

# تأثیر لایه HPFRCC روی پانل های پیش ساخته در رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح

دریافت مقاله: ۱۵-۰۴-۱۳۹۷

پذیرش مقاله: ۱۰-۰۴-۱۳۹۸

محمد کاظم شربتدار\*

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

msharbatdar@semnan.ac.ir

آزاده حقیقت

مدرس، دانشکده فنی و حرفه ای سمنان، کارشناس ارشد مهندسی سازه

احسان قیاسی

کارشناس مهندسی اجرایی عمران، دانشکده فنی و حرفه ای سمنان

نعمت اله حیدریان

مدرس، دانشکده فنی و حرفه ای سمنان، کارشناس ارشد مهندسی سازه

چکیده:

در دهه های اخیر استفاده از کامپوزیت های سیمانی مسلح با الیاف توانمند (HPFRCC) در بهبود عملکرد سازه های بتن مسلح و مقاوم سازی اعضای آن ها گسترش زیادی یافته است. مصالح HPFRCC تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت شونده گی کرنش از خود بروز داده و تا رسیدن به کرنش های نسبتا زیاد کشش وارده را تحمل می کند و در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی و جذب انرژی سازه می شود. در این مقاله، به بررسی تحلیلی رفتار تیر بتن آرمه دارای پانل های پیش ساخته HPFRCC پرداخته شده است. پس از صحت سنجی نمونه ها با نتایج آزمایشگاهی تجربی، تیرهای بتن مسلح و تیر بتن مسلح دارای یک لایه مصالح HPFRCC بصورت جایگزین بتن و نمونه هایی با پانل های پیش ساخته به ضخامت های ۲۰ و ۴۰ و ۶۰ میلیمتر که به زیر تیر وصله شده اند توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدلسازی و بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از پانل HPFRCC موجب افزایش شکل پذیری تیر، نسبت به تیر بتنی، به طور متوسط به میزان ۳۶٪ و نسبت به تیر بتنی تقویت شده با HPFRCC به صورت لایه جایگزین، به میزان ۱۵/۵۵٪ شده است. میزان انرژی جذب شده تیر دارای پانل به صورت وصله نسبت به تیر دارای یک لایه تحتانی HPFRCC، ۳۹٪ افزایش یافته است. کلمات کلیدی: سخت شونده گی کرنش، کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند، پانل پیش ساخته، شکل پذیری، جذب انرژی.

تیر یکی از المان‌های اصلی موجود در سازه است که بطور عمده تحت بارهای خمشی و برشی قرار می‌گیرد. بهبود مقاومت خمشی تیرهای یک سازه، به نوعی می‌تواند ظرفیت کل سازه را افزایش دهد. امروزه با مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، سعی بر آن است که حداکثر استفاده از ظرفیت سازه شده و مدت زمان بهره‌برداری از آن را افزایش دهند. یکی از انواع روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC) است. در دهه‌های اخیر استفاده از این کامپوزیت‌های پلیمری در بهبود عملکرد سازه‌های بتن مسلح و مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای اعضای آن‌ها گسترش زیادی یافته است. تا زمانی که راهی برای تقویت سازه‌های موجود وجود دارد به طور یقین جایگزین کردن آن‌ها با سازه جدید مقرون به صرفه نخواهد بود. مهم‌ترین عیب بتن، مقاومت کششی پایین و مقاومت کم در برابر گسترش ترک‌های کششی است. کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف توانمند (HPFRCC) که مصالحی شامل ملات سیمانی با سنگدانه‌های ریز و الیاف است دارای این ویژگی است که تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت‌شوندگی کرنش از خود بروز داده و تا رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد کشش وارده را تحمل می‌کنند. بنابراین از مزیت‌های آن‌ها مقاومت کششی بالا و توانایی بهبود جذب انرژی که یکی از معیارهای مهم در مقاومت در برابر زلزله است، می‌باشد.

تقریباً در دهه ۱۹۸۰ میلادی مفهوم بتن توانمند مطرح شده است. نعمان و رینهارت [۱]، در سال ۲۰۰۳ میلادی، مصالحی را که دارای یک بخش سخت‌شوندگی کرنش کششی در منحنی تنش-کرنش کششی خود بودند را به عنوان کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند معرفی کردند که این مصالح جدای از بتن‌های الیافی دسته‌بندی شده‌اند. از همان سال تاکنون، تحقیقات بسیاری به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی جهت بررسی رفتار HPFRCC و تاثیر آن در بهبود عملکرد سازه‌ها صورت گرفته است که همگی به نوعی به اثر مثبت استفاده از این مصالح کامپوزیتی در بخش‌های مختلف سازه اشاره دارند. لی از سال ۱۹۹۳ بر روی مصالح ECC تحقیقاتی را در دانشگاه میشیگان انجام داده بود به عنوان نمونه، در سال ۱۹۹۵ میشرا و لی [۲]، آزمایش‌هایی را بر روی یک تیر بتن مسلح و همچنین یک تیر بتن مسلح که لایه پایینی آن با مصالح کامپوزیت سیمانی مهندسی<sup>۱</sup> ECC ساخته شده بود، انجام دادند این مصالح در دسته مصالح HPFRCC قرار می‌گیرد آن‌ها به بررسی دوام و عرض ترک‌های ایجاد شده در این تیرها پرداختند. پارامونتسینوس و همکاران [۳]، در سال ۲۰۰۵ تاثیر توانمندسازی ناحیه اتصال با HPFRCC را مورد بررسی قرار داده‌اند. افزایش شکل‌پذیری و کاهش عرض ترک، از نتایج مشهود این تحقیقات بوده است. همچنین یون و همکارانش [۴]، پنج نمونه ستون بتن آرمه را با حذف خاموت و استفاده از بتن HPFRCC و با تغییر درصد الیاف، تحت بار محوری مورد بررسی قرار دادند و با استفاده از HPFRCC به حفظ شکل‌پذیری ستون، حتی با حذف خاموت دست یافتند. در سال ۲۰۰۷، کیم و همکاران [۵]، به بررسی تاثیر HPFRCC در مقاوم‌سازی تیر بتن مسلح پرداختند. آن‌ها تاثیر تقویت ناحیه کششی تیرها را با بتن الیافی مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور تیرهای دوسر مفصل تحت بار متمرکز در وسط دهانه را با بتن معمولی و مصالح HPFRCC در ناحیه کششی به ضخامت ۲۵ تا ۵۰ میلی‌متر با و بدون خاموت مورد آزمایش قرار دادند. با استفاده از HPFRCC مقاومت برشی و شکل‌پذیری تیرها به خصوص در تیرهای بدون خاموت افزایش یافت. یو و همکارانش [۶]، اتصال تیر به ستون بتن آرمه را با ورق کامپوزیت الیافی پیش ساخته تقویت کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها افزایش مقاومت اتصال تقویت شده به میزان ۱۵ درصد را نشان داد. همچنین میزان استهلاک انرژی اتصال نیز افزایش پیدا کرد ولی نتایج بیانگر کاهش سختی اولیه نمونه تقویت شده بود. تحقیق دیگری در سال ۲۰۱۲ توسط چو و همکاران [۷]، جهت مقاوم‌سازی ستون‌های تحت بار جانبی، با استفاده

<sup>1</sup> Engineered Cementitious Composites

از HPFRCC انجام شد. آن‌ها دو نمونه ستون بتن مسلح معمولی و ستون بتن مسلح دارای الیاف ۱/۵ درصد الیاف PVA در ناحیه مفصل پلاستیک ستون را تحت اثر بار قائم و جانبی رفت و برگشتی مورد بررسی قرار داده و با مقایسه نتایج، شاهد به تاخیر افتادن خرابی و افزایش شکل‌پذیری و سختی در نمونه بهسازی شده، نسبت به نمونه مرجع بودند. همچنین آن‌ها بهبود رفتار ستون بهسازی شده با HPFRCC به دلیل سخت‌شدگی کرنش، در اثر وجود الیاف را نتیجه گرفتند. پارک و همکاران [۸]، در محل اتصال تیر کوپله فلزی به دیوار برشی از کامپوزیت الیافی با ۲٪ الیاف PVA استفاده کردند. در این تحقیق مقاومت کششی و ظرفیت باربری تحت بار رفت و برگشتی افزایش یافت و نقش الیاف در کنترل ترک‌ها نتیجه شد.

در سال ۱۳۹۲، همتی و همکارش [۹ تا ۱۲]، تیرها و قاب‌های بتنی تقویت شده با مصالح HPFRCC را مورد بررسی آزمایشگاهی و تحلیل قرار دادند. در این بررسی تاثیر ضخامت‌های مختلف لایه جایگزین HPFRCC در پایین تیرهای بتن مسلح بررسی شده است. همچنین در قاب‌ها نیز تاثیر مصالح HPFRCC در بخش‌هایی از ستون و تیر و در چشمه اتصال بررسی شده است و منحنی‌های نیرو-تغییر مکان، الگوهای ترک‌خوردگی، نحوه‌ی تشکیل مفاصل پلاستیک و مقادیر کرنش آرماتورها در این نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. همچنین معادله‌های جدیدی برای محاسبه متغیرهای مختلفی نظیر عمق معادل بلوک تنش فشاری و لنگر مقاوم در تیرهای ترکیبی و HPFRCC کامل ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در سال ۱۳۹۴، ایوبی و همکارش [۱۳]، تیرهای بتن مسلح آسیب دیده را توسط لایه HPFRCC بصورت آزمایشگاهی، بهسازی خمشی کردند. نتایج نشان دادند که بهسازی به طور کلی باعث افزایش مقاومت، بار اولین ترک‌خوردگی و همچنین بار جاری شدگی می‌گردد و همچنین موجب افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی نمونه‌ها گردیده است. در سال ۱۳۹۶، مولودی و همکارانش [۱۴]، رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون بتن آرمه ساخته شده از مصالح HPFRCC را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی که به صورت تحلیلی انجام شده است، تاثیر پارامترهای مختلف اتصال تیر به ستون، مانند طول ناحیه کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند در تیر، طول ناحیه تقویت در ستون، مقاومت فشاری بتن و HPFRCC، فاصله بین خاموت‌ها در تیر و ستون بر عملکرد اتصال بررسی شده است. در سال ۱۳۹۷، حسینی و همکارانش [۱۵]، نمونه‌های بتنی طبق استانداردهای ASTM C1609، ASTM C1399 و ASTM C79 با چهار ترکیب مختلف الیاف ماکروسینتتیک پلیمری را ساخته و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که با افزودن الیاف به نمونه‌های تیرچه بتنی، مقاومت خمشی به میزان حداکثر ۱۶/۹۶ درصد افزایش یافت. همچنین، طاقت خمشی و میانگین مقاومت باقیمانده با افزودن الیاف افزایش یافت. در همین سال شریبتدار و همکارانش [۱۶] به بررسی آزمایشگاهی رفتار چرخه ای ۳ نمونه دیوار برشی کوپله بتنی پرداختند. نمونه اول با بتن معمولی و آرماتور قطری و دورپیچ، نمونه دوم با آرماتور قطری بدون دورپیچ و نمونه سوم بدون آرماتور قطری بودند. نمونه‌های دوم و سوم از بتن HPFRCC ساخته شدند. نتایج نشان داد که حضور الیاف باعث جلوگیری از افزایش عرض و پخش ترک در نمونه‌های HPFRCC نسبت به نمونه بتن معمولی و افزایش میزان جذب انرژی، سختی نمونه‌ها و تاخیر در ایجاد گسیختگی شد و با وجود حذف آرماتور دورپیچ، باعث افزایش ۲۰٪ مقاومت و ۲۷٪ شکل‌پذیری نمونه تیر کوپله HPFRCC نسبت به نمونه مرجع شده است.

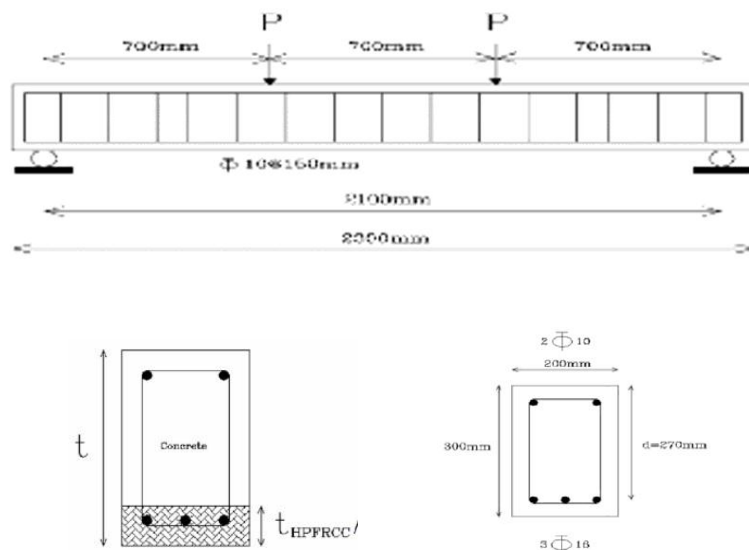
در این مقاله، به بررسی تحلیلی رفتار تیر بتن آرمه دارای پانل‌های پیش ساخته HPFRCC پرداخته شده است. برای این منظور ابتدا تیرهای بتن مسلح و تیر بتن مسلح دارای یک لایه به ضخامت ۶۰ میلی‌متر HPFRCC که جایگزین بتن معمولی شده است و توسط همتی و همکارش [۱۱] به صورت آزمایشگاهی ساخته شده و تحت بارگذاری دو نقطه ای قرار گرفته است، به عنوان نمونه‌های مرجع انتخاب و در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS مدل‌سازی و صحت-سنجی شده است. سپس نمونه‌های مذکور با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسکال مدل‌سازی شده و تاثیر مقاومت بتن در رفتار خمشی تیر بررسی شده است. همچنین نمونه‌هایی با پانل‌های پیش ساخته به ضخامت های ۲۰ و ۴۰ و ۶۰

میلیمتر که به زیر تیر وصله شده اند در نرم افزار مدل سازی شده و تاثیر افزایش ضخامت پانل در شکل پذیری و انرژی جذب شده تیرها بررسی شده است.

## ۲- روش مدل سازی عددی و اعتبارسنجی

دو نمونه تیر، شامل تیر بتن آرمه و تیر بتن آرمه دارای یک لایه تحتانی به ضخامت ۶۰ میلی متر HPCFRCC که توسط همتی و همکاران [۱۱] در سال ۱۳۹۲ ساخته و تحت بارگذاری دو نقطه ای، مورد آزمایش قرار گرفته اند، به عنوان نمونه های مرجع انتخاب و توسط نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده اند سپس نتایج مدل سازی با نتایج آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است. ابعاد و جزئیات تیرها در شکل ۱ نشان داده شده است. در جدول ۱ مشخصات الیاف پلی پروپیلن (PP) مصرفی نشان داده شده است. این الیاف با نسبت حجمی ۱٪ مورد استفاده قرار گرفته اند. در شکل ۲ این الیاف نشان داده شده است. مقاومت فشاری برای نمونه بتنی ۳۵/۷ و برای HPCFRCC، ۲۴ مگاپاسکال می باشد. میلگردهای مصرفی از نوع AIII با مقاومت تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال بوده اند.

در بررسی انجام شده توسط همتی و همکارانش به منظور بررسی رفتار خمشی تیرها، الگوی بارگذاری دو نقطه ای انتخاب شده تا یک بخش خمش خالص در تیرها موجود باشد. بارگذاری به صورت افزایشی و در حالت دو نقطه ای با فاصله ۷۰۰ میلی متر به تیرها اعمال شده است. تکیه گاه های تیر از نوع ساده بوده که به فاصله ۲۱۰۰ میلی متر از یکدیگر قرار گرفتند. کل طول تیر ۲۳۰۰ میلی متر بوده است.



مقطع عرضی تیر بتنی      مقطع عرضی تیر با یک لایه HPCFRCC

شکل ۱- ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری نمونه های آزمایشگاهی [۱۱]

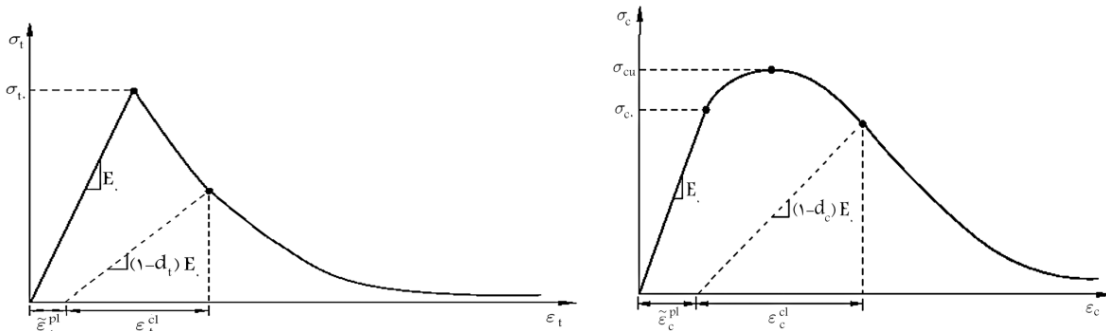
جدول ۱- مشخصات الیاف پلی پروپیلن (PP) [۱۱]

چگالی $(\frac{kg}{m^3})$	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	رنگ	قطر $(\mu m)$	طول (mm)
۰/۹۱	۱۰	۸۰۰	سفید	۱۸	۱۲

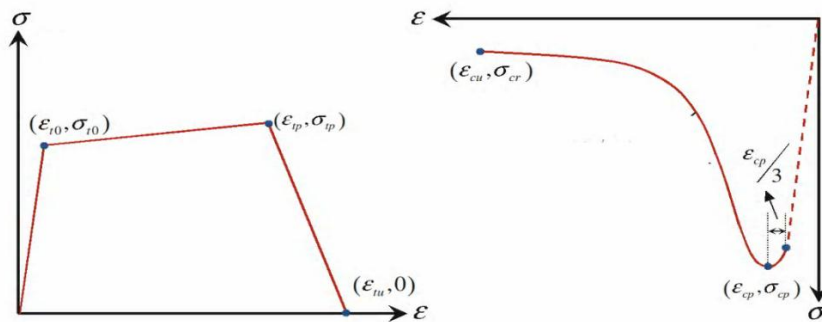


شکل ۲- الیاف پلی پروپیلین (PP)/11

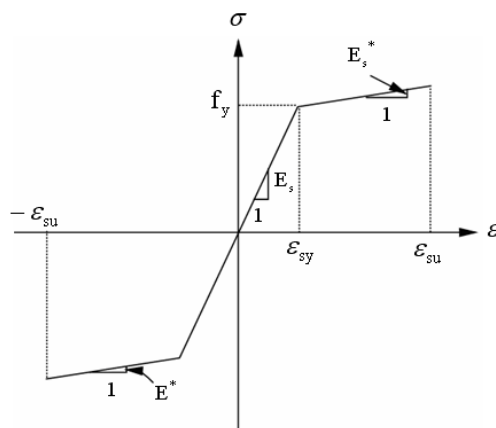
نمونه‌های مرجع انتخاب شده، توسط نرم افزار ABAQUS مدل‌سازی شدند. برای مدل‌سازی بتن از مدل آسیب-دیدگی خمیری استفاده شده است. این مدل قادر به مدل‌سازی ترک‌خوردگی بتن در کشش و خردشدگی آن در فشار است. منحنی‌های تنش - کرنش استفاده شده در نرم افزار برای بتن در شکل ۳ و برای HPFRCC در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در فشار تا تنش  $\sigma_{co}$  (تسلیم اولیه) رفتار بتن الاستیک بوده و رابطه تنش و کرنش به صورت خطی تغییر می‌کند پس از آن بتن وارد رفتار غیرخطی خود شده و تنش قابل تحمل توسط بتن تا حداکثر مقاومت فشاری  $\sigma_{cu}$  افزایش می‌یابد و پس از آن وارد شاخه نرم شوندگی و نزولی منحنی شده و تا مرحله شکست به دلیل خردشدگی که در کرنش نهایی اتفاق می‌افتد پیش می‌رود. در کشش نیز رفتار بتن به صورت خطی تا  $\sigma_{to}$  (مقاومت کششی بتن) ادامه می‌یابد و پس از آن با شروع ترک‌خوردگی در بتن تحت کشش و افزایش عرض ترک‌ها به صورت نزولی و کاهش تنش پیش می‌رود. پارامترهای  $d_t, d_c$  به ترتیب خسارت فشاری و کششی بتن (کاهش سختی بتن) را در اثر باربرداری نشان می‌دهند که با مقادیری بین ۰ تا ۱ مشخص می‌شوند. منحنی تنش کرنش HPFRCC در کشش تا رسیدن به تنش  $\sigma_{t0}$  (تنش متناظر با ترک خوردگی ملات) به صورت خطی افزایش می‌یابد و سپس تا رسیدن به تنش  $\sigma_{pp}$  با شیب کندتری افزایش می‌یابد و پس از آن با بازشدگی و گسترش ترک‌ها شاخه نزولی و نرم‌شوندگی کامپوزیت آغاز شده و تا پارگی یا جدایش الیاف پیش می‌رود. رفتار میلگردهای فولادی مطابق شکل ۵ به صورت دو خطی شامل قسمت ارتجاعی اولیه و سخت‌شدگی در نظر گرفته شده است [۱۱]. رفتار الاستیک فولاد توسط  $E = 2/1 * 10^5 MPa$  و  $\nu = 0/3$  به نرم افزار معرفی شده است. مشخصات مصالح معرفی شده به نرم افزار در جدول های ۲ و ۳ آمده است.



شکل ۳- منحنی تنش-کرنش بتن (الف) تحت فشار (ب) تحت کشش [۱۷]



الف  
ب  
شکل ۴- منحنی تنش-کرنش HSPFRCC تحت (الف) فشار ب) کشش [۱۸]



شکل ۵- منحنی تنش کرنش فولاد [۱۱]

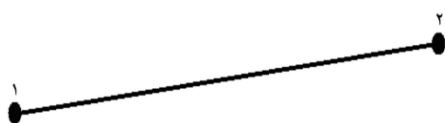
جدول ۲- مشخصات میلگردهای فولادی در مدل‌های تحلیلی

مصالح	$E_s$ (MPa)	$\varepsilon_y$	$f_y$ (MPa)	$\varepsilon_u$	$E_s^*$ (MPa)
فولاد	۲۰۰۰۰۰	۰/۰۰۲	۴۰۰	۰/۱۵	۶۲۰۰

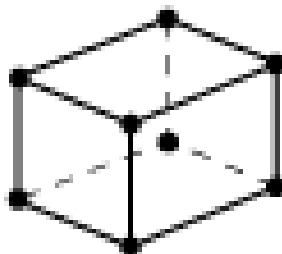
جدول ۳- مشخصات بتن و HSPFRCC مورد استفاده در مدل‌های تحلیلی

مصالح	$E$ (MPa)	$\varepsilon_{cr}$	$f_c$ (MPa)	$\varepsilon_{cu}$	$f_t$ (MPa)
بتن	۲۵۰۰۰	۰/۰۰۰۱۲	۲۵	۰/۰۰۳۵	۳
بتن	۲۸۰۰۰	۰/۰۰۰۱۲۵	۳۵/۷	۰/۰۰۳۵	۳/۵
HSPFRCC	۲۵۰۰۰	۰/۰۰۰۱۴	۲۴	۰/۰۰۰۶	۳/۵

میلگردهای فولادی با قید Embedded region در بتن به صورت مدفون در نظر گرفته شده اند. برای مش بندی اعضای بتنی و کامپوزیت های سیمانی از المان های  $C3D8R$  (المان های آجری توپر هشت گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته) با طول ۵۰ میلی متر و برای آرماتورهای فولادی از المان های  $T3D2$  (المان های خطی دو گرهی خرابایی) استفاده شده است. در شکل های ۶ و ۷ این المان ها نشان داده شده اند. اندازه های انتخابی برای مش ها با سعی و خطا حاصل شده است. در جدول ۴، نامگذاری نمونه ها انجام شده است. مدل ها مطابق بارگذاری آزمایشگاهی تحت بارگذاری افزایشی دونقطه ای قرار گرفتند.



شکل ۷- المان دو گرهی Truss



شکل ۶- المان ۲۰ گرهی مکعبی Solid

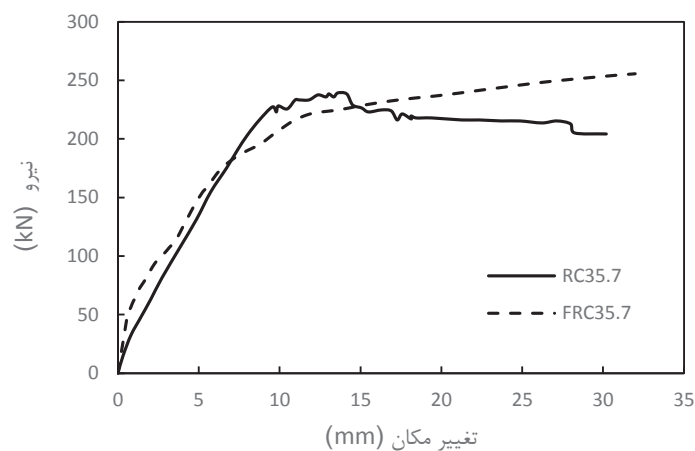
جدول ۴- نامگذاری نمونه های انتخاب شده برای کالیبراسیون

نام نمونه آزمایشگاهی	نام نمونه تحلیلی	معرفی نمونه	توضیحات
RC35.7	FRC35.7	نمونه بتنی کامل	تیر بتن آرمه با مقاومت فشاری ۳۵/۷ مگاپاسکال
HP35.7-60	FHP35.7-60	نمونه ترکیبی	تیر بتن آرمه با یک لایه تحتانی از مصالح HPFRCC به ضخامت ۶۰ میلیمتر

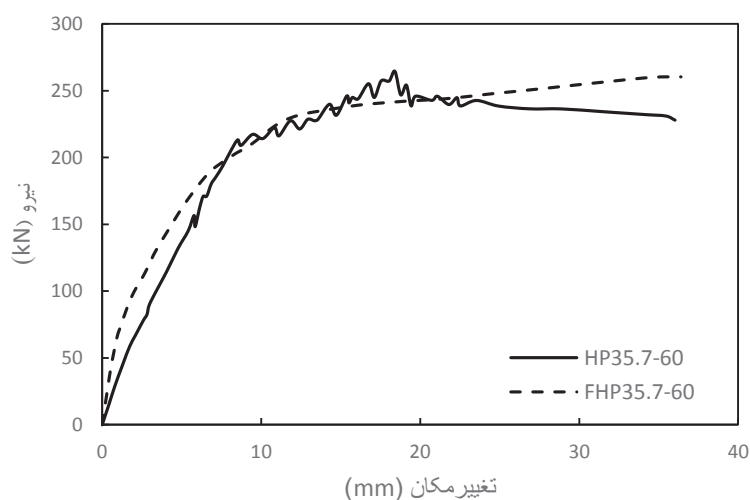
پس از مدل سازی و اعمال بارگذاری، منحنی نیرو - تغییر مکان وسط دهانه تیرها رسم گردیده است. در شکل های ۸ و ۹ منحنی های نیرو - تغییر مکان وسط تیر برای دو مدل تیر بتنی FRC35.7 و تیر ترکیبی FHP35.7-60 که بصورت عددی بدست آمده اند، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با مقایسه منحنی های حاصل از تحلیل و نتایج آزمایش برای دو تیر و همچنین مقایسه خسارت فشاری و کششی بتن در وضعیت نهایی در نمونه های آزمایشگاهی و عددی مشابه در شکل ۱۰ و ۱۱، با توجه به جدول ۵، انطباق قابل ملاحظه ای (با اختلاف ناچیز) در رفتار دو نمونه آزمایشگاهی و عددی مشاهده می گردد.

<sup>2</sup> Continuum Stress/Displacement Three dimensional element 8 node brick reduced integration.

<sup>3</sup> A 2-node linear 3-D truss



شکل ۸- منحنی نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر بتنی آزمایشگاهی (RC35.7) و تحلیلی (FRC35.7)

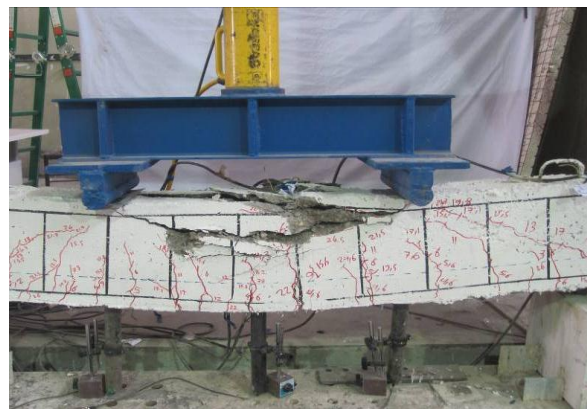
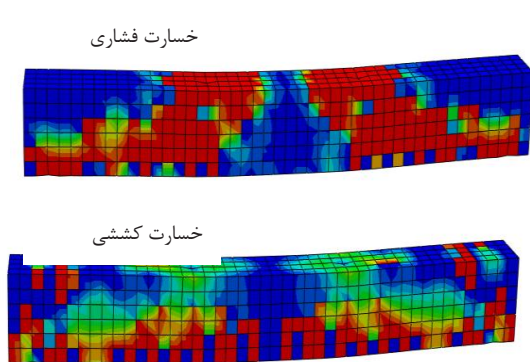


شکل ۹- منحنی نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر بتنی با لایه ۶۰ سانتی HPFRCC آزمایشگاهی (HP35.7-60) و تحلیلی (FHP35.7-60)

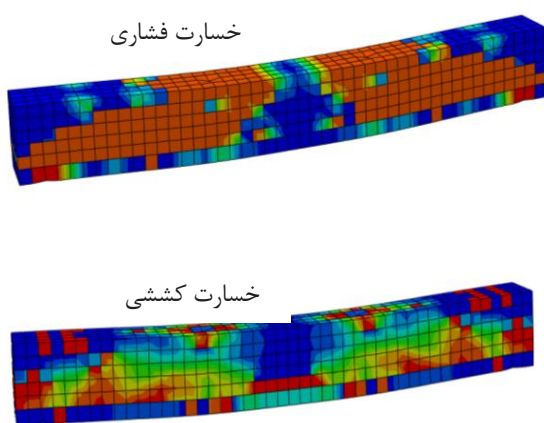
جدول ۵- مقادیر نیرو و تغییر مکان قائم آزمایشگاهی و تحلیلی تیرها

نام نمونه	$P_u (Anal.)$ (kN)	$\Delta_u (Anal.)$ (mm)	$P_u (Exp.)$ (kN)	$\Delta_u (Exp.)$ (mm)	$\frac{P_u (Anal.)}{P_u (Exp.)}$	$\frac{\Delta_u (Anal.)}{\Delta_u (Exp.)}$
RC35.7	-	-	۲۳۹/۸۳	۳۰/۲۵	۰/۹۷	۱/۰۶
FRC35.7	۲۳۲/۶۶	۳۱/۹۸	-	-		
HP35.7-60	-	-	۲۶۴/۳۳	۳۶/۶۱	۰/۹۸	۰/۹۹
FHP35.7-60	۲۶۰/۳۵	۳۶/۴۰	-	-		





شکل ۱۰- وضعیت نهایی تیر بتنی آزمایشگاهی و آسیب های فشاری و کششی تیر FRC35.7



شکل ۱۱- وضعیت نهایی تیر آزمایشگاهی HP35.7-60 و آسیب های فشاری و کششی تیر FHP35.7-60

#### ۴- معرفی نمونه های تحلیلی اجزای محدود

به منظور بررسی تاثیر دو روش مقاوم سازی تیر بتنی توسط HPFRCC (تیر بتنی دارای یک لایه مصالح کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند که جایگزین بتن معمولی شده است و تیر بتنی دارای پانل با مصالح ذکر شده)، تیر بتنی تقویت شده با پانل HPFRCC به ضخامت ۶۰ میلی متر مدل سازی شده و تحت بارگذاری دو نقطه ای قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی میزان تاثیر ضخامت پانل بر رفتار تیر بتنی دو تیر دیگر دارای پانل HPFRCC با ضخامت های ۲۰ و ۴۰ میلی متر مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات نمونه های مدل شده، در جدول ۶ ذکر شده است. در نامگذاری نمونه ها F، حرف اول کلمه المان محدود (Finite element) و P نشان دهنده استفاده از پانل در تقویت و HP، برگرفته از HPFRCC و RC مخفف Reinforcement concrete می باشد. عدد اول نشان دهنده مقاومت بتن بر حسب مگاپاسکال و عدد دوم نشان دهنده ضخامت لایه جایگزین یا پانل HPFRCC بر حسب میلی متر است. مقاومت فشاری HPFRCC در کلیه نمونه ها ۲۴ مگاپاسکال است. برای مدل سازی پانل های HPFRCC از المان های

C3D8R<sup>۴</sup> (المان های آجری توپر هشت گرهی با انتگرال گیری کاهش یافته) با طول ۵۰ میلی متر و همان مصالح معرفی شده در قسمت پیشین استفاده شده است.

جدول ۶- نامگذاری نمونه تیرهای مدل شده

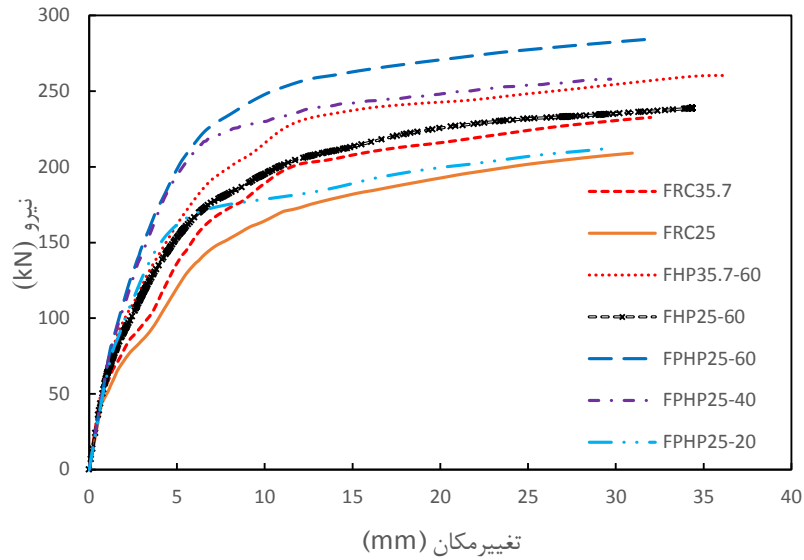
ردیف	نام نمونه	نوع نمونه	مقاومت فشاری بتن (MPa)	مقاومت فشاری HPCRCC (MPa)	ضخامت لایه HPCRCC جایگزین (mm)	ضخامت پانل HPCRCC (mm)
۱	FRC35.7	تیر بتنی	۳۵/۷	-	-	-
۲	FRC25	تیر بتنی	۲۵	-	-	-
۳	FHP35.7-60	تیر ترکیبی	۳۵/۷	۲۴	۶۰	-
۴	FHP25-60	تیر ترکیبی	۲۵	۲۴	۶۰	-
۵	FPHP25-60	تیر ترکیبی	۲۵	۲۴	-	۶۰
۶	FPHP25-40	تیر ترکیبی	۲۵	۲۴	-	۴۰
۷	FPHP25-20	تیر ترکیبی	۲۵	۲۴	-	۲۰

## ۵- نتایج و تفسیر آن ها

### ۵-۱- اثر تقویت تیر با مصالح HPCRCC در ظرفیت باربری تیر

منحنی نیرو - تغییرمکان قائم وسط دهانه تیر برای نمونه های تحلیلی در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در جدول ۷، نتایج مدل های تحلیلی بررسی شده ذکر شده است. حداکثر نیروی تحمل شده در نمونه های FRC25 و FRC35.7 و FHP25-60 و FHP35.7-60 به ترتیب ۲۰۹/۰۸، ۲۳۲/۶۶، ۲۳۸/۷۲، ۲۶۰/۳۵ کیلو نیوتن بدست آمده است. ظرفیت باربری تیر FHP25-60 نسبت به تیر بتنی FRC25 به میزان ۱۴/۱۸٪ و ظرفیت باربری تیر FHP35.7-60 نسبت به تیر بتنی FRC35.7 به میزان ۱۱/۹۰ درصد افزایش داشته است. با مقایسه ظرفیت باربری تیرهای FHP25-60 و FHP35.7-60 تاثیر مقاومت بتن در میزان افزایش ظرفیت باربری تیرهای تقویت شده قابل مشاهده است. بار تحمل شده تیر FHP35.7-60 نسبت به تیر FHP25-60 به میزان ۹/۰۶ درصد افزایش یافته است. همچنین حداکثر بار قابل تحمل توسط نمونه های FPHP25-60 و FPHP25-40 و FPHP25-20 به ترتیب ۲۷۴/۲۰، ۲۵۷/۹۲ و ۲۱۲/۱۱ کیلونیوتن بدست آمده است. استفاده از پانل HPCRCC به صورت وصله به تیر در تیر FPHP25-60 نسبت به تیر بتنی FRC25 و FHP25-60 به ترتیب به میزان ۳۱/۱۴٪ و ۱۴/۸۶٪ افزایش داشته است. همچنین با افزایش ضخامت پانل در تیرهای FPHP25-20 و FPHP25-40 و FPHP25-60، میزان حداکثر بار تیر نسبت به تیر FRC25 به ترتیب به میزان ۱/۴۵٪، ۲۳/۳۶٪، ۳۱/۱۴٪ و نسبت به تیر FHP25-60 به ترتیب به میزان ۱۱/۱۵٪ و ۸/۰۴٪ و ۱۴/۸۶٪ تغییر داشته است.

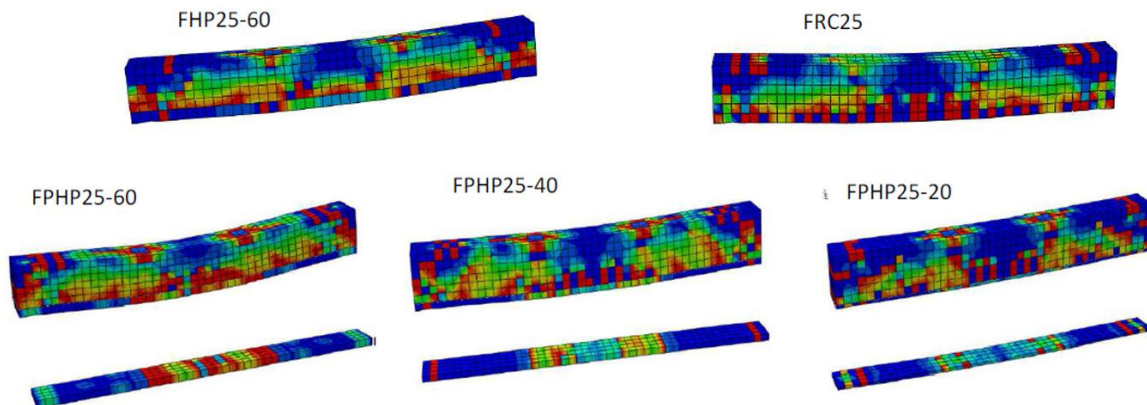
<sup>4</sup> Continuum Stress/Displacement Three dimensional element 8 node brick reduced integration.



شکل ۱۲- منحنی های نیرو-تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیرهای تحلیلی بررسی شده

جدول ۷- نتایج مدل های تحلیلی بتنی و HPCFRCC نمونه های بررسی شده

نام مدل	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$M_u$ (kN.m)
FRC35.7	۱۹۰/۱۲	۸/۰۰	۲۳۲/۶۶	۳۱/۹۸	۸۱/۴۳
FRC25	۱۵۶/۱۸	۸/۵۳	۲۰۹/۰۸	۳۰/۹۳	۷۳/۱۸
FHP35.7-60	۲۱۸/۵۶	۷/۵۶	۲۶۰/۳۵	۳۶/۴۰	۹۱/۱۲
FHP25-60	۱۸۲/۵۱	۷/۹۷	۲۳۸/۷۲	۳۴/۳۵	۸۳/۵۵
FPHP25-60	۲۲۰/۸۵	۶/۳۷	۲۷۴/۲۰	۳۱/۷۴	۹۵/۹۷
FPHP25-40	۲۰۹/۷۵	۵/۹۸	۲۵۷/۹۲	۲۹/۷۱	۹۰/۲۷
FPHP25-20	۱۶۹/۰۶	۶/۰۲	۲۱۲/۱۱	۲۹/۵۶	۷۴/۲۴



شکل ۱۳- خسارت های کششی بتن و HPCFRCC در نمونه های تحلیلی بررسی شده

## ۵-۲- بررسی شکل پذیری و سختی و جذب انرژی مدل های تحلیلی

میزان شکل پذیری اتصالات براساس نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان نظیر اولین تسلیم شدگی بدست آمده از نمودار دو خطی نیرو - جابه جایی مطابق رابطه ۱ تعریف می شود.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

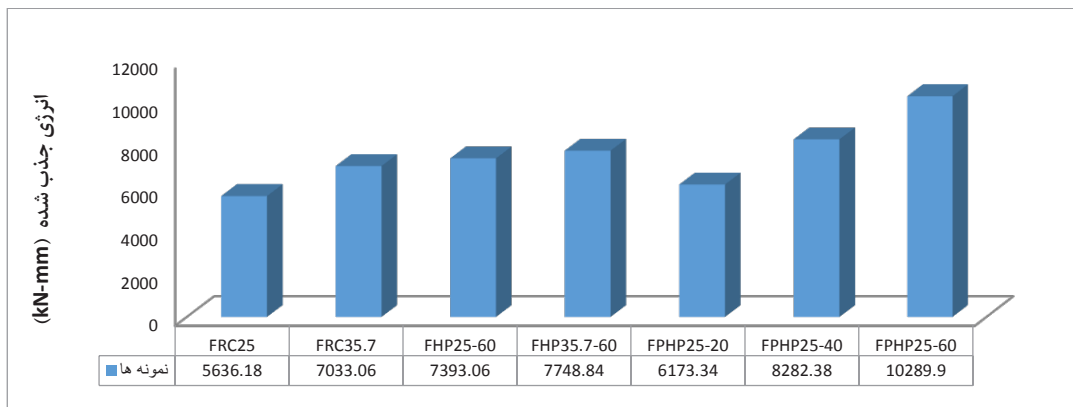
تغییرمکان نهایی برابر کمترین مقدار بین تغییرمکان حداکثر اتصال و تغییرمکان نظیر ۱۵ درصد افت بار حداکثر، در نظر گرفته می شود. در این بررسی به دلیل عدم دسترسی به تغییر مکان نظیر افت ۱۵ درصدی بار، از معیار خردشدگی بتن یعنی رسیدن کرنش بتن به کرنش نهایی و یا تشکیل مفصل در تیر استفاده شده است. در جدول ۸ شکل پذیری نمونه ها بدست آمده است.

جدول ۸- شکل پذیری تیرهای بررسی شده

نام مدل	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	میزان افزایش
FRC25	۱۵۶/۱۸	۸/۵۳	۳۰/۹۳	۳/۶۳	۱
FRC35.7	۱۹۰/۱۲	۸/۰۰	۳۱/۹۸	۳/۹۹	۱/۱
FHP35.7-60	۲۱۸/۵۶	۷/۵۶	۳۶/۴۰	۴/۸۱	۱/۳۲
FHP25-60	۱۸۲/۵۱	۷/۹۷	۳۴/۳۵	۴/۳۱	۱/۱۹
FPHP25-60	۲۲۰/۸۵	۶/۳۷	۳۱/۷۴	۴/۹۸	۱/۳۷
FPHP25-40	۲۰۹/۷۵	۵/۹۸	۲۹/۷۱	۴/۹۷	۱/۳۷
FPHP25-20	۱۶۹/۰۶	۶/۰۲	۲۹/۵۶	۴/۹۱	۱/۳۵

به طوری که مشاهده می شود استفاده از پانل HPRCC به طور متوسط موجب افزایش شکل پذیری تیر بتنی به میزان ۳۶٪ شده است. استفاده از پانل به دلیل افزایش سختی تیر، جابه جایی معادل حد تسلیم کاهش یافته در نتیجه با توجه به تعریف شکل پذیری، شکل پذیری اتصال افزایش یافته است. همچنین شکل پذیری نمونه های دارای لایه ۶۰ میلیمتری HPRCC به صورت لایه جایگزین بتن نسبت به نمونه های بتنی کامل تقریباً ۲۰ درصد افزایش یافته است. شکل پذیری تیر FPHP25-60 نسبت به FHP25-60، ۱۵/۵۵٪ افزایش یافته است.

برای نمونه ها که تحت بارگذاری دو نقطه ای قرار گرفته اند، سطح زیر منحنی نیرو - جابه جایی وسط دهانه به عنوان معیاری برای انرژی جذب شده در نظر گرفته شده است در شکل ۱۴ مقایسه انرژی جذب شده نمونه ها، نشان داده شده اند.



شکل ۱۴- مقایسه انرژی جذب شده نمونه تیرهای تحلیلی بررسی شده

به طوری که مشاهده می شود استفاده از پانل HPFRCC، در نمونه های FPHP25-60 و FPHP25-40 و FPHP25-20، در نمونه های ۸۲/۵۷٪ و ۴۶/۹۵٪ و ۹/۵۳٪ شده است. هرچه افزایش ضخامت بیشتر باشد میزان این افزایش نیز بیشتر می شود. همچنین جذب انرژی نمونه های دارای لایه ۶۰ میلیمتری HPFRCC به صورت لایه جایگزین بتن نسبت به نمونه های بتنی کامل به طور متوسط به میزان ۲۰ درصد افزایش یافته است. میزان انرژی جذب شده تیر FPHP25-60 نسبت به FPHP25-60، ۳۹٪ افزایش یافته است. که این امر نشان دهنده عملکرد مطلوب پانل HPFRCC در اتلاف انرژی حاصل از زلزله می باشد.

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر پانل های کامپوزیتی سیمانی با الیاف توانمند در تقویت خمشی تیرهای بتنی به صورت تحلیلی بررسی شده و با نتایج حاصل از تقویت خمشی تیر با HPFRCC بصورت لایه جایگزین در زیر تیر، مقایسه شده است. از این بررسی نتایج زیر بدست آمده است:

۱- مقایسه منحنی های بار- تغییر مکان نمونه های عددی تقویت شده نشان داد که ظرفیت باربری تیر تقویت شده با مصالح HPFRCC بصورت لایه جایگزین نسبت به تیر بتنی به طور متوسط ۱۳ درصد افزایش یافته است؛ در حالی که استفاده از پانل ۶۰ میلیمتری در تقویت تیر بتنی به میزان ۳۱/۱۴ درصد ظرفیت باربری تیر را افزایش داده است. یعنی ۱۴/۸۶ درصد افزایش در ظرفیت باربری تیر تقویت شده به صورت پانل نسبت به تیر تقویت شده به صورت لایه جایگزین مشاهده شده است. مصالح HPFRCC تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت شونده گی کرنش از خود بروز داده و تا رسیدن به کرنش های نسبتاً زیاد کشش وارده را تحمل می کند و در نتیجه باعث افزایش مقاومت کششی می شوند.

۲- با افزایش ضخامت پانل از ۲۰ به ۶۰ میلیمتر میزان حداکثر بار قابل تحمل تیر تقویت شده نسبت به تیر بتنی از ۱/۴۵ درصد تا ۳۱/۱۴ درصد افزایش یافته است.

۳- استفاده از پانل HPFRCC به طور متوسط شکل پذیری تیر را نسبت به تیر بتنی کامل به میزان ۳۶٪ افزایش داد. همچنین تقویت تیر با HPFRCC به صورت پانل نسبت به تقویت بصورت لایه جایگزین، موجب افزایش شکل پذیری به میزان ۱۵/۵۵٪ شده است. مکانیزم های پل زدگی الیاف باعث کاهش گسیختگی ترد و افزایش شکل پذیری شده است.

۴- میزان جذب انرژی نمونه های FPHP25-60 و FPHP25-40 و FPHP25-20 نسبت به تیر بتنی کامل به ترتیب به میزان ۸۲/۵۷٪ و ۴۶/۹۵٪ و ۹/۵۳٪ افزایش یافته است. همچنین میزان جذب انرژی تیر دارای پانل ۶۰ میلیمتری نسبت به تیر تقویت شده با لایه جایگزین HPFRCC به میزان ۳۹ درصد افزایش نشان داد که این امر نشان دهنده عملکرد مطلوب پانل HPFRCC در اتلاف انرژی حاصل از زلزله است.

- [1] 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 (HPFRCC4)*, *Proceeding of the Fourth International RILEM Workshop*, pp. 1-4.
- [2] Mishra D, and Li V. C. (1995). *Performance of ductile plastic hinge designed with ECC*. UMCEE Rep. No. 9506, University of Michigan.
- [3] Parra-Montesinos G.J, Peterfreund S.W, and Chao, S.H.(2005). *Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high-performance fiber-reinforced cement composites*. *ACI Structural Journal*, 102(3), PP. 487-495.
- [4] Yun H D, Byun J B, Jeon SM, and Hwang SK. (2006). *Compressional behavior of HPFRCC columns under axial loads*. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 22(10), pp. 29-36.
- [5] Kim JHJ, Lim YM, Won J.P, Park HG, and Lee KM. (2007). *Shear capacity and failure behavior of DFRCC repaired RC beams at tensile region*. *Journal of Engineering Structure*, Vol. 29, No. 1, pp. 121-131.
- [6] Yoo C H, Choi HK, Choi YC, and Choi CS. (2009). *Development of precast concrete beam-column connections with steel connector and engineered cementitious composite columns under axial loads*. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 29, No. 1, pp. 335-338.
- [7] Cho CG, Kim YY, Feo L, and Hui D. (2012). *Cyclic responses of reinforced concrete composite columns strengthened in the plastic hinge region by HPFRC mortar*. *Journal of Composite Structure*, Vol. 94, No. 7, pp. 2246-2253.
- [8] Park WS, Kim JE, Kim SW, Yun SH, Eom NY, and Yun HD.(2013). *Panel Shear Strength of Steel Coupling Beam-Pseudo Strain Hardening Cementitious Composite Wall Connection*. *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol.328, pp. 965-969.
- [9] Hemmati A, Kheyroddin A, Sharbatdar, M.K, Park Y, and Abolmaali A. (2016). *Ductile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composite (HPFRCC) frames*. *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 115, pp.681-689.
- [10] Hemmati A, Kheyroddin A, and Sharbatdar, M.K. (2015). *Plastic hinge rotation capacity of reinforced HPFRCC beams*. *ASCE's Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 2.
- [۱۱] همتی، علی، (۱۳۹۲)، بررسی رفتار خمشی تیرها و قاب های بتن مسلح کامپوزیتی الیافی توانمند، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.
- [۱۲] همتی علی، خیرالدین علی، شربتدار محمدکاظم، (۱۳۹۲)، بررسی عددی افزایش ظرفیت باربری قاب بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند، مجله مهندسی عمران شریف، دوره ۲۹-۲، شماره ۳، ۹۷-۱۰۶.
- [۱۳] ایوبی جواد، شربتدار محمدکاظم، ۱۳۹۴، بهسازی خمشی تیرهای بتن مسلح آسیب دیده توسط لایه HPFRCC، دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، تبریز.
- [۱۴] مولودی فرزین، خیرالدین علی، همتی علی، ۱۳۹۶، بررسی رفتار لرزه ای اتصالات تیر به ستون بتن آرمه ساخته شده از کامپوزیت های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC)، مهندسی عمران مدرس، دوره هفدهم، شماره ۳، ۲۱۳-۲۲۵.
- [۱۵] دانشفر محمد، حسنی ابوالفضل، محمد علیها محمدرضا، ۱۳۹۷، بررسی عملکرد خمشی بتن الیافی با ترکیبهای مختلف الیاف ماکروسینتتیک، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، سال چهارم، پیاپی سیزدهم، ۲۷-۴۰.
- [۱۶] شربتدار محمدکاظم، شایانی احسان، خیرالدین علی، ۱۳۹۷، بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوار برشی کوبله با استفاده از بتن الیافی توانمند HPFRCC در تیر رابط با آرایش آرماتورگذاری متفاوت، مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۴، شماره ۲/۲، ۳-۱۳.
- [17] Help of ABAQUS. 2008. "Getting started with ABAQUS".
- [18] Gencturk B, Elnashai AS, (2012). *Numerical modeling and analysis of ECC structures, materials and structures*, 46(4), 663-682.