

## بررسی تأثیر جایگزینی بتن HPFRCC با بتن معمولی در تیرهای مسلح با میلگرد کامپوزیتی GFRP

سید واثق موسوی اصفهانی<sup>۱</sup>، محمد کاظم شربندار<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد سازه دانشگاه سمنان

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

vasegh\_mousavi@yahoo.com

### چکیده

میلگردهای فولادی در سازه های بتن مسلح در معرض آسیب های محیطی مانند هجوم یون های کلر از محیط های اطراف خود قرار می گیرند و باعث خوردگی و کاهش چسبندگی و مقاومت سازه ای عضو بتن مسلح می گردد. استفاده از میلگردهای کامپوزیتی GFRP با خاصیت ضد زنگ زدگی و مقاومت کششی بالا بعنوان گزینه مناسب میلگردهای فولادی پیشنهاد شده است. مبنای طراحی باید طوری باشد که بتن در فشار زودتر از میلگرد GFRP که در کشش است به حد نهایی برسد. از آنجائیکه بتن معمولی دارای کرنش نهایی خردشوندگی محدودی است لذا سبب محدود شدن کرنش نهایی مجاز کششی در طراحی سازه های بتنی مسلح می گردد. در این مقاله امکان استفاده از بتن توانمند الیافی HPFRCC بجای بتن معمولی جهت نیل به کرنش کششی و فشاری بیشتر بتن و بهره وری بیشتر از ظرفیت نهایی میلگردهای کامپوزیتی بررسی شده است. دو عدد تیر بتن مسلح به میلگردهای GFRP و با نسبت تسلیح برابر با بالانس آزمایش شده است که یکی از تیرها با بتن معمولی و دیگری با بتن HPFRCC می باشد. رفتار خمشی، میزان بار و تغییر مکان، سختی موثر، میزان جذب انرژی تیرها محاسبه شده و با آیین نامه ACI 440-15 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که استفاده از بتن HPFRCC بجای بتن معمولی باعث بهبود موثر شکل پذیری، میزان جذب انرژی، و نسبت تسلیح بالانس شد و با در نظر گرفتن ملاحظات نظیر رعایت حداقل میزان تسلیح و نسبت بالانس، پیشنهاد می شود از بتن HPFRCC در تسلیح سازه های بتنی مسلح به GFRP استفاده شود.

کلمات کلیدی: بتن معمولی، بتن HPFRCC، میلگرد GFRP، نسبت بالانس، شکل پذیری

### ۱. مقدمه

ایده اضافه کردن الیاف به ترکیب های ترد و شکننده از زمان های قدیم رواج داشته است. شاید اولین بار ایرانیان با اضافه کردن کاه به گل و تولید ترکیب کاهگل جزو اولین کسانی بودند که از ترکیب الیافی استفاده می کردند. اما متأسفانه کشورهای دیگر با الگو برداری از این ایده، ترکیبی را به نام خود به عنوان مصالح توانمند با نام بتن<sup>۱</sup> HPFRCC در جهان ثبت کردند و کشور ما در زمینه علم و فناوری این موضوع که خود عرضه کننده فکر و ایده اولیه آن بود توجه نکرد و از قافله ی جهانی عقب ماند. امروزه در دنیا الیاف متنوع و متعددی جهت استفاده در بتن HPFRCC برای کاربردهای گوناگون تولید شده است. یکی از انواع مختلف این الیاف، الیاف فولادی است [۱]. امروزه یکی دیگر از مشکلات اساسی در صنعت ساختمان خوردگی فولاد با کاربرد میلگرد فولادی در بتن است. بیش از صد سال است که در صنعت ساختمان از میلگردهای فولادی به عنوان مسلح کردن اعضای سازه های بتنی استفاده می شود. برای رویارویی با این ضعف تلاش های گسترده ای از قبیل استفاده از میلگردها با پوشش اپوکسی و حفاظت کاتدی صورت گرفته است. در نهایت بهره گیری و استفاده از میلگرد کامپوزیتی راه مناسبی در حل این

<sup>۱</sup> High Performance Fiber Reinforced Cement Composite

معضل شناخته شد و امروزه تبدیل به یکی از راه‌های مقابله با این مشکل در بتن تقویت شده با فولاد شده است [۲]. اولین تلاش اصلی برای مسلح کردن بتن معمولی با الیاف فولادی توسط رامولدی و باستون در اوایل دهه ۱۹۶۰ در آمریکا صورت گرفت. پس از آن تحقیقات گسترده‌ای توسط محققین در مورد مسلح کردن بتن با الیاف فولادی صورت گرفت. الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی می‌باشد و با توجه به قابلیت شکل پذیری و مقاومت کششی بالا کمک شایانی به بهبود این دو ضعف بتن معمولی می‌کند. از لحاظ اقتصادی نیز تغییرات مثبت انجام گرفته در بهبود ضعف بتن معمولی صرفه اقتصادی داشت. الیاف فولادی به شکل‌های ظاهری گوناگون تولید شده و در بازار موجود است. از دیگر مزیت‌های این الیاف علاوه بر شکل ظاهری می‌توان مقاومت آنها جهت جلوگیری از بروز ترک در بتن بدلیل گرادیان حرارت را نیز نام برد [۳]. در چند دهه اخیر پژوهشگران مطالعات زیادی در جهت استفاده از مصالح توانمند با خصوصیات رفتاری و مکانیکی مشابه بتن به جای مصالح متداول انجام دادند که یکی از این مصالح، کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) می باشد. نامان و رینهارت در سال ۲۰۰۳ مصالحی را که دارای یک بخش سخت شوندگی کرنش کششی در منحنی تنش - کرنش خود بوده اند را به عنوان کامپوزیت های سیمانی مسلح الیاف توانمند معرفی کردند. مصالح HPFRCC جدا از بتن های الیافی  $FRC^2$  دسته بندی شده اند بطوریکه کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند یک نوع خاص از کامپوزیت های  $FRC$  هستند که علامت مشخصه آنها رفتار سخت شوندگی کرنش در کشش پس از اولین ترک خوردگی است که با ترکهای چندگانه تا رسیدن به کرنش های نسبتا زیاد همراه می شود [۳]. مصالح CARDIFRC که در دانشگاه کاردیف ولز توسعه یافته، یکی از انواع مختلف HPFRCC هاست که توسط فرمت، نیکلایدیس، کانولپلوس و کاریهالودر سال ۲۰۰۶ ابداع گردید و مقاومت فشاری تا ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی تا ۲۷ مگاپاسکال مشاهده شد [۴]. شربتدار و همکاران تحقیقات گسترده ای در زمینه استفاده از بتن HPFRCC در انواع المان های سازه ای انجام داده اند [۵-۷].

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱ خصوصیات مصالح مصرفی

در این بخش خصوصیات مصالح مصرفی در نمونه های مورد آزمایش به شرح ذیل معرفی می شود: شن مصرفی در بتن دارای درصد شکستگی ۴۷٪ و در محدوده ی ۱۲/۵ تا ۴/۷۵ میلیمتر است، ماسه مصرفی نیز در محدوده ی ۴/۷۵ میلیمتر قرار دارد. الیاف فولادی استفاده شده از نوع سینوسی موج دار به طول ۵ سانتیمتر است که مشخصات آن در جدول شماره ۱ می توانید ملاحظه کنید و در شکل شماره ۱ تصویر آن را ملاحظه می نمایید. فوق روان کننده مصرفی مطابق شکل شماره ۲ از شرکت صنایع شیمی ساختمان آبادگران تحت عنوان تجاری فوق نرمال -S.P.A.PLAST-۴۰۳ تهیه شده است. میکروسیلیس استفاده شده نیز مشخصات مکانیکی آن را در جدول شماره ۲ ملاحظه می کنید. پودر سیلیس نیز که از عوامل مهم پیوند بین ذرات ماسه و سبب استحکام و شکل پذیری بتن است و در بتن HPFRCC بدلیل آنکه درشت دانه ها در بتن HPFRCC استفاده نمی شود و فقط ماسه و ریز دانه ها استفاده می شود از شرکت تاوان سیلیس تهیه شده است. طرح اختلاط بتن معمولی و بتن توانمند HPFRCC مطابق جداول شماره ۳ و ۴ که ملاحظه می نمایید طرح و اجرا شده است. در این تحقیق از میلگرد GFRP به قطرهای ۱۲ و ۱۶ بعنوان میلگردهای کششی تولیدشده در شرکت سوئسی به نام FIREP مطابق جدول شماره ۵ استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی الیاف فولادی بکار رفته در بتن HPFRCC

| طول الیاف (mm) | قطر معادل (mm) | نسبت تصویر | مقاومت کشش (MPa) | نوع الیاف   | ظاهر             |
|----------------|----------------|------------|------------------|-------------|------------------|
| ۵۰             | ۱              | ۵۰         | ۱۰۵۰             | ساده سینوسی | سیم مسی رنگ تمیز |



شکل ۱: الیاف فولادی بکار رفته در بتن HPFRCC شکل ۲: فوق روان کننده دیرگیر استفاده شده در نمونه‌ها

جدول ۲: مشخصات مکانیکی میکرو سیلیس

|                                |       |                                |                |
|--------------------------------|-------|--------------------------------|----------------|
| SiO <sub>2</sub>               | ۵۷/۰۳ | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۳/۴۴           |
| AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱۴/۴۶ | MgO                            | ۰/۰۲           |
| PH                             | ۸۰۸/۵ | CaO                            | ۳/۰۶           |
| S                              | ۰/۳۲  | L.O.I                          | ۱۵/۶۴          |
| اندیس ژله ای                   | ۲۰-۲۵ | اندازه                         | MESH ۱۰۰ > ۹۸٪ |
| تورم                           | ۱۸-۳۰ | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | ۰/۱۲           |
| K <sub>2</sub> O               | ۰/۴۸  | Na <sub>2</sub> O              | ۲/۸۵           |

جدول ۳: طرح اختلاط بتن معمولی (یک متر مکعب)

| مصلح مصرفی | آب  | شن (نخودی) | ماسه | سیمان (تیپ ۲) | میکرو سیلیس | فوق روان کننده |
|------------|-----|------------|------|---------------|-------------|----------------|
| وزن (kg)   | ۲۴۲ | ۷۴۱        | ۴۹۹  | ۸۰۵           | ۸۰          | ۴              |

جدول ۴: طرح اختلاط بتن HPFRCC (یک متر مکعب)

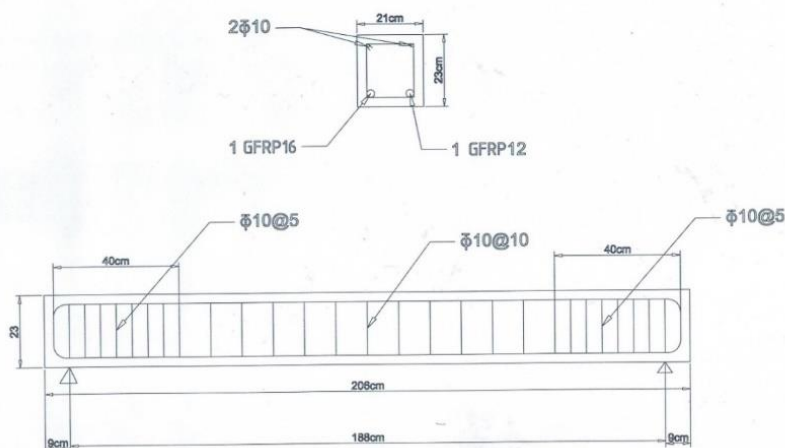
| مصلح مصرفی | آب  | الیاف فولادی | پودر سیلیس | ماسه | سیمان (تیپ ۲) | میکرو سیلیس | فوق روان کننده |
|------------|-----|--------------|------------|------|---------------|-------------|----------------|
| وزن (kg)   | ۲۸۳ | ۸۱           | ۲۴         | ۱۰۸۶ | ۸۰۸           | ۸۱          | ۸              |

جدول ۵: مشخصات میلگردهای GFRP

| نوع | تنش کششی (MPa) | مدول الاستیسیته (MPa) | وزن مخصوص (g/cm <sup>3</sup> ) | درصد گسیختگی (%) |
|-----|----------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|
| P   | ۹۰۰-۱۰۰۰       | > ۶۰۰۰۰               | ۲/۲                            | > ۲/۵            |

## ۲-۲- نمونه آزمایشگاهی تیرها

دو عدد تیر با تکیه گاههای ساده به طول ۲۰۶ سانتیمتر و عرض ۲۱ سانتیمتر و ارتفاع ۲۳ سانتیمتر و مسلح به میلگرد GFRP در ناحیه کشش ساخته شدند. نمونه اول با بتن معمولی و بر اساس ضوابط آیین نامه ۱۵-۴۴۰ ACI [۸] بود. نسبت تسلیح برابر بالانس در نظر گرفته شد. نمونه دوم نیز دقیقاً با مشخصات آرماتور بندی نمونه اول اما با بتن نوع HPFRCC ساخته شد. نمونه ها پس از بتن ریزی تا رسیدن به سن ۲۸ روز تحت عمل آوری دقیق قرار گرفتند. نمونه ساخته شده با بتن توانمند الیافی HPFRCC با درصد الیاف ۱/۳ درصد (حجمی) ساخته شد. جزئیات کامل آرماتور گذاری نمونه ها در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. خاموتها از نوع  $A_3$  و قطر ۱۰ میلیمتر طراحی شد و چیدمان آنها نیز بصورت تا فاصله ۴۰ سانتیمتر از هر تکیه گاه هر ۵ سانتیمتر یک حلقه خاموت و در میانه تیر هر ۱۰ سانتیمتر یک حلقه خاموت قرار گرفت. در ناحیه فشاری دو عدد میلگرد طولی فولادی از نوع  $A_3$  و قطر ۱۰ میلیمتر جهت تثبیت خاموت ها قرار گرفتند. بدلیل اینکه محاسبات اولیه براساس بکارگیری نسبت تسلیح آرماتور کامپوزیتی معادل بالانس و براساس ضوابط آیین نامه ۱۵-۴۴۰ ACI بوده است بنابراین میلگردهای GFRP در ناحیه کشش بصورت یک عدد به قطر ۱۲ میلیمتر و یک عدد به قطر ۱۶ میلیمتر بصورتیکه در شکل شماره ۳ ملاحظه می کنید جاگذاری شد. در مجموع سطح مقطع استفاده شده برابر ۳/۱۴ سانتیمتر مربع برای هر تیر بود تا اینکه شرط شرط مورد نظر تامین گردد.



شکل ۳: جزئیات اجرای تیر بتنی مسلح به میلگرد GFRP با دامنه سطح مقطع برابر با بالانس

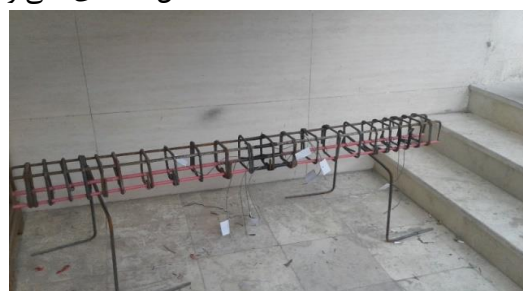
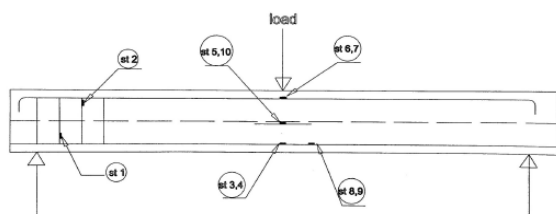
## ۲-۳- چیدمان آزمایشگاهی

چیدمان قرار گیری تیرها جهت انجام آزمایش به شرح ذیل انجام شد: تیر با تکیه گاههای ساده و دهانه موثر ۱۸۸ سانتیمتر مطابق شکل ۴ بر روی ست آپ قرار گرفت. بار متمرکز در وسط دهانه تیرها توسط جکی که حداکثر ظرفیت بار ۵۰۰ کیلو نیوتن را دارد قرار گرفت. میزان اندازه گیری بار وارد شده در هر مرحله توسط بارسنجی که روی جک ورود بار قرار گرفته اندازه گیری می شود. تغییر مکان تیرها توسط سه عدد تغییر مکان سنج که یکی در وسط دهانه یعنی در نقطه محل ورود بار متمرکز و دو عدد تغییر مکان سنج دیگر در نقاط یک چهارم دهانه که سمت چپ و راست وسط دهانه است توسط مبدلهای تغییر مکان متغیر خطی (LDVT<sup>۳</sup>) اندازه گیری شدند. جهت محاسبه کرنش ها در نقاط مختلف مقطع تیرها ۹ عدد کرنش سنج ۲۰-PFL ساخت کشور ژاپن مطابق شکل ۵ در نقاط مختلف تیرها نصب شدند.

<sup>۳</sup>Linear variable displacement transducer



شکل ۴: نمای کلی واقعی از نمونه‌ها و سیستم آزمایش



شکل ۵: محل قرار گیری کرنش سنج‌ها

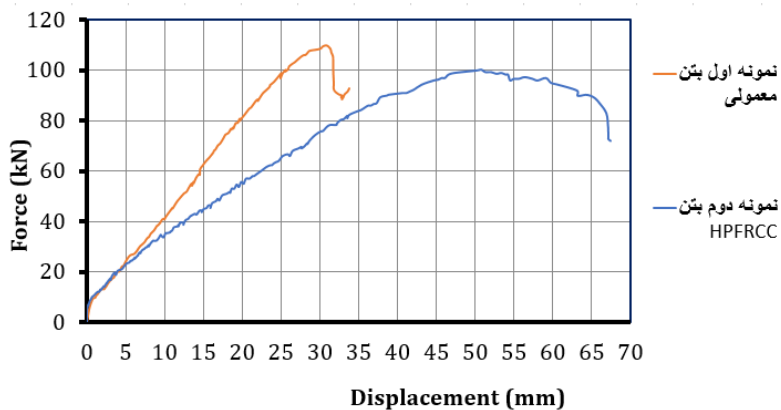
### ۳. نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها با موضوع ۱- بار- تغییر مکان ۲- ممان - انحنا ۳- سختی موثر ۴- جذب انرژی به شرح ذیل ارائه خواهد شد.

#### ۳-۱- بار تغییر مکان

منحنی‌های بار- تغییر مکان تیرها (وسط تیرها) در شکل ۶ نشان داده شده است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از آزمایش که شامل مقایسه ۱- بار اولین ترک خوردگی ۲- بار ماکزیمم ۳- خیز اولین ترک خوردگی ۴- خیز حداکثر ۵- خیز نهایی در وسط دهانه و در محل ورود بار متمرکز را در جدول ۶ ملاحظه می‌کنید. تغییر مکان نهایی در واقع مشخص‌کننده تغییر مکان تیر در ۱۵ درصد افت بار حداکثر است. به طور کلی، پاسخ بار- تغییر مکان به دو مرحله که مرحله اول آن مرحله سخت و به عبارتی قبل از گسیختگی میلگرد GFRP در ناحیه کشش است و مرحله دوم آن مرحله شکست بتن فشاری است که می‌بایست بعد از گسیختگی میلگرد GFRP در ناحیه کشش تقسیم می‌گردد. به عبارت دیگر وجه مشترک این دو یعنی شکست همزمان بتن فشاری و گسیختگی میلگرد GFRP بعنوان نسبت تسلیح بالانس یا تعادل تعریف شده است [۸]. بار نهایی، حداکثر بار قابل تحمل توسط نمونه پس از افت بار به میزان ۱۵٪ (ظرفیت باربری نهایی نمونه) است. با مشاهده منحنی‌های پاسخ بار- تغییر مکان و مشاهدات بصری مطابق شکل ۷ مشخص می‌شود که تیر ساخته شده با بتن معمولی بعد از ترک خوردگی اولین ترک، سختی اولیه نسبتاً بیشتری از تیر ساخته شده با بتن HPFRCC داشته اما از نظر شکل پذیری و جذب انرژی و انحنا به مراتب مقداری کمتر از نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC دارد. از نظر مشاهدات بصری تیر ساخته شده با بتن معمولی همزمان با گسیختگی میلگرد GFRP در ناحیه کشش بتن قسمت فشاری نیز شکست اما تیر ساخته شده با بتن HPFRCC پس از گسیختگی میلگرد تحت بار تئوری ماکزیمم  $P_g$  تحمل بار بیشتری را نسبت به نمونه ساخته شده با بتن معمولی تا بار حداکثر داشت همین مسئله از نظر مقایسه نسبت تسلیح بالانس نشان می‌دهد که نمونه ساخته شده با بتن معمولی کاملاً با ضوابط طراحی آیین نامه برابری می‌کند اما نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC با

توجه به نوع شکست که میلگرد GFRP قبل از شکست بتن گسیخته شد با ضوابط آیین نامه ۱۵-۴۴۰ ACI تطابق ندارد و نشان می دهد که نسبت بالانس این نمونه باید بیشتر از مقادیر داده شده در آیین نامه ۱۵-۴۴۰ ACI باشد. تصاویر وقوع اولین ترک و گسیختگی میلگرد GFRP و انهدام نمونه ها را در شکل ۷ می توانید مشاهده کنید.



شکل ۶: منحنی بار تغییر مکان نمونه ها

جدول ۶: مقایسه بار - تغییر مکان منحنی نمونه ها

| ردیف | نام نمونه | $P_{cr}$ (KN) | $\frac{P_{cr(2)}}{P_{cr(1)}}$ | $P_{max}$ (kN) | $\frac{p_{max(2)}}{p_{max(1)}}$ | $\Delta_{cr}$ (mm) | $\frac{\Delta_{cr(2)}}{\Delta_{cr(1)}}$ | $\Delta_{max}$ (mm) | $\frac{\Delta_{max(2)}}{\Delta_{max(1)}}$ | $\Delta_u$ (mm) | $\frac{\Delta_u(2)}{\Delta_u(1)}$ |
|------|-----------|---------------|-------------------------------|----------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| ۱    | نمونه اول | ۲۰            |                               | ۱۰۸/۳۳         |                                 | ۴                  |                                         | ۳۱/۲۹               |                                           | ۳۱/۷۵           |                                   |
| ۲    | نمونه دوم | ۱۰            | ۲                             | ۱۰۰/۳۳         | ۰/۹۳                            | ۰/۷                | ۰/۱۸                                    | ۵۱/۳۲               | ۱/۶۴                                      | ۶۶/۰۱           | ۲/۰۸                              |

جدول ۷: مقایسه مشاهدات بار گسیختگی میلگرد GFRP به بار حداکثر نمونه ها

| ردیف | نام نمونه | $P_g$ (kN) | $\frac{p_g(i)}{p_{max(i)}}$ | $\Delta_g$ (mm) | $\frac{\Delta_g(i)}{\Delta_{max(i)}}$ |
|------|-----------|------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| ۱    | نمونه اول | ۱۰۷/۸      | ۱                           | ۲۷              | ۰/۸۶                                  |
| ۲    | نمونه دوم | ۷۵         | ۰/۷۵                        | ۳۰              | ۰/۴۹                                  |



ب- لحظه گسیختگی میلگرد GFRP در نمونه دوم



الف- لحظه گسیختگی میلگرد GFRP و انهدام نمونه اول

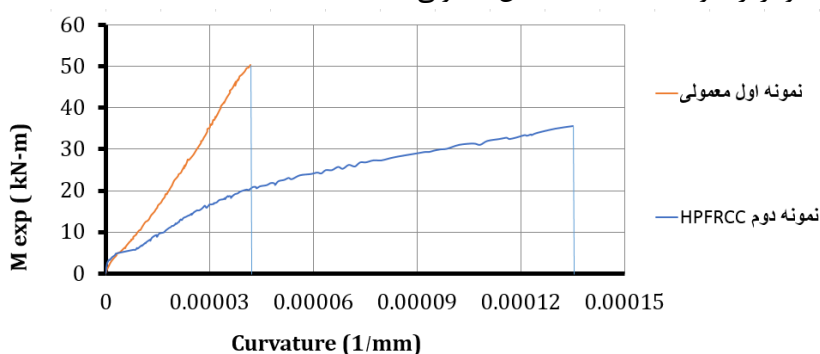
شکل ۷: تصاویری از لحظه گسیختگی میلگرد GFRP و انهدام نمونه ها



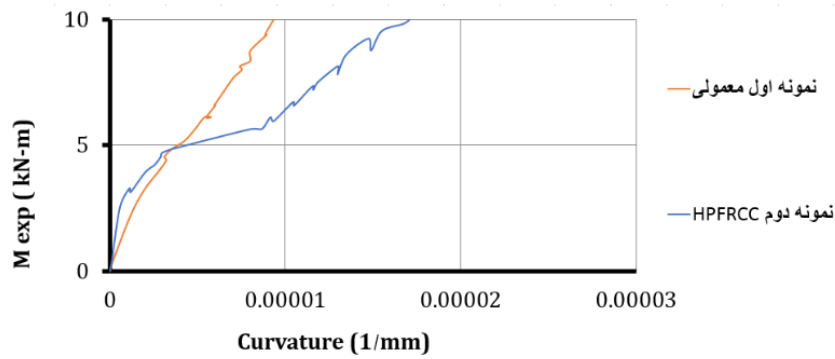
ج- لحظه انهدام تیر نمونه دوم  
ادامه شکل ۷: تصاویری از لحظه گسیختگی میلگرد GFRP و انهدام نمونه ها

### ۳-۲- محاسبه انحنا و سختی مؤثر

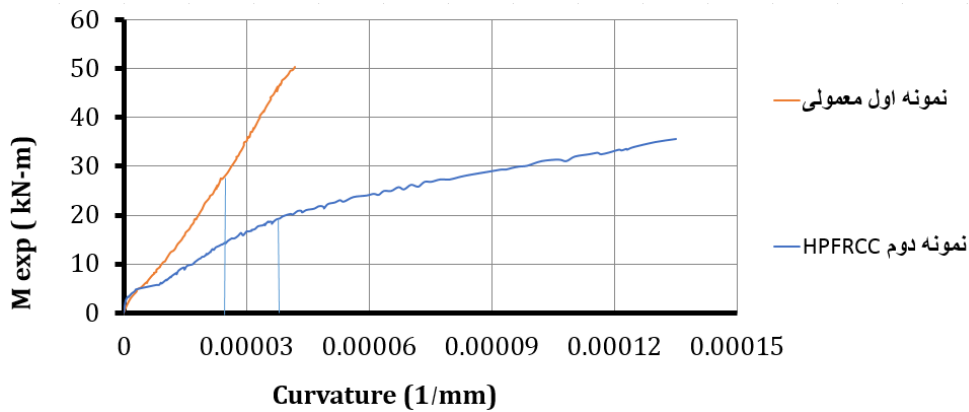
منحنی ممان- انحنا نمونه ها را در شکل ۸ می توانید ملاحظه کنید. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه و مدول الاستیسیته بتن که از رابطه  $E = 5000\sqrt{f_c}$  بدست آمده است و همچنین سختی مؤثر تحت ممان طراحی در جداول ۸ و ۹ نشان داده شده اند. لازم به ذکر است که در جدول ۹ ممان طراحی که بر اساس ضوابط آیین نامه ۱۵-۴۴۰-ACI برابر ۵۵٪ کاهش مقاومت نسبت به ممان حداکثر را بیان نموده با اندیس  $d$  نمایش داده شده است. با مقایسه سختی مؤثر دو نمونه ملاحظه می شود که نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC دارای سختی مؤثر نهایی قابل ملاحظه کمتری نسبت به نمونه ساخته شده با بتن معمولی است. اما در مورد سختی مؤثر قبل از ترک خوردگی نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC سختی مؤثر بیشتری دارد. درمقایسه سختی مؤثر طراحی به سختی مؤثر حداکثر طبق داده های جدول ۹ ملاحظه می شود این داده برای نمونه ساخته شده با بتن معمولی دارای شیب منحنی بصورت خطی با زاویه ۴۵ درجه است. درصورتیکه در نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC شیب منحنی بصورت خوابیده تر و با زاویه تقریباً نصف زاویه منحنی نمونه اول است. به عبارت دیگر با افزایش دوبرابری زاویه انحنا میزان لنگر مقاوم یک واحد اضافه می شود این مسئله نشان می دهد شکل پذیری نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC تقریباً دو برابر نمونه ساخته شده با بتن معمولی است.



الف- منحنی ممان- انحنا حداکثر



ب- منحنی ممان - انحنا ترک خوردگی  
شکل ۸: منحنی ممان - انحنا



ج- منحنی ممان - انحنا نهایی  
ادامه شکل ۸: منحنی ممان - انحنا

جدول ۸: مقایسه سختی موثر حداکثر مستخرج از منحنی ممان - انحنا نمونه ها

| ردیف | نام نمونه | $F_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $E I_g$<br>(N-mm <sup>2</sup> ) | $\phi$<br>(1/mm) | $\frac{\phi_2}{\phi_1}$ | $M_{max}$<br>(kN-m) | $E I_{e(max)}$<br>(N-mm <sup>2</sup> ) | $\frac{E I_e}{E I_g}$ |
|------|-----------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| ۱    | نمونه اول | ۵۳۹۰                          | ۳۶۷۰۰                       | $7/81 \times 10^{12}$           | ۰/۰۰۰۰۴۲         |                         | ۵۰/۴۵               | $1/2 \times 10^{12}$                   | ۰/۱۵                  |
| ۲    | نمونه دوم | ۶۳۶۰                          | ۳۹۸۷۰                       | $8/49 \times 10^{12}$           | ۰/۰۰۰۰۱۳         | ۳/۰۹                    | ۳۵/۵۶               | $2/73 \times 10^{11}$                  | ۰/۰۳                  |

جدول ۹: مقایسه سختی موثر نهایی مستخرج از منحنی ممان - انحنا نمونه ها

| ردیف | نام نمونه | $\Phi$<br>(1/mm) | $M_d$<br>(Kn-m) | $E I_{e(d)}$<br>(N-mm <sup>2</sup> ) | $\frac{E I_{e(d)}}{E I_g}$ | $\frac{(\frac{E I_{e(d)}}{E I_g})_d}{(\frac{E I_e}{E I_g})_{max}}$ |
|------|-----------|------------------|-----------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ۱    | نمونه اول | ۰/۰۰۰۰۲۴         | ۲۷/۴۲           | $1/14 \times 10^{12}$                | ۰/۱۵                       | ۱                                                                  |
| ۲    | نمونه دوم | ۰/۰۰۰۰۳۸         | ۱۹/۲۷           | $5/07 \times 10^{11}$                | ۰/۰۶                       | ۲                                                                  |

### ۳-۳- محاسبه جذب انرژی نمونه‌ها

با مقایسه میزان انرژی جذب شده که برابر با مساحت زیر منحنی بار تغییر مکان تا نقطه بار حداکثر و نقطه بار نهایی است همانطور که در جداول ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می شود که نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC در نقطه بار حداکثر ۵۲٪ و در نقطه بار نهایی ۱۲۰٪ جذب انرژی بیشتری داشته است.

جدول شماره ۱۰: مقایسه انرژی جذب شده تا نقطه بار حداکثر نمونه‌ها

| ردیف | نام نمونه | W جذب انرژی تا تغییر مکان حداکثر<br>kN-mm | $\frac{W_2}{W_1}$ |
|------|-----------|-------------------------------------------|-------------------|
| ۱    | نمونه اول | ۱۶۹۴/۸۲                                   | ۱/۵۲              |
| ۲    | نمونه دوم | ۲۵۷۴/۴۷                                   |                   |

جدول شماره ۱۱: مقایسه انرژی جذب شده تا نقطه بار نهایی نمونه‌ها

| ردیف | نام نمونه | W جذب انرژی تا تغییر مکان نهایی<br>kN-mm | $\frac{W_2}{W_1}$ |
|------|-----------|------------------------------------------|-------------------|
| ۱    | نمونه اول | ۱۷۳۷/۱۸                                  | ۲/۲               |
| ۲    | نمونه دوم | ۳۸۲۷/۲۳                                  |                   |

### ۴. نتایج

- ۱- نمونه تیر ساخته شده با بتن HPFRCC و مسلح به GFRP از نظر میزان نسبت تسلیم بالانس بیشتر از مقادیر ذکر شده در آیین نامه ۱۵-۴۴۰ ACI است.
- ۲- تیرهای بتنی HPFRCC و مسلح به GFRP با داشتن ظرفیت کششی ذخیره ای که در الیاف های فولادی قرار دارد می توان حتی در صورت استفاده از نسبت تسلیم کمتر از بالانس برخلاف تیرهای بتنی معمولی مسلح به GFRP از نظر انهدام آنی و ترد مطمئن بود و این شکست اتفاق نخواهد افتاد.
- ۳- در شرایط یکسان سختی موثر تیر ساخته شده با بتن معمولی بیشتر از نمونه ساخته شده با بتن HPFRCC است.
- ۴- در شرایط یکسان انحنای تیرهای ساخته شده با بتن HPFRCC تقریباً ۲ برابر تیرهای ساخته شده با بتن معمولی است. که نشان از شکل پذیری بالای تیر های ساخته شده با بتن HPFRCC دارد.
- ۵- میزان جذب انرژی در تیرهای ساخته شده با بتن HPFRCC تا بار حداکثر نسبت به تیرهای ساخته شده با بتن معمولی ۵۲٪ بیشتر است. و تا بار نهایی ۱۲۰٪ بیشتر می باشد.

### مراجع

- [۱] Romualdi j.p.and Baston G.B. ۱۹۶۳ “Mechanics of crack arrest in concrete “. Journal of engineering mechanics ,ASCE Proc. ۸۹, (EM۳): ۱۶۸-۱۴۷
- [۲] Rubinsky J. A. and Rubinski A. ۱۹۵۴. “An Investigation into Use of Fiber-Glass for prestressed Concrete.”Magazine of Concrete Reserch .v. ۶

- [۳] Teng, J.G., Smith, S.T., Yao, J., Chen, J.F., “Intermediate crack- induced debonding in beams and slabs”, Constr Build Master, ۱۷(۷-۶) (۲۰۰۳) ۶۲-۴۴۷
- [۴] Stafford, S.B., Coull, A., “Tall building structures analysis and design”, John Wiley & sons, inc.(۱۹۹۱) ۶۵-۶۶
- [۵] Kheiraldin, A., Sharbatdar, m.k., Hadizadeh hashem abadi, O., "Empirical consider Fibr reinforced polymer on treatments coaple beams without dimence and around reinforce", Magazine of modares ۱۲(۵), ۲۰۰۱۷ (in Persia)
- [۶] Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K., Park, Y., “Ductile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frames”, Construction and Building Materials ۱۱۵ (۲۰۱۶) ۶۸۱-۶۸۹.
- [۷] Abbaszadeh, M.A., Sharbatdar, M.K., Kheyroddin, A., “Performance of Two-way RC Slabs Retrofitted by Different Configurations of High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composite Strips”, The Open Civil Engineering Journal, ۲۰۱۷, ۱۱, ۶۵۰-۶۶۳.
- [۸] ACI ۴۴۰-۱۵, “Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars