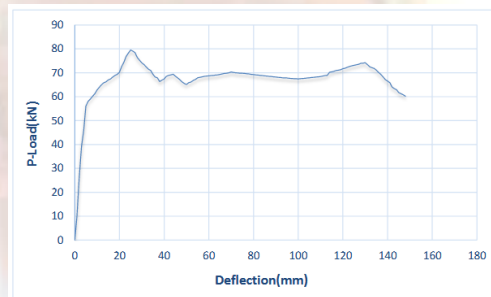


شکل ۱- منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر CB

## تیر B-H-۱

در مرحله‌ی دوم تیر B-H-۱ که با یک لایه‌ی HPFRCC به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در قسمت پایین آن تحت سیستم اجرای قالببندی مقاوم سازی شده است، تحت آزمایش قرار گرفت. اولین ترک خوردگی تحت نیروی ۲۶ کیلونیوتن و تغییر شکل ۱/۵۷ میلی‌متر

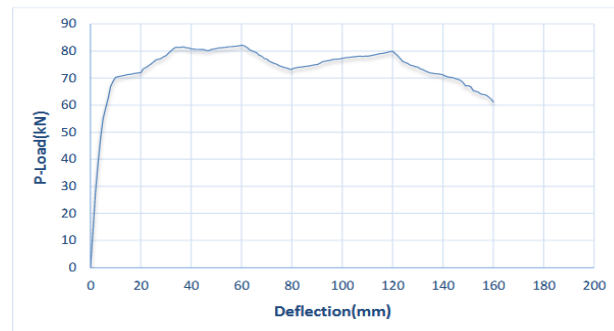
در وسط دهانه اتفاق می افتد. آرماتورهای کششی در نیروی ۵۶/۳ کیلونیوتن و تغییر شکل ۵/۱۲ میلی متر جاری می شوند. ترک خوردگی ها نیز با ترک های کششی در وسط دهانه شروع می شود و به تدریج گسترش یافته و عرض آن ها نیز زیاد می گردد. ترک های برشی بسیار محدود بوده و عرض آن ها افزایش زیادی پیدا نمی کند. ترک ها با افزایش نیرو گسترش یافته و وارد بخش فشاری تیر نیز می گردند. در این حالت بروز ترک های خمشی، نمود بیشتری داشته و عرض آن ها افزایش بیشتری دارد. بتن نیز در بخش فشاری بین دو بار متمرکز و نیز محل اعمال این نیروهای متمرکز خرد می گردد. در نهایت تیر B-H-۱ دارای نیروی ۷۹/۵ کیلونیوتن و تغییر مکان ۱۴۷/۹ میلیمتر گردیده است. در برخی موارد نیز عرض ترک ها در بخش بتنی فوقانی از عرض ترک های مشابه در بخش HPFRCC تحتانی تیر، بیشتر می باشد. منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه ی تیر در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه ی تیر B-H-۱

### تیر B-H-۲

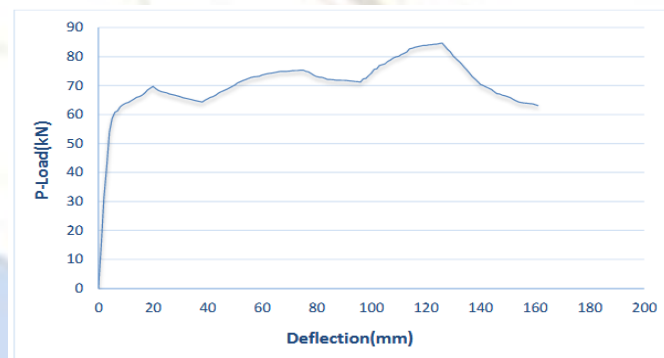
در مرحله ی سوم تیر B-H-۲ که دارای یک لایه ی HPFRCC به ضخامت ۲۰ میلی متر در قسمت پایین آن تحت سیستم اجرای قالب بندی مقاوم سازی شده است، تحت آزمایش قرار گرفت. اولین ترک خوردگی تحت نیروی ۲۸ کیلونیوتن و تغییر شکل ۱/۸۹ میلی متر اتفاق می افتد. آرماتورهای کششی در نیروی ۵۸/۸ کیلونیوتن و تغییر شکل ۵/۴۱ میلی متر تسلیم می شوند. ترک خوردگی ها نیز با ترک های کششی در وسط دهانه شروع می شود و به تدریج گسترش یافته و عرض آن ها نیز زیاد می شود. ترک های برشی در هر دو بخش کششی و فشاری بتن امتداد داشته و بتن نیز در بخش فشاری بین دو بار متمرکز و نیز محل اعمال این نیروهای متمرکز خرد می گردد. در نهایت تیر B-H-۲ دارای نیروی ۸۲/۱ کیلونیوتن و تغییر مکان حداکثر ۱۵۶/۳ میلی متر می شود.



شکل ۳- منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر B-H-۲

### تیر B-H-۳

در مرحله‌ی چهارم تیر B-H-۳ که با یک لایه‌ی HPFRCC به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در قسمت پایین آن به صورت قالب‌بندی مقاوم‌سازی شده است، تحت آزمایش قرار گرفت. اولین ترک‌خوردگی در نیروی حدود ۳۱ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۱/۹۲ میلی‌متر در وسط دهانه ایجاد می‌گردد. تسلیم آرماتورهای کششی در نیروی حدود ۶۰/۸ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۵/۸ میلی‌متر رخ می‌دهد. ترک‌خوردگی‌ها نیز با ترک‌های کششی در وسط دهانه شروع می‌شود و به تدریج عمیق و عرض آن‌ها گسترش می‌یابد. ترک‌های برشی بسیار محدود هستند. این ترک‌ها با افزایش نیرو گسترش یافته و وارد بخش فشاری تیر نیز می‌گردند. بتن نیز در بخش فشاری بین دو بار متمرکز و نیز محل اعمال این نیروهای متمرکز خرد می‌گردد. در نهایت تیر B-H-۳ دارای نیروی ۸۴/۶ کیلو نیوتن تغییر مکان حداکثر ۱۶۰/۲ میلی‌متر گردیده است. الگوی ترک‌خوردگی نیز در لحظه‌ی انهدام که نسبت تیرهای قبلی دارای ترک‌های بیشتری می‌باشد و منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی این تیر در شکل (۴) نشان داده شده است.

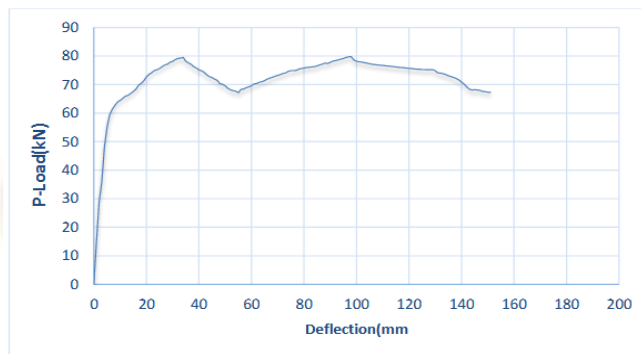


شکل ۴- منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر B-H-۳

### تیر B-H-۴

در مرحله‌ی پنجم تیر B-H-۴ که دارای یک لایه‌ی HPFRCC به ضخامت ۲۰ میلی‌متر در قسمت پایین آن می‌باشد تحت آزمایش قرار گرفت. اولین ترک‌خوردگی تحت نیروی حدود ۲۹ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۱/۹ میلی‌متر در وسط دهانه اتفاق می‌افتد. جاری شدن آرماتورهای کششی در نیروی ۵۹/۳ کیلو نیوتن و تغییر شکل ۵/۸۳ میلی‌متر رخ می‌دهد. ترک‌خوردگی‌ها نیز با ترک‌های کششی در

وسط دهانه شروع می‌شود و به تدریج گسترش یافته و عرض آن‌ها نیز زیاد می‌شود. ترک‌های برشی در مجاورت تکیه‌گاه‌ها ظاهر می‌گردند. اما این ترک‌ها محدود بوده و عرض آن‌ها افزایش زیادی پیدا نمی‌کند. در این حالت بروز ترک‌های خمشی، نمود بیشتری داشته و عرض آن‌ها افزایش بیشتری دارد. بتن نیز در بخش فشاری بین دو بار متمرکز و نیز محل اعمال این نیروهای متمرکز خرد می‌گردد. در نهایت تیر به نیروی حداکثر ۷۹/۸ کیلونیوتن و تغییر مکان حداکثر ۱۵۱/۳ میلی‌متر می‌رسد. الگوی ترک‌خوردگی تیر در لحظه‌ی نه‌دام و منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی این تیر در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر ۴-B-H

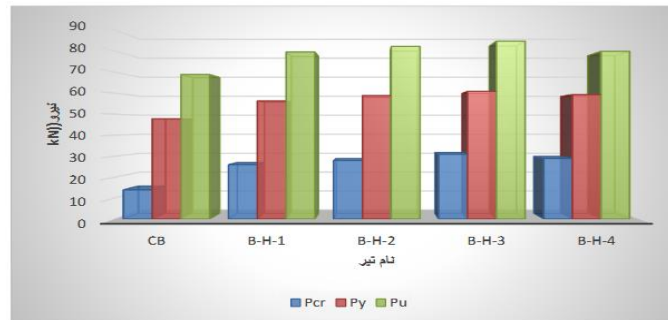
### ۳-۲- تحلیل‌های اولیه از تیرهای ساخته شده

مقادیر اولیه کلیه نمونه‌ها در جدول (۲) 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.

جدول ۲- تحلیل‌های اولیه از تیرهای ساخته شده

شماره نمونه	نام نمونه	شرح نمونه	$P_{cr}$ (kN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_{uz}$ (kN)	$\Delta_{uz}$ (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





شکل ۶- نیروهای ترک خوردگی، تسلیم و نهایی تیرها

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود تمامی تیرهای مقاوم‌سازی شده نیروی ترک خوردگی بیشتری نسبت به تیر مرجع دارند که در تیر B-H-۳ به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

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

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

میزان افزایش نیروی ترک خوردگی در این پژوهش از ۸۶ تا ۱۲۱ درصد می‌باشد. نیروی ترک خوردگی در تیرهای دارای الیاف ۳ درصد به طور محسوسی بیشتر از تیرهای الیاف ۱ درصد می‌باشد. نیروی ترک خوردگی در تیرهای مقاوم‌سازی شده تحت شیوه اجرای قالب‌بندی، 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.

### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

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 میکروترکها باعث ورود مصالح به مرحله سخت‌شوندگی شده و ظرفیت باربری بالا می‌رود. که این افزایش در نمونه‌های با الیاف بیشتر محسوس‌تر 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.

## ۵-پیشنهادهاد

۱. بررسی رفتار تیرهای مقاومسازی شده با HPFRCC تحت بارگذاری‌های متمرکز، گسترده، رفت و برگشی.
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. Curbach, M. and Jesse, F. ۱۹۹۹, "High-performance textile-reinforced concrete" structural engineering international ۹(۴,۱):۲۸۹-۲۹۱(۳).
۲. Krenchel H. and Stang H. ۱۹۸۹ "stable microcracking in cementitious materials" in brittle matrix composites ۲. A.M. Brandt and J.H. Marshall, eds. ۲۰-۳۳.
۳. Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. ۲۰۰۳. "setting the stage : toward performance- based classification of FRC composites" in high performance fiber reinforced cement composites (HPFRCC-۴) proc. Of the ۴th int l RILEM workshop. A.E. Naaman and H.W Reinhardt.
۴. Wnag, S. ۲۰۰۵ "micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites" PhD dissertation , Michigan University.
۵. 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.