

## بهسازی اتصالات ضعیف پایه های قابی شکل پل های بتنی با استفاده از کامپوزیت

### سیمانی الیافی و نبشی های فولادی

نعمت اله حیدریان، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

محمد کاظم شربتدار\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

آزاده حقیقت، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

Email: msharbatdar@semnan.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۷ - پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰

#### چکیده

اتصالات تیر به ستون از نقاط حساس و آسیب پذیر در پایه های قاب‌های خمشی پل ها هستند و آسیب دیدگی این ناحیه در برابر بارهای جانبی زلزله منجر به کاهش عملکرد لرزه‌ای قاب و افزایش جابه‌جایی قاب و در نهایت تخریب اعضاء و حتی تخریب کل سازه پل می شود. با توجه به اهمیت چشمه اتصال در این قاب‌ها، اجرای صحیح و مطابق جزئیات آیین نامه‌ها تاثیر بسزایی در عملکرد لرزه‌ای قاب دارد. در این مقاله، تاثیر خاموت ناحیه چشمه اتصال در یک اتصال بتن آرمه پایه پل ها با مقیاس یک دوم، به صورت آزمایشگاهی و عددی، تحت بار لرزه‌ای رفت و برگشتی مورد بررسی قرار گرفته و سپس یک اتصال ضعیف دیگر فاقد خاموت در چشمه اتصال، با استفاده از مصالح کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند (HPFRCC)، مقاوم‌سازی شده و تاثیر آن در عملکرد اتصال و میزان جبران فقدان خاموت چشمه اتصال بررسی شده است. همچنین به منظور بررسی حالات مختلف تقویت اتصال پایه های پل، هفت نمونه تحلیلی مختلف معرفی شده و تاثیر پانل‌های مختلف HPFRCC در بهسازی اتصال و تقویت اتصال بتنی ضعیف توسط نبشی‌های پیش‌تنیده فولادی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق، منحنی های هیستریزس بار- تغییر مکان و پوش آن‌ها و منحنی های استهلاک انرژی و سختی و افت سختی اتصالات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از افزایش ظرفیت خمشی و شکل پذیری و کاهش سریع افت سختی اتصال در سیکل‌های اولیه در اتصال دارای HPFRCC در محل اتصال، نسبت به اتصال فاقد خاموت در چشمه اتصال قاب های بتنی پل‌ها بوده است. استفاده از پانل‌های کامپوزیتی سیمانی با الیاف توانمند، ماکزیمم ظرفیت باربری اتصال پایه پل بتنی را نسبت به اتصال ضعیف از ۱۷ تا ۴۸ درصد، افزایش داد.

واژه های کلیدی : اتصال خمشی بتن آرمه، کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند، شکل پذیری، نبشی پیش تنیده، پایه های پل

#### ۱. مقدمه

آسیب دیده در زلزله‌های گذشته نشان داده است که تمرکز آسیب و خرابی‌ها در اتصالات تیر به ستون، منجر به ناپایداری جزئی و کلی پل می‌شود. اتصالات تیر به ستون بتنی پایه پل‌ها که بصورت خارجی هستند به دلیل عدم پیوستگی هندسی و شرایط محصورشدگی کمتر

اتصالات تیر به ستون از مهم‌ترین بخش‌های پایه های قابی خمشی بتن آرمه پل‌ها به شمار می‌روند به طوری که آسیب در این نواحی می‌تواند یکپارچگی و پایداری کلی سازه پل را از بین ببرد. بررسی قاب‌های خمشی بتنی

نوعی به اثر مثبت استفاده از این مصالح کامپوزیتی در بخش های مختلف سازه اشاره دارند. مالچ و همکاران (۲۰۰۲) با بررسی تیرهای بتن مسلح با لایه تحتانی HPFRCC، افزایش ظرفیت خمشی و کاهش ترک خوردگی و خیز تیر را نتیجه گرفتند. فیشر و لی (۲۰۰۲) ستون های بتن آرمه HPFRCC را تحت بار جانبی مورد مطالعه قرار دادند. ماهری و همکاران (۲۰۰۴) تیرهای بتنی را با مصالح HPFRCC مقاوم سازی کردند. کنبلات (۲۰۰۵) به بررسی تیر رابط در دیوار برشی کوبله با مصالح HPFRCC پرداخته است. پارامونتسینوس و همکاران (۲۰۰۵) تاثیر توانمند سازی ناحیه اتصال با HPFRCC را مورد بررسی قرار داده اند. افزایش شکل پذیری و کاهش عرض ترک، از نتایج مشهود این تحقیقات بوده است. همچین یون و همکاران (۲۰۰۶) 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 شکل پذیری ستون، حتی با حذف خاموت دست یافتند. کیم و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی تاثیر HPFRCC در مقاوم سازی تیر بتن مسلح پرداختند. آن ها 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 میلی متر با و بدون خاموت مورد آزمایش قرار دادند. با استفاده از HPFRCC مقاومت برشی و شکل پذیری تیرها به خصوص در تیرهای بدون خاموت افزایش یافت. یو و همکارانش (۲۰۰۹) اتصال تیر به ستون بتن آرمه را با ورق کامپوزیت الیافی پیش ساخته تقویت کردند. نتایج تحقیقات آن ها 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

نسبت به اتصالات تیر به ستون داخلی ساختمان ها آسیب پذیرتر هستند. در ایران بسیاری از پل ها یا ساختمان ها با سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی بتنی ساخته می شوند که در اینگونه سازه ها عموماً به دلیل عدم اجرای خاموت چشمه اتصال و یا اجرای آن به صورت U شکل به جای تنگ بسته، در اجرا با نواقصی همراه است. در نتیجه این اتصالات دارای نقص، در سیکل های چرخه ای بالا عملکرد مناسبی ندارند و منجر به ناکارآمدی سیستم در برابر بارهای جانبی می گردند که در نهایت کاهش ظرفیت باربری سازه، ایجاد مفصل پلاستیک در ناحیه اتصال، افزایش تغییر مکان جانبی پایه پل ها را به همراه دارد.

در دهه های اخیر، استفاده از کامپوزیت های پلیمری پایه سیمانی برای بهبود عملکرد سازه های بتن مسلح و مقاوم سازی و بهسازی لرزه ای اعضای آن ها، گسترش زیادی یافته است. کامپوزیت های سیمانی مسلح با الیاف توانمند (HPFRCC<sup>۱</sup>) به مصالحی شامل ملات سیمانی با سنگدانه های ریزدانه و الیاف اطلاق می شود. ویژگی های شاخص این مصالح آن است که تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت شوندگی کرنش از خود بروز می دهند و با بروز ترک چندگانه تا رسیدن به کرنش های نسبتاً زیاد کشش وارده را تحمل می کنند. کامپوزیت های FRC به ویژه زمانی که به عنوان یک مصالح جایگزین جهت بهبود عملکرد مدنظر قرار می گیرد لازم نیست که در تمامی بخش های سازه یا پل استفاده شود و معمولاً در بخش های کوچکی از سازه که نیاز به بهبود عملکرد آن ناحیه می باشد و یا نیاز به مقاوم سازی و بهسازی دارد به کار برده می شود. در چنین مواردی استفاده از این کامپوزیت ها اقتصادی و قابل رقابت با سایر مصالح می باشد. از سال ۲۰۰۲ تاکنون، تحقیقات متعددی به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی جهت بررسی رفتار HPFRCC و تاثیر آن در بهبود عملکرد سازه ها صورت گرفته است که همگی به

تحقیقات نمونه های شامل تیرهای بتنی توانمند شده در بخشی از مقطع کششی و بهسازی شده کل تیر با کامپوزیت های الیافی، تحت بارگذاری خمشی دو نقطه ای قرار گرفت و نتایج با تیرهای مرجع RC مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین قاب های یک دهانه RC و قاب های ترکیبی RCH که در چشمه اتصال و بخش های از ستون و تیر توسط مصالح کامپوزیت الیافی توانمند، مسلح گردیده بودند تحت بارگذاری جانبی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به سبب رفتار سخت شونده گی کرنشی HPFRCC، عمق تار خشی مقطع و به دنبال آن ممان مقاوم تیر نسبت به تیر بتنی مرجع افزایش یافته و همچنین میزان انحناء و طول مفصل پلاستیک در قاب های RH بررسی شده، به ترتیب حدود ۲۲ تا ۳۰ درصد و ۲،۰۶ تا ۲،۴۳ برابر نسبت به قاب RC افزایش نشان داد. از دیگر روش های تقویت اتصال می توان به اتصالات کامپوزیت بتنی - فولادی اشاره کرد. امامی و همکاران (۲۰۱۰) و (۲۰۱۲) اتصال بتنی ضعیف با ارتفاع کم را با سیستم پیشنهادی دستک و طوقه فلزی به صورت آزمایشگاهی مقاوم سازی کردند. نتایج نشان داد که این سیستم مقاوم سازی با افزایش مقاومت و کاهش افت سختی و بالا بردن جذب انرژی اتصال نسبت به اتصال ضعیف، میزان خسارت های ناشی از بارهای جانبی رفت و برگشتی ناحیه اتصال را کاهش داد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۵)، کاربرد کامپوزیت های سیمانی مهندسی با الیاف پروپیلن (PP-ECC) را در اتصالات تیر به ستون پل های راه آهن با قاب های صلب در کاهش آرماتورهای عرضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که جایگزینی PP-ECC به جای آرماتورهای عرضی در اتصالات تیر- ستون پل های راه آهن با قاب های صلب موثر می باشد. تقفی و همکاران (۲۰۱۶)، مقاوم سازی اتصالات تیر به ستون پل های راه آهن با قاب های صلب، توسط کامپوزیت های سیمانی الیافی توانمند را به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج

سختی اولیه نمونه تقویت شده بود. چوی و همکاران (۲۰۱۰) به مطالعه دیوار بنایی مقاوم شده با مصالح HPFRCC پرداختند. در این تحقیق کامپوزیت های الیافی با ۲٪ از الیاف PVA با ضخامت ۳۰ میلی متر بر روی دیوار با مصالح ماسونری پاشیده شد. سختی و مقاومت و شکل پذیری دیوار تقویت شده تحت بار رفت و برگشتی نسبت به دیوار تقویت نشده افزایش یافت. تحقیق دیگری توسط چو و همکاران (۲۰۱۲)، جهت مقاوم سازی ستون های تحت بار جانبی، با استفاده از HPFRCC انجام شد. آن ها 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 شکل پذیری و سختی در نمونه بهسازی شده، نسبت به نمونه مرجع بودند. همچنین آن ها بهبود رفتار ستون بهسازی شده با HPFRCC به دلیل سخت شونده گی کرنش، در اثر وجود الیاف را نتیجه گرفتند. پارک و همکاران (۲۰۱۳) 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 ترک ها نتیجه شد. تحقیق دیگری توسط بدیرهانوقلو و همکاران (۲۰۱۳) انجام شد. آن ها از صفحات پیش ساخته کامپوزیت الیافی برای بهسازی لرزه ای اتصالات تیر به ستون بتنی استفاده کردند. برای این منظور پانل های پیش ساخته کامپوزت الیافی، با چسب اپوکسی و پیچ به وجه خارجی اتصال متصل گردید. نتایج نشان داد ورق های پیش ساخته HPFRCC، ظرفیت برشی اتصال را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید و خرابی را نیز به تاخیر انداخت. همتی و همکاران (۲۰۱۲-۲۰۱۶) تحقیقاتی برای بررسی رفتار خمشی تیرها و قاب های بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت های الیافی توانمند صورت پذیرفت. در این

HPFRCC به ضخامت ۴۰ میلی متر و نبشی ها و بولت- های پیش تنیده پرداخته شده است. و بدین ترتیب تاثیر طرح های مختلف تقویت در عملکرد و بهسازی اتصال مطالعه شده است.

#### معرفی نمونه های آزمایشگاهی

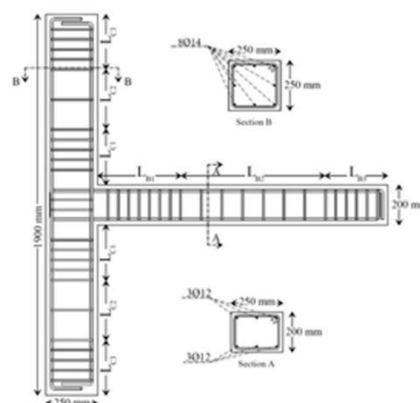
سه نمونه اتصال گوشه منتخب از یک پایه بتنی قابی شکل پل شامل اتصال بتنی مرجع و اتصال بتنی ضعیف فاقد خاموت در چشمه اتصال و اتصال فاقد خاموت در چشمه اتصال که توسط الیاف کامپوزیت ۱٫۵ درصد در ناحیه چشمه اتصال و ناحیه ویژه تیر تقویت شده، توسط آیین نامه ACI-318-05 طراحی و با مقیاس یک دوم تا یک چهارم بستگی به ارتفاع پایه ساخته شدند و تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند که به تناسب ظرفیت آزمایشگاه میتواند رفتار واقعی نمونه ها را نشان دهد. جزئیات آرماتورگذاری نمونه بتنی مرجع در شکل ۱ و جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه دوم (اتصال ضعیف بتنی)، دارای جزئیاتی کاملا مشابه نمونه مرجع می باشد. که در آن خاموت ناحیه چشمه اتصال حذف شده است. نمونه سوم نمونه کامپوزیتی است که دارای جزئیاتی کاملا مشابه اتصال بتنی ضعیف است؛ با این تفاوت که ناحیه چشمه اتصال و بخشی از تیر در ناحیه ویژه تیر در طولی برابر دو برابر ارتفاع مقطع تیر، با استفاده از کامپوزیت سیمانی مسلح شده با الیاف (HPFRCC) توانمند شده و در سایر مقاطع از همان بتن معمولی مشابه دو اتصال دیگر استفاده شده است. در این تحقیق از HPFRCC از نوع کامپوزیت سیمانی مهندسی (ECC) با الیاف پلی پروپیلن (PP) استفاده شده است. بتن معمولی استفاده شده در نمونه ها دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۵ مگاپاسکال و میلگرد مصرفی دارای مقاومت تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال می باشد. مشخصات بتن و میلگرد و طرح اختلاط بتن و الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده به ترتیب در جداول ۲ تا ۵ ارائه شده است. همچنین الیاف

نشان داد که افزودن الیاف باعث افزایش محسوس مقاومت کششی نمونه ها می شود و همچنین مکانیزم های چقرمگی مانند پل زدن الیاف باعث استهلاک انرژی و کاهش گسیختگی ترد می گردد. همچنین نتایج نشان داد که رفتار اتصالات تیر- ستون خارجی بهسازی شده با پانل های HPFRCC سبب ۹۳٪ افزایش شکل پذیری، ۴۵٪ افزایش مقاومت جانبی و ۱۰۲٪ افزایش تغییر مکان جانبی نسبی به اتصال مینا بتنی گردید. لاوراتو و همکارانش (۲۰۱۷)، تاثیر استفاده از ژاکت های کامپوزیت سیمانی الیافی توانمند را با تاثیر استفاده از بتن خودمترکم و CFRP، در بهسازی لرزه ای پل های بتنی ایتالیا و چین مقایسه کردند. راه کارهای پیشنهادی، روی آرماتورهای فولادی و و بخش های آسیب دیده بتنی در ناحیه مفصل پلاستیک، جهت اطمینان از کاهش انرژی لرزه ای و تامین مقاومت برشی لازم و بهبود شکل پذیری به کار برده شد. در این مقاله تاثیر حذف خاموت چشمه اتصال در اتصال تیر به ستون به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی شده و سپس با جایگزینی بتن معمولی با بتن الیافی توانمند HPFRCC در ناحیه چشمه اتصال و ناحیه ویژه تیر اثر مخرب فقدان خاموت را کاهش داده و رفتار اتصال ضعیف فاقد خاموت در چشمه اتصال تحت بار چرخه ای بهسازی شده است. برای این منظور سه نمونه اتصال تیر به ستون گوشه در پایه های پل شامل اتصال مرجع بتنی، اتصال ضعیف با حذف خاموت های ناحیه اتصال و اتصال توانمند شده با مصالح HPFRCC به صورت جایگزینی بتن معمولی با بتن الیافی توانمند در ناحیه چشمه اتصال و ناحیه ویژه تیر، به صورت آزمایشگاهی ساخته شده و تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفتند و سپس نمونه های تحلیلی این نمونه ها در نرم افزار آباکوس مدل سازی و تحت بار چرخه ای مورد تحلیل قرار گرفتند. سپس با استفاده از تحلیل عددی توسط نرم افزار اجزای محدود ABAQUS به بررسی طرح های مختلف تقویت توسط پانل های

پلی پروپیلن مورد استفاده، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده (PP)



شکل ۱. ابعاد هندسی نمونه بتنی مرجع.

جدول ۱. جزئیات نمونه بتنی مرجع اتصال قاب پایه پل

جزئیات	LB1	LB2	LB3	LC1	LC2	LC3
طول (mm)	۴۰۰	۷۰۰	۳۰۰	۲۷۵	۳۰۰	۲۷۵
فاصله خاموت	۵۰	۱۰۰	۵۰	۵۰	۱۵۰	۵۰

جدول ۲. مشخصات بتن مورد استفاده

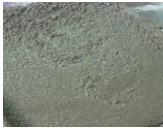

مصالح	$\nu$	$\sigma_{t0}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	$f'_c$ (MPa)
بتن معمولی	۰,۲	۳	۲۵۰۰۰	۲۵
HPFRCC	۰,۲	۳,۲	۲۵۰۰۰	۲۴

جدول ۳. مشخصات آرماتورهای فولادی

قطر فولاد	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_y$	$\epsilon_{sh}$	$\epsilon_u$
Ø8	۳۹۸	۵۸۶	۰,۰۰۱۹	۰,۰۳	۰,۱۴
Ø12	۴۴۳,۸	۶۶۷,۱	۰,۰۰۲۱۲	۰,۰۳	۰,۱۴
Ø14	۵۱۰,۱	۵۸۷,۶	۰,۰۰۲۴۳	۰,۰۳	۰,۱۴

بهسازی اتصالات ضعیف پایه های قابی شکل پل های بتنی با استفاده از کامپوزیت سیمانی الیافی و نبشی های فولادی

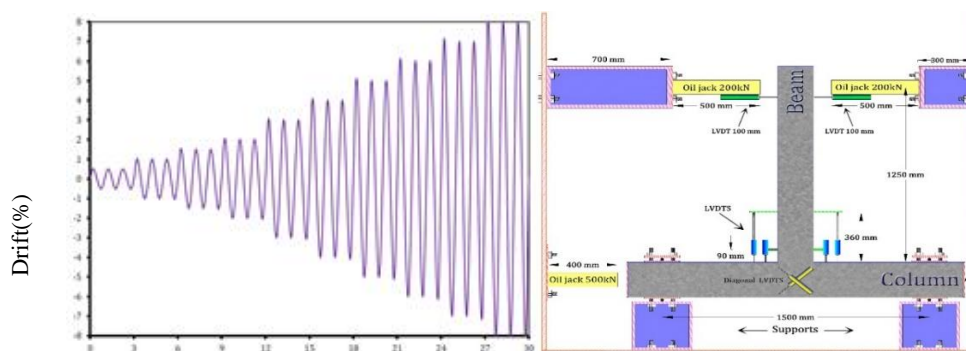
جدول ۴. طرح اختلاط بتن معمولی و ملات HPRCC (شفائی و همکاران ۲۰۱۴)

نوع	شن	ماسه	سیمان	آب	الیاف (%)	بافت
بتن معمولی	۱,۷۲	۱,۷۲	۱	۰,۴۵	-	
HPRCC	-	۱	۱	۰,۵۴	۱,۵	

جدول ۵. مشخصات الیاف پلی پروپیلن (PP)

چگالی (g/cc)	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	رنگ	قطر (μm)	طول (mm)
۰,۹۱	۱۰	۸۰۰	سفید	۱۸	۱۲

دو تکیه‌گاه ستون به صورت مفصلی و غلطکی در نظر گرفته شده است. نیروی محوری ثابتی معادل ۱۰ درصد مقاومت محوری اسمی نهایی ستون که در حدود ۲۰۰ کیلونیوتن می باشد به یک انتهای ستون اعمال شده است. برای اعمال بارهای رفت و برگشتی از دو جک ۲۰۰ کیلونیوتنی در دو طرف نوک تیر استفاده شده است. در شکل ۳ سیستم چیدمان آزمایش<sup>۱</sup> و تاریخچه بارگذاری استاتیکی چرخه‌ای افزایشی نمونه‌ها و در شکل ۴، قالب بندی نمونه‌ها و در شکل ۵ نمونه اتصال بتنی ضعیف در حال بارگذاری نشان داده شده است.



سیکل های بارگذاری

(الف) سیستم چیدمان آزمایش نمونه ها

(ب) تاریخچه بارگذاری چرخه ای افزایشی.

شکل ۳. سیستم چیدمان و تاریخچه بارگذاری آزمایش نمونه ها .

۱ Set up



شکل ۵. نمونه اتصال بتنی ضعیف



شکل ۴. قالب بندی سه نمونه اتصال ساخته شده

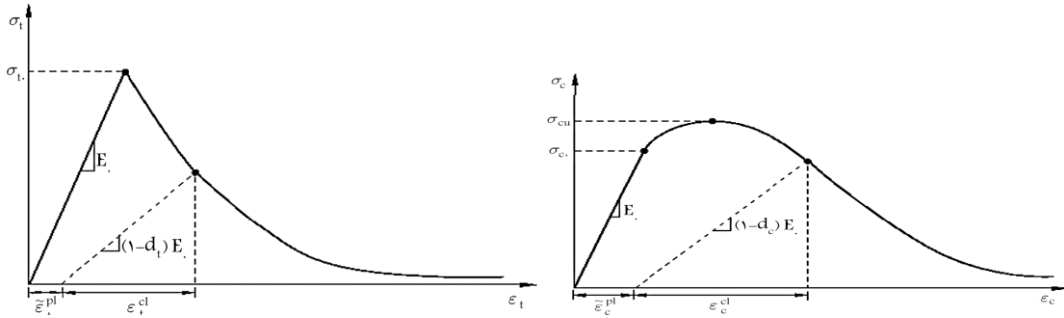
می یابد و پس از آن وارد شاخه نرم شوندگی و نزولی منحنی شده و تا مرحله شکست به دلیل خردشدگی که در کرنش نهایی اتفاق می افتد پیش می رود. در کشش نیز رفتار بتن به صورت خطی تا  $\sigma_{to}$  (مقاومت کششی بتن) ادامه می یابد و پس از آن با شروع ترک خوردگی در بتن تحت کشش و افزایش عرض ترک ها به صورت نزولی و کاهش تنش پیش می رود. پارامترهای  $d_t, d_c$  به ترتیب خسارت فشاری و کششی بتن (کاهش سختی بتن) را در اثر باربرداری نشان می دهند که با مقادیری بین ۰ تا ۱ مشخص می شوند.

منحنی تنش کرنش HPFRCC در کشش تا رسیدن به تنش  $\sigma_{cc}$  (تنش متناظر با ترک خوردگی ملات) به صورت خطی افزایش می یابد و سپس تا رسیدن به تنش  $\sigma_{pc}$  با شیب کندتری افزایش می یابد و پس از آن با بازشدگی و گسترش ترک ها شاخه نزولی و نرم شوندگی کامپوزیت آغاز شده و تا پارگی یا جدایش الیاف پیش می رود.

### ۱- نحوه مدل سازی و اعتبارسنجی

در این مقاله، سه نمونه اتصال بتنی مرجع و اتصال ضعیف فاقد خاموت در چشمه اتصال و اتصال تقویت شده با HPFRCC در ناحیه چشمه و ناحیه ویژه تیر، معرفی شده در قسمت پیشین، توسط نرم افزار ABAQUS مدل سازی شده اند. برای مدل سازی بتن و مصالح HPFRCC از مدل آسیب دیدگی خمیری<sup>۱</sup> استفاده شده است. این مدل به دلیل مدل سازی ترک خوردگی بتن در کشش و خردشدگی آن در فشار برای تحلیل های چرخه ای مناسب است. منحنی های تنش-کرنش استفاده شده برای بتن و HPFRCC در نرم افزار در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می شود در فشار تا تنش  $\sigma_{co}$  (تسلیم اولیه) رفتار بتن الاستیک بوده و رابطه تنش و کرنش به صورت خطی تغییر می کند پس از آن بتن وارد رفتار غیرخطی خود شده و تنش قابل تحمل توسط بتن تا حداکثر مقاومت فشاری  $\sigma_{cu}$  افزایش

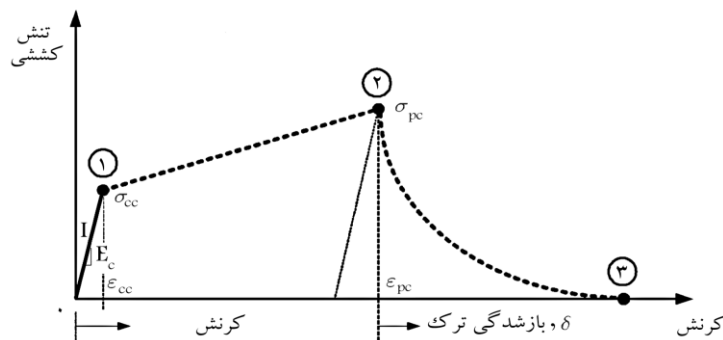
<sup>۱</sup> Concrete damage plasticity



شکل ۶. منحنی تنش- کرنش بتن و HPFRCC تحت فشار / شکل ۷. منحنی تنش- کرنش بتن تحت کشش (همتی و همکاران، ۲۰۱۳)

همکاران، ۲۰۱۳)

(همتی و همکاران، ۲۰۱۳)



شکل ۸. منحنی تنش- کرنش HPFRCC تحت کشش (همتی و همکاران ۲۰۱۳)

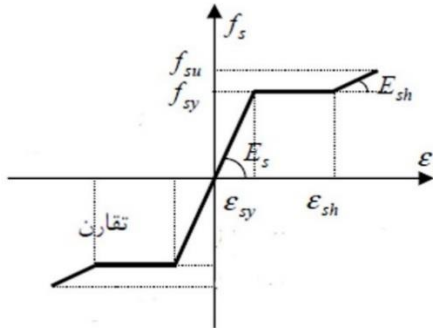
المان های ۲۰ گره‌ای Solid با طول ۵۰ میلی‌متر و برای آرماتورهای فولادی از المان های خطی دو گره‌ی Truss استفاده شده است. در شکل های ۱۱ و ۱۲ این المان‌ها نشان داده شده اند.

در جدول ۶، نامگذاری نمونه‌ها انجام شده است. مدل‌ها در انتهای تیر تحت بارگذاری رفت و برگشتی به صورت کنترل تغییرمکان مطابق بارگذاری اعمالی در آزمایشگاه قرار گرفته و نیروی محوری ۲۰۰ کیلونیوتن نیز به ستون اعمال گردیده است. پس از مدل‌سازی و اعمال بارگذاری منحنی هیستریزس نیروی تحمل شده توسط اتصال، نسبت به جابه‌جایی نوک تیر بدست آمده و پوش منحنی ذکر شده بر اساس ماکزیمم هر دریافت رسم گردیده است. در شکل ۱۳ منحنی‌های هیستریزس نیرو- جابه‌جایی و منحنی‌های پوش آن‌ها برای کلیه

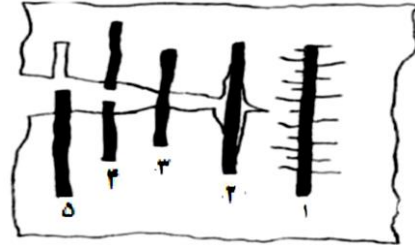
الیاف داخل ملات HPFRCC به عنوان یک مکانیزم پل زنی اضافی وارد عمل می‌شود. در شکل ۹، چگونگی این عمل با توجه به شماره‌ها نشان داده شده است. که در آن ۱- آسیب دیدگی ملات ۲- جدا شدن الیاف و ملات ۳- پل زدن الیاف ۴- پارگی الیاف ۵- بیرون کشیده شدن الیاف از ملات را نشان می‌دهد (شفائی و همکاران، ۲۰۱۴). رفتار میلگردهای فولادی مطابق شکل ۱۰ به صورت سه خطی شامل قسمت ارتجاعی اولیه و قسمت جاری شدگی و سپس سخت شدگی در نظر گرفته شده است (تسنیمی و همکاران، ۲۰۰۷). رفتار الاستیک فولاد توسط  $E = 2.1 * 10^5 MPa$  و  $\nu = 0.3$  به نرم افزار معرفی شده است. برای رفتار غیرخطی از مقایر بدست آمده از تست کشش میلگردها استفاده شده است. برای مدل‌سازی بتن و کامپوزیت‌های سیمانی از



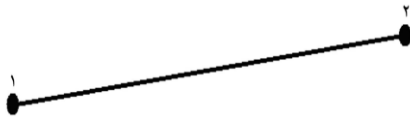
در وضعیت نهایی در نمونه های آزمایشگاهی و عددی مشابه در شکل ۱۵، انطباق قابل ملاحظه ای (با اختلاف ناچیز) در رفتار دو نمونه آزمایشگاهی و عددی مشاهده می گردد.



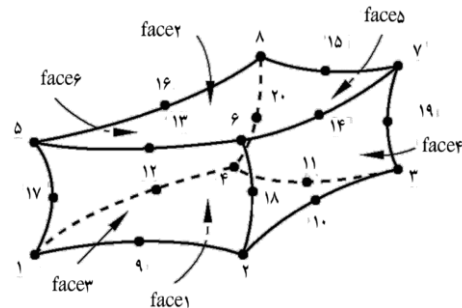
نمونه ها رسم شده است. همچنین در شکل ۱۴ پوش منحنی های نیرو - جابه جایی نمونه هایی که بصورت عددی بدست آمده اند، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. با مقایسه منحنی های حاصل از تحلیل و نتایج آزمایش اتصالات و همچنین مقایسه خسارت کششی بتن



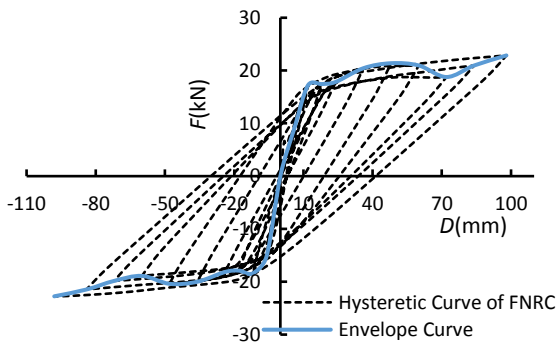
شکل ۹. چگونگی عمل الیاف در داخل ملات (همتی و همکاران، ۲۰۱۶) شکل ۱۰. منحنی تنش - کرنش میلگردهای فولادی



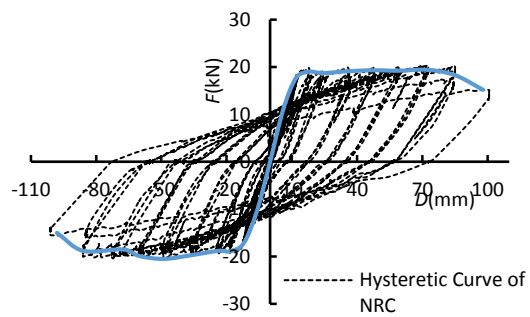
شکل ۱۲. المان دو گرهی Truss



شکل ۱۱. المان ۲۰ گرهی مکعبی Solid

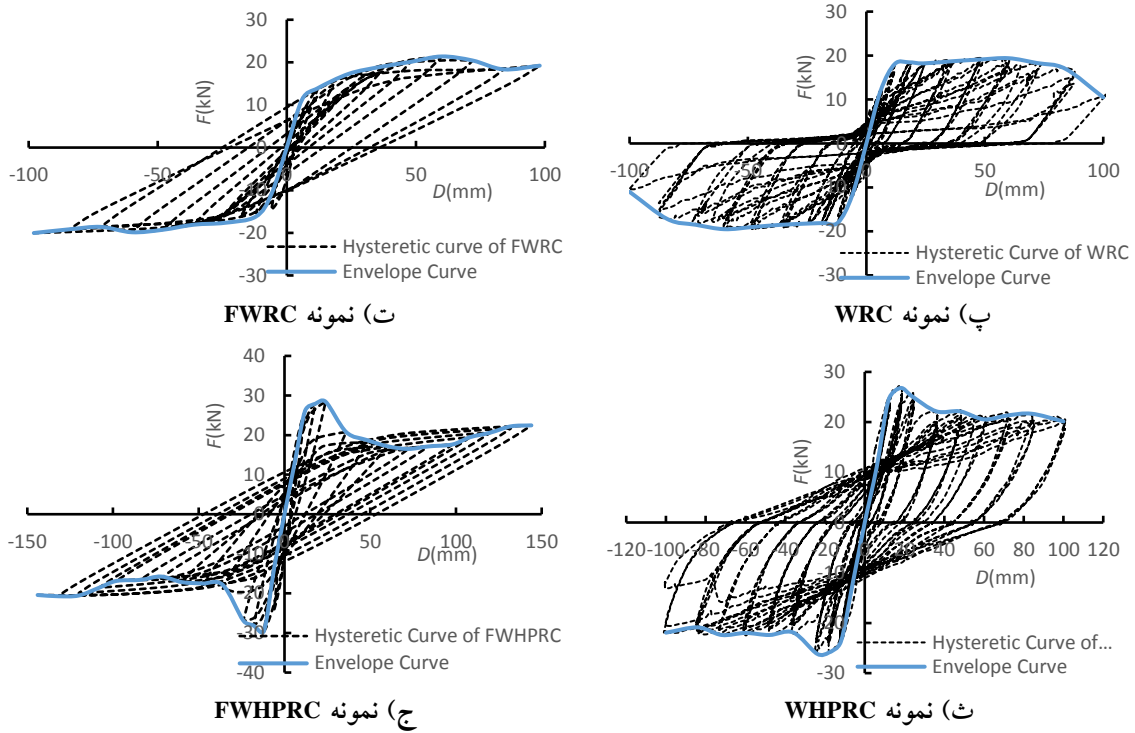


ب) نمونه FNRC

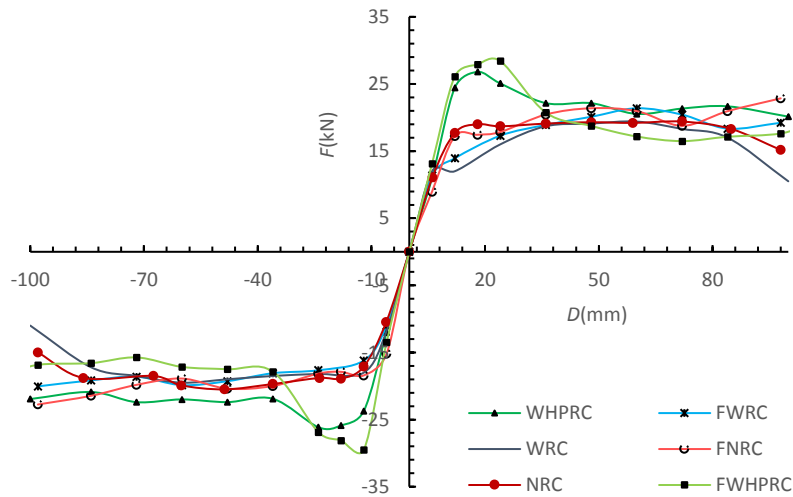


الف) نمونه NRC

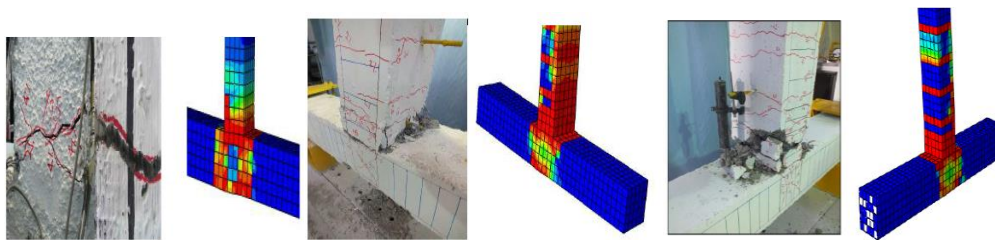
بهسازی اتصالات ضعیف پایه های قابی شکل پل های بتنی با استفاده از کامپوزیت سیمانی الیافی و نبشی های فولادی



شکل ۱۳ منحنی های هیستریزس و پوش نیرو - جابه جایی انتهایی تیر نمونه های آزمایشگاهی و عددی



شکل ۱۴. مقایسه منحنی های پوش نیرو - جابه جایی انتهایی تیر نمونه های آزمایشگاهی و عددی



الف) نمونه های NRC و FNRC      ب) نمونه های WRC و FWRC      ج) نمونه های WHPRC و FWHPRC

شکل ۱۵. مقایسه خسارت کششی بتن در نمونه های عددی و وضعیت نهایی اتصال در نمونه های آزمایشگاهی در دریافت نهایی

جدول ۶. نامگذاری نمونه های انتخاب شده برای کالیبراسیون

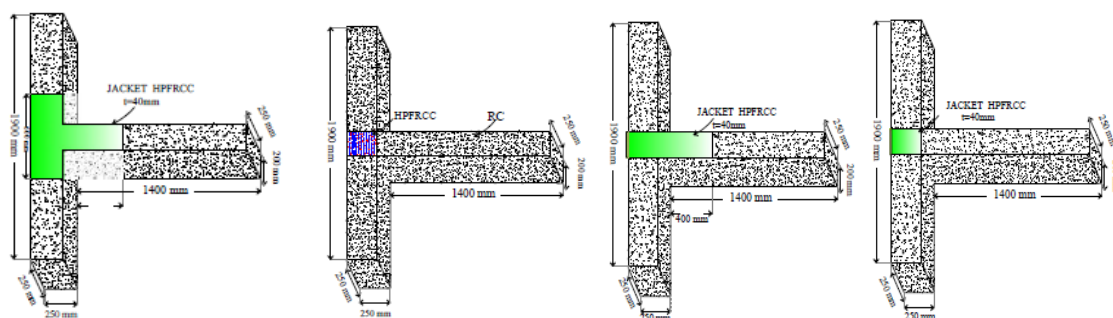
نام نمونه	نمونه	معرفی نمونه	توضیحات
آزمایشگاهی	عددی	ها	
<b>NRC</b>	FNRC	مرجع بتنی	اتصال کامل بتنی (تیر و ستون بتنی)
<b>WRC</b>	FWRC	ضعیف بتنی	اتصال کامل مشابه اتصال مرجع، ضعیف شده با حذف خاموت ناحیه چشمه اتصال
<b>WHPRC</b>	FWHPRC	مرکب	اتصال کامل مشابه اتصال ضعیف که بتن چشمه اتصال و ناحیه ویژه تیر (40 سانتی متر از طول تیر از بر اتصال)، با استفاده از HPFRCC با الیاف پروپیلن جایگزین شده است.

این نمونه‌ها نشان داده شده است. در نام گذاری نمونه‌ها F، حرف اول کلمه المان محدود (Finite element) و W حرف اول کلمه ضعیف (Weak)، P، نشان‌دهنده وجود پانل در اتصال و HP، برگرفته از HPFRCC و Z، حرف اول کلمه Zone، نشان‌دهنده چشمه اتصال، S، مخفف Steel و RC مخفف Reinforcement concrete می باشد. در جدول ۷، نامگذاری نمونه‌ها انجام شده است. برای مدل‌سازی پانل‌های HPFRCC از المان‌های ۲۰ گره‌ای Solid با طول ۵۰ میلی‌متر و همان مصالح معرفی شده در قسمت پیشین استفاده شده است. برای مدل‌سازی مقاطع و ورق‌های فولادی نیز از المان‌های ۲۰ گره‌ای Solid با طول ۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. برای تعریف تماس بین بتن در ستون بتنی با سطح داخلی مصالح فولادی از اندرکنش Surface-to-surface contact استفاده شده است. برای تعریف رفتار مماسی از Tangential behavior از ضریب اصطکاک ۰٫۳ استفاده شده است. فولاد مصرفی از نوع ST-37 با مقاومت جاری شدگی ۲۴۰ MPa می‌باشد.

معرفی نمونه های تحلیلی اجزای محدود به منظور بررسی تأثیر استفاده از HPFRCC (به صورت مصالح جایگزین و پانل)، در تقویت رفتار اتصال ضعیف پایه های قابی شکل بتنی پل‌ها، ابتدا یک نمونه اتصال فاقد خاموت در چشمه اتصال که در این ناحیه به جای بتن معمولی از HPFRCC استفاده شده است، مدل‌سازی شده است؛ تا بدین وسیله تأثیر استفاده از HPFRCC در ناحیه ویژه تیر در مدل FWHPRC بررسی گردد. سپس چهار نمونه اتصال با پانل‌های مختلف از HPFRCC مدل‌سازی شده و تحت آنالیز استاتیکی غیرخطی قرار گرفته است. همچنین به منظور مقایسه روش‌های مختلف مقاوم‌سازی اتصال ضعیف فاقد خاموت دو نمونه اتصال تقویت شده توسط صفحه و نبشی‌های فلزی که توسط بولت‌هایی با مقاومت بالا به صورت پیش‌تنبیده در اطراف ناحیه اتصال به یکدیگر متصل شده‌اند که طرح آن توسط شفائی و همکاران (۲۰۱۴) پیشنهاد و به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است، به صورت عددی مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۱۶ جزئیات

جدول ۷. نامگذاری نمونه های اتصالات بررسی شده

ردیف	نام نمونه	مصالح مصرفی	توضیحات
۱	FWHPZ	بتن آرمه معمولی - HPFRCC	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، جایگزینی HPFRCC در چشمه اتصال
۲	FWPHP1	بتن آرمه معمولی - پانل HPFRCC	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، دارای پانل های HPFRCC در چشمه اتصال و دو کناره تیر در ارتفاع، در ناحیه ویژه تیر (40 سانتی متر از بر اتصال)
۲	FWPHP2	بتن آرمه معمولی - پانل HPFRCC	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، دارای پانل U شکل HPFRCC در چشمه اتصال
۴	FWPHP3	بتن آرمه معمولی - پانل HPFRCC	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، دارای پانل T شکل HPFRCC در ناحیه چشمه اتصال و 20 سانتی متری آن در دو طرف ستون و 40 سانتی متری روی ارتفاع تیر از بر اتصال
۵	FWPHP4	بتن آرمه معمولی - پانل HPFRCC	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، دارای پانل های U شکل HPFRCC در چشمه اتصال و نبشی شکل در بالا و پایین تیر در محل اتصال به ستون
۶	FWSRC1	بتن آرمه معمولی - صفحه و نبشی فولادی و بولت های پیش تنیده	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، دارای صفحه و نبشی های فولادی که با 12 بولت پیش تنیده با مقاومت بالا به هم متصل شده و ناحیه اتصال را محصور کرده است
۷	FWSRC2	بتن آرمه معمولی - صفحه و نبشی فولادی و بولت های پیش تنیده	اتصال ضعیف، فاقد خاموت در چشمه اتصال، دارای صفحه و نبشی های فولادی که با 6 بولت پیش تنیده با مقاومت بالا به هم متصل شده و ناحیه اتصال را محصور کرده است

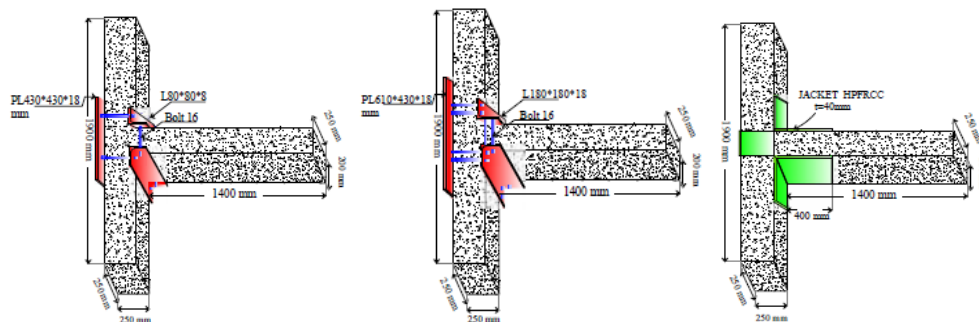


ت) نمونه FWPHP3

پ) نمونه FWPHP2

ب) نمونه FWPHP1

الف) نمونه FWHPZ



چ) نمونه FWSRC2

ج) نمونه FWSRC1

ث) نمونه FWPHP4

شکل ۱۶. جزئیات نمونه های عددی بررسی شده

## نتایج و تفسیر آن‌ها

### ۱-۵- اثر تقویت ناحیه اتصال با مصالح HPFRCC

#### و با نبشی‌های فولادی پیش‌تنیده بر ظرفیت باربری

منحنی هیستریزس نیرو- جابه‌جایی اتصالات تقویت شده و پوش آن‌ها در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۸ منحنی پوش نیرو- جابه‌جایی این اتصالات با یکدیگر مقایسه شده است. متوسط نیروی تحمل شده در جهت مثبت و منفی بارگذاری در دررفت نهایی، در اتصال FNRC ، FWRC ، FWHPRC ، FWHPZ ، FWPHP1 ، FWPHP2 ، FWPHP3 ، FWPHP4 ، FWSRC1 ، FWSRC2 به ترتیب، ۲۲،۸۰، ۱۹،۶۳، ۲۱،۴۳، ۲۳،۲۳، ۲۴،۲۶، ۲۴،۲۵، ۲۴،۴۴، ۲۵،۰۵، ۲۳،۶۳ و ۲۲،۷۸ کیلونیوتن و متوسط حداکثر نیروی قابل تحمل در طول بارگذاری توسط این اتصالات به ترتیب ۲۲،۸۰، ۲۰،۶۲، ۲۸،۹۶، ۲۳،۲۳، ۲۴،۲۶، ۲۴،۲۵، ۲۴،۴۴، ۳۰،۶۷ و ۲۳،۶۳ کیلونیوتن بدست آمده است.

حداکثر نیروی قابل تحمل توسط اتصال ضعیف نسبت به اتصال بتنی مرجع ۱۰٪ کاهش داشته است. جایگزینی بتن ناحیه چشمه و ناحیه ویژه تیر با HPFRCC ، حداکثر نیروی تحمل شده اتصال را نسبت به اتصال ضعیف ۴۰٪ افزایش داده است و این در حالی است که حداکثر نیروی اتصال بهسازی شده در ناحیه چشمه اتصال با مصالح HPFRCC نسبت به اتصال ضعیف بتنی تنها به میزان ۱۳٪ افزایش نشان داده است . از بین اتصالات دارای پانل HPFRCC اتصال FWPHP4 که دارای پانل‌های نبشی شکل در بالا و پایین تیر در محل اتصال به ستون و پانل U شکل در چشمه اتصال می باشد از بقیه اتصالات دارای پانل نیروی بیشتری را در طول بارگذاری تحمل کرده به گونه‌ای که نسبت به اتصال ضعیف بتنی به میزان ۴۹٪ افزایش نشان داده است. همچنین میزان افزایش بار نهایی اتصالات FWHPZ ، FWHP1 ، FWHP2 ، FWHP3 ، FWSRC1 ، FWSRC2 نسبت به

اتصال ضعیف بتنی به ترتیب به میزان ۹،۱۷٪، ۱۸،۳۴٪، ۲۳،۵۳٪، ۲۴،۵۰٪، ۲۷،۶۱٪، ۲۰،۳۸٪، ۱۶،۰۵٪ بوده است. در حالی که بار نهایی اتصال ضعیف نسبت به اتصال بتنی مرجع به میزان ۱۴٪ کاهش پیدا کرده است. ضمناً در شکل ۱۹ تنش‌های ترک خوردگی بتن در دررفت نهایی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۹ مشاهده می شود استفاده از پانل‌های HPFRCC میزان ترک خوردگی و خسارت کششی را در ناحیه چشمه اتصال کاهش داده است.

### ۲-۵- بررسی شکل‌پذیری و سختی و جذب انرژی

میزان شکل‌پذیری اتصالات براساس نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان نظیر اولین تسلیم شدگی بدست آمده از نمودار دو خطی نیرو - جابه‌جایی مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود:

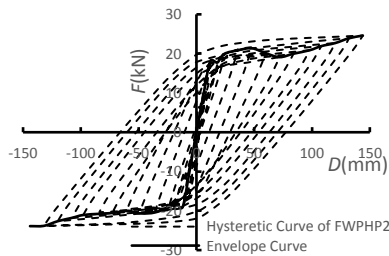
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

تغییرمکان نهایی برابر کمترین مقدار بین تغییرمکان حداکثر اتصال و تغییرمکان نظیر ۱۵ درصد افت بار حداکثر، در نظر گرفته می شود. در جدول ۸ شکل‌پذیری اتصالات ترکیبی بدست آمده است. شکل‌پذیری اتصالات FWHPZ ، FWHP1 ، FWHP2 ، FWHP3 ، FWSRC1 ، FWSRC2 نسبت به اتصال ضعیف به طور میانگین به ترتیب به میزان ۱۰٪، ۶٪، ۱۳٪، ۹٪، ۱۶٪، ۸٪، ۸٪، ۹٪ افزایش نشان داده‌اند. به طوری که مشاهده می شود اتصال FWPHP3 به دلیل محصورشدگی همزمان تیر و ناحیه اتصال و نواحی ویژه ستون بیشترین شکل‌پذیری را داشته است. همچنین کمترین شکل‌پذیری برای نمونه FWHPZ که فاقد تقویت در نواحی تیر و ستون در خارج از چشمه اتصال می باشد، بدست آمده است. میزان سختی اتصال تغییرمکان نسبی برابر شیب خط واصل بین نقاط اوج مثبت و منفی سیکل‌های بارگذاری در هر تغییرمکان

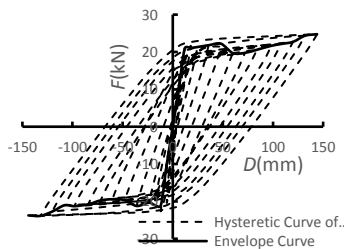
محاسبه شده است. در شکل ۲۲ انرژی جذب شده تجمعی اتصالات در دررفت های مختلف نشان داده شده- اند. همچنین در شکل ۲۳، انرژی تجمعی جذب شده اتصالات در هر دررفت با یکدیگر مقایسه شده است. همانگونه که در این شکل ها مشاهده می شود، بیشترین و کمترین میزان جذب انرژی به ترتیب مربوط به اتصال FWPHP4 و ضعیف بوده است. انرژی جذب شده تجمعی کل اتصالات FWPHP1، FWPHP2، FWPHP3، FWPHP4، FWSRC1، FWSRC2 نسبت به اتصال ضعیف به ترتیب به میزان ۱۵۴٪، ۲۱۶٪، ۳۳۰٪، ۳۲۱٪، ۳۲۰٪، ۳۷۲٪، ۳۰۳٪، ۲۶۴٪ افزایش داشته است. در جدول ۱۰، مقادیر انرژی جذب شده تجمعی کل اتصالات در دررفت نهایی و همچنین میزان افزایش آن نسبت به نمونه ضعیف ارائه شده است.

نسبی در نظر گرفته شده است. در شکل ۲۰ میزان تغییرات سختی و در شکل ۲۱ درصد افت سختی در هر دررفت برای اتصالات مختلف نشان داده شده است. ضمناً سختی اولیه و نهایی و میزان افت در نمونه های مختلف در جدول ۹ نشان داده شده است. همان گونه که در جدول ۹ مشاهده می گردد، میزان افت سختی اتصال ضعیف بیشتر از نمونه های تقویت شده می باشد. طرح- های تقویت همگی منجر به

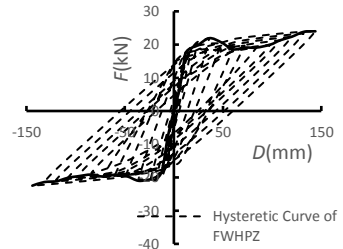
کاهش میزان افت سختی در اتصال شده اند. برای اتصالات که تحت بارگذاری رفت و برگشتی قرار گرفته- اند، سطح داخل هر یک از حلقه های تشکیل شده در هر سیکل به عنوان معیاری برای انرژی جذب شده در نظر گرفته شده است و انرژی کل نیز بصورت تجمعی انرژی- های جذب شده در همه سیکل ها تا دررفت مورد نظر



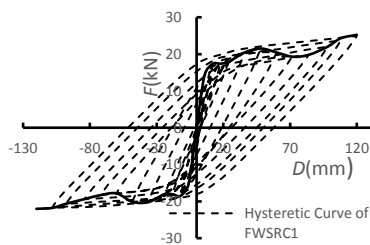
پ) نمونه FWPHP2



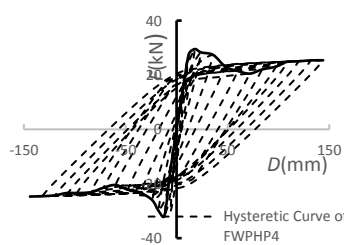
ب) نمونه FWPHP1



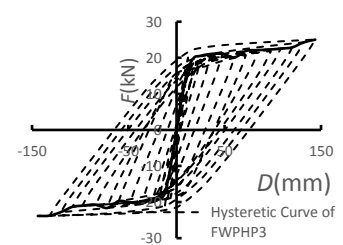
الف) نمونه FWPHPZ



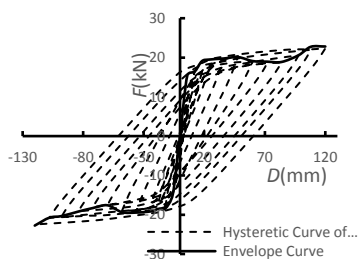
ج) نمونه FWSRC1



ث) نمونه FWPHP4

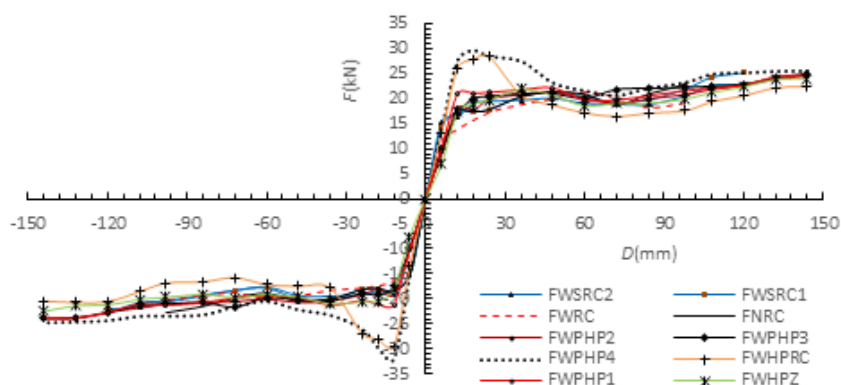


ت) نمونه FWPHP3

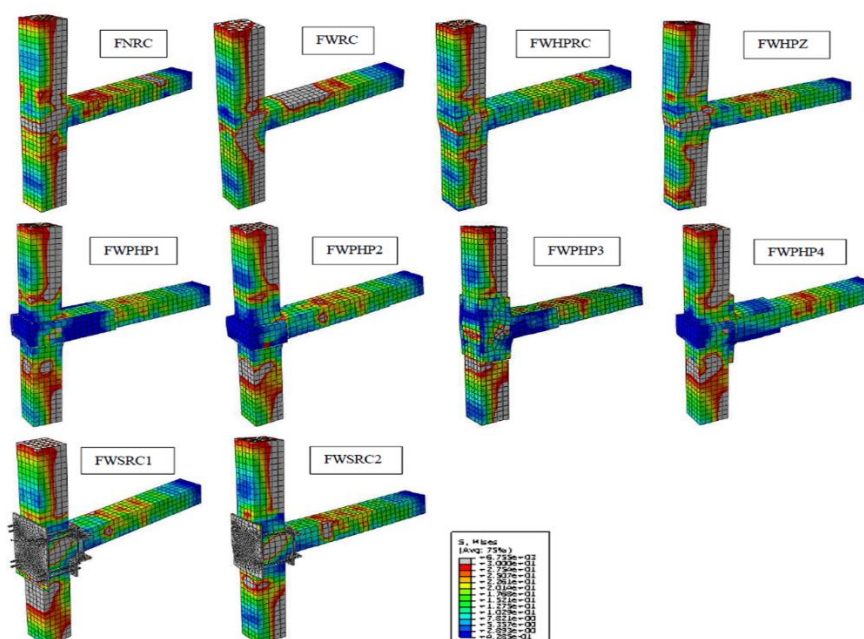


چ) نمونه FWSRC2

شکل ۱۷. منحنی‌های هیستریزیس و پوش نیرو - جابه جایی انتهایی تیر نمونه‌های عددی



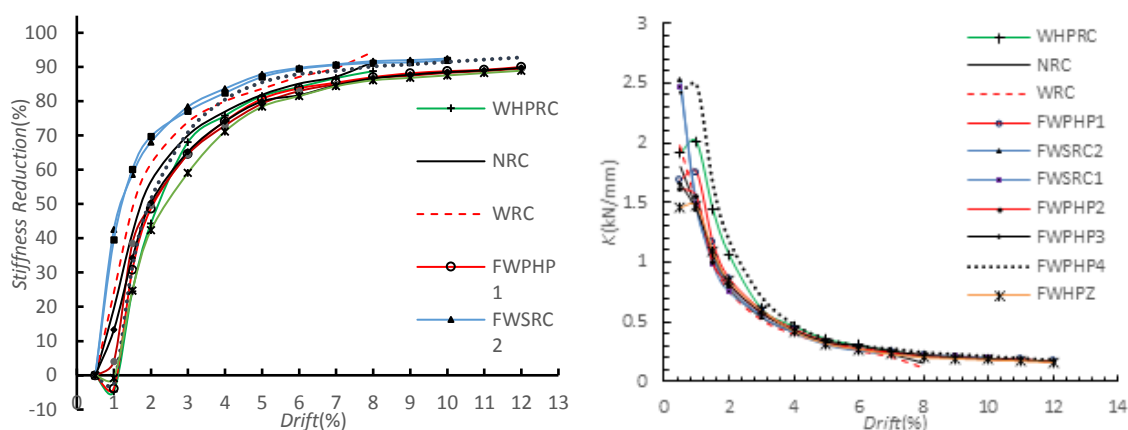
شکل ۱۸. مقایسه منحنی‌های پوش نیرو - جابه جایی انتهایی تیر نمونه‌های عددی



شکل ۱۹. الگوی انهدام اتصالات در دررفت نهایی

جدول ۸. شکل پذیری اتصالات بررسی شده

میزان افزایش	$\mu_{ave}$	$\mu^-$	$\Delta_u^-$ (mm)	$\Delta_y^-$ (mm)	$\mu^+$	$\Delta_u^+$ (mm)	$\Delta_y^+$ (mm)	$M_{Max}$ (kN.m)	$M_{yave}$ (kN.m)	نام اتصال
۱,۱۱	۷,۱۰	۷,۱۱	۹۶	۱۳,۵	۷,۱	۹۶	۱۳,۷	۲۵,۱۵	۱۳,۸۸	FNRC
۱	۶,۳۹	۶,۴۱	۸۴	۱۳,۱۰	۶,۳۶	۸۴	۱۳,۲	۲۳,۸۸	۱۷,۵	FWRC
۱,۱۰	۷,۰۹	۷,۱۳	۸۵,۵	۱۲	۷,۰۴	۸۳,۱	۱۱,۸	۳۵,۵۳	۳۲,۶۵	FWHPRC
۱,۰۶	۶,۷۸	۶,۸۶	۱۴۴	۲۱	۶,۷۰	۱۴۴	۲۱,۵	۲۹,۷۹	۲۱,۷۴	<b>FWHPZ</b>
۱,۱۳	۷,۲	۷,۲۴	۱۴۴	۱۹,۹	۷,۱۶	۱۴۴	۲۰,۱	۳۰,۹۵	۲۶,۲۱	FWPHP1
۱,۰۹	۶,۹۸	۷,۰۲	۱۴۴	۲۰,۵	۶,۹۴	۱۴۴	۲۰,۷۵	۳۰,۷۵	۲۲,۶۶	FWPHP2
۱,۱۶	۷,۴۴	۷,۳۵	۱۴۴	۱۹,۶	۷,۵۲	۱۴۴	۱۹,۱۵	۳۰,۳۵	۲۱,۲۵	FWPHP3
۱,۰۸	۶,۹۰	۶,۹۰	۷۶	۱۱	۶,۹۱	۷۰,۴۸	۱۰,۲	۳۶,۹	۲۷,۵	FWPHP4
۱,۰۸	۶,۸۹	۶,۸۶	۱۲۰	۱۷,۵	۶,۹۳	۱۲۰	۱۷,۱۹	۳۰,۳۶	۱۹,۲۹	FWSRC1
۱,۰۹	۶,۹۳	۶,۹۸	۱۲۰	۱۷,۲۰	۶,۸۸	۱۲۰	۱۷,۴۵	۲۸,۵۴	۱۷,۹۴	FWSRC2

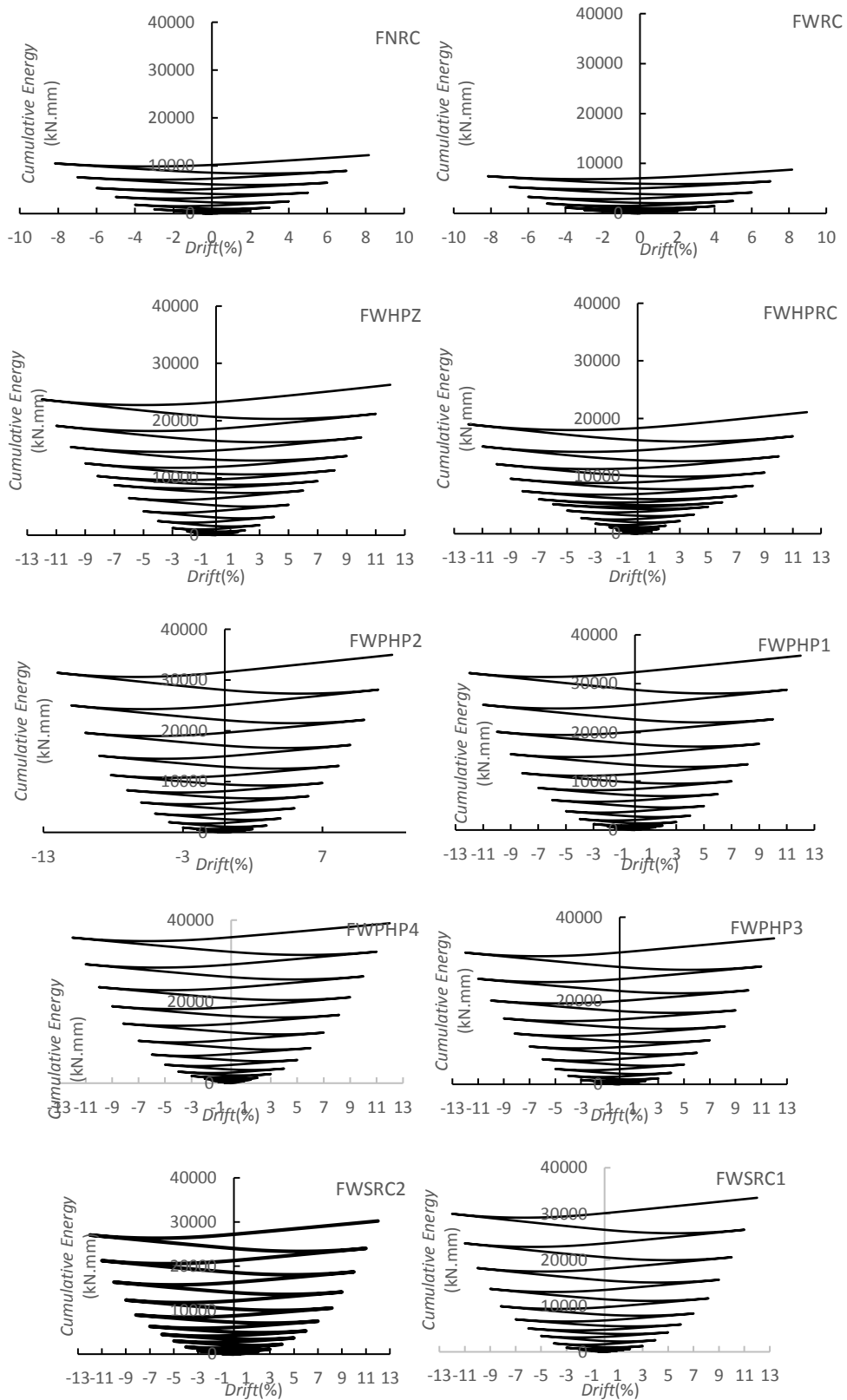


شکل ۲۰. منحنی تغییرات سختی اتصالات در دریفتهای مختلف شکل ۲۱. منحنی افت سختی اتصالات در دریفتهای مختلف

جدول ۹. میزان سختی اولیه و نهایی اتصالات بررسی شده

نام اتصال	NRC	WRC	WHPRC	FWHPZ	FWPHP1	FWPHP2	FWPHP3	FWPHP4	FWSRC1
سختی اولیه kN/mm	۱,۸	۱,۹۸	۱,۹۲	۱,۴۵	۱,۶۹	۱,۶۲	۱,۶۶	۲,۴۲	۲,۴۷
سختی نهایی kN/mm	۰,۱۵	۰,۱۱	۰,۲۱	۰,۱۶	۰,۱۷	۰,۱۷	۰,۱۷	۰,۱۷	۰,۲۰
میزان افت سختی (%)	۹۱,۶۷	۹۴,۴۴	۸۹,۰۶	۸۸,۹۶	۸۹,۹۴	۸۹,۵۱	۸۹,۷۶	۹۲,۹۸	۱,۹۰

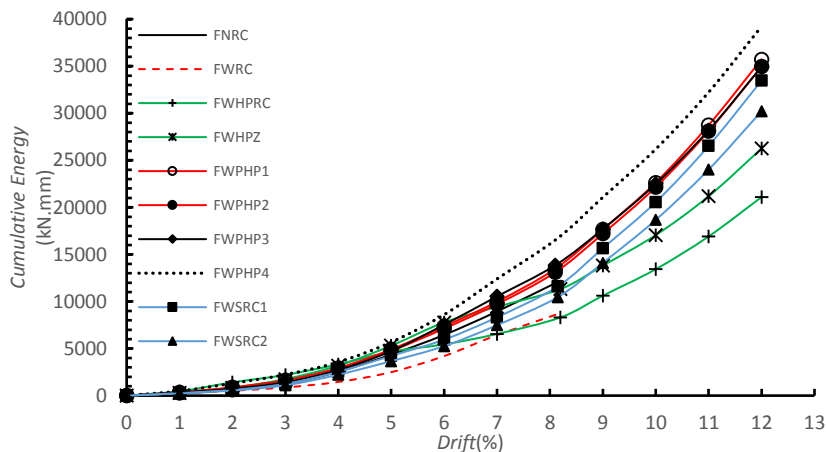




شکل ۲۲. انرژی جذب شده تجمعی اتصالات در دررفت‌های مختلف

جدول ۱۰. انرژی جذب شده تجمعی اتصالات در دریفت نهایی

نام اتصال	FNRC	FWRC	FWHPRC	FWHPZ	FWPHP1	FWPHP2	FWPHP3	FWPHP4	FWSRC1	FWSRC2
انرژی جذب شده تجمعی کل (E)	۱۲۲۱	۸۳۰۹	۲۱۰۹۹	۲۶۲۵۸	۳۵۷۳۱	۳۴۹۶۱	۳۴۹۳۵	۳۹۲۳۳	۳۳۴۷۳	۳۰۲۲۴
$\frac{E}{E_{FWRC}}$	۱,۴۷	۱	۲,۵۴	۳,۱۶	۴,۳۰	۴,۲۱	۴,۲۰	۴,۷۲	۴,۰۳	۳,۶۴



شکل ۲۳. مقایسه منحنی های انرژی تجمعی جذب شده اتصالات در هر دریفت

## نتیجه گیری

در این تحقیق، سه نمونه اتصال بتنی مرجع و اتصال ضعیف فاقد خاموت در چشمه اتصال و اتصال تقویت شده با HPFRCC در ناحیه چشمه و ناحیه ویژه تیر در یک پایه قابی-شکل پل بتنی بصورت آزمایشگاهی ساخته شده و تحت بارگذاری ثقلی ثابت و جانبی چرخه‌ای آزمایش شدند و نمونه ها به صورت عددی مدل سازی شده و نتایج نمونه های آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه و اعتبارسنجی انجام شد. سپس ۷ طرح تقویت معرفی و به صورت عددی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق بصورت زیر ارائه می-گردد:

- از نظر ظرفیت باربری به خصوص در دریفت-های ۱ الی ۳ درصد، بهترین نمونه ها FWPHP4 و FWHPRC بوده و مقایسه منحنی های بار-تغییر مکان نمونه های عددی تقویت شده نشان داد که استفاده از پانل های کامپوزیتی سیمانی با الیاف توانمند، ماکزیمم ظرفیت باربری اتصال پایه پل بتنی را نسبت به اتصال ضعیف از ۱۷ تا ۴۸ درصد، افزایش می دهد. در دریفت های نهایی نمونه FWPHP4، بیشترین افزایش در بار نهایی را نشان داده است.
- تقویت اتصال با پانل HPFRCC، موجب محدودیت تغییر شکل برشی در ناحیه اتصال و کاهش جمع شدگی<sup>۱</sup> منحنی بار-تغییر مکان می

۴- از میان نمونه‌های تقویت شده، نمونه FWPHP4، به دلیل تقویت خمشی اتصال همراه با محصوریت چشمه و در نتیجه استفاده از حداکثر ظرفیت خمشی و برشی اتصال، بیشترین جذب انرژی و سختی را داشته است.

اتصالات FWSRC1 و FWSRC2، دارای شکل پذیری کمتری نسبت به اتصالات تقویت شده با پانل‌های HPFRCC هستند. به طور کلی اتصالات تقویت شده با نبشی و بولت‌های پیش‌تنیده با بزرگ کردن ناحیه اتصال و کمک به مکانیزم خرابایی در این ناحیه و به دلیل عملکرد پیش‌تنیدگی از بازشدن سریع ترک‌های قطری در ناحیه اتصال، در دریافت‌های اولیه جلوگیری کرده و مکانیزم سرخوردگی آرماتورهای اصلی را به تاخیر می‌اندازند. به طور کلی هرچه سطح و نیروی پیش‌تنیدگی بیشتر باشد، اتصال عملکرد بهتری را نشان می‌دهد؛ بطوری که اتصال FWSRC1 به دلیل دارا بودن نبشی‌هایی با سایز بزرگ‌تر و تعداد بولت بیشتر دارای عملکرد بهتری نسبت به اتصال FWSRC2 می‌باشد

گردد. به گونه‌ای که با کاهش تغییرشکل برشی، اتصال، این امکان را پیدا می‌کند که به ظرفیت خمشی حداکثر خود برسد و در نتیجه رفتار اتصال بهبود می‌یابد.

۳- تقویت پایه قابی-شکل پل بتنی با پانل HPFRCC، با ایجاد محصوریت در اطراف چشمه اتصال، مود گسیختگی اتصال را از حالت برشی به خمشی تغییر داده و مقاومت برشی کافی را تامین کرده و فقدان خاموت چشمه اتصال را جبران می‌نماید. به گونه‌ای که شکل-پذیری اتصالات عددی بررسی شده را نسبت به نمونه ضعیف بتنی به طور متوسط به میزان ۱۰ درصد افزایش می‌دهد و به مقدار شکل-پذیری نمونه مرجع بتنی می‌رساند؛ بنابراین می‌تواند جایگزین مناسبی برای آرماتورهای عرضی ناحیه اتصال باشد. نمونه FWPHP3، به دلیل محصوریت همزمان ناحیه ویژه تیر و ستون و چشمه اتصال بالاترین شکل‌پذیری را داشته است.

- Bedirhanoglu, I., Ilki, A. and Kumbasar, N., "Precast Fiber Reinforced Cementitious Composites for Seismic Retrofit of Deficient RC Joints" *Journal of Engineering Structure*, Vol. 52, pp.192–206, 2013.
- Canbolat, B. A., Parra-Montesinos, G. J. and Wight, J. K., "Experimental Study on the Seismic Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composite Coupling Beams", *Structural Journal*, 102(1), PP.159-166, 2005.
- Cho, C. G., Kim, Y. Y., Feo, L. and Hui, D., "Cyclic Responses of Reinforced Concrete Composite Columns Strengthened in the Plastic Hinge Region by HPFRCC Mortar" *Journal of Composite Structure*, Vol. 94, No. 7, pp. 2246–2253, 2012.
- Choi, H. K., Park, B. K., Bae, B.I. and Choi, C.S., "Lateral Resistance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted with ECC" *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 26, No. 12, pp. 3–10, 2010.
- Emami, E., "Cyclic Performance of Retrofitted Reinforced Concrete Beam- Column Joints Using Steel Prop" M.Sc Thesis, Department of Structural Engineering, Semnan University, 2010. (in Persian فارسی).
- Fischer, G. and Li, V.C., "Effect of Matrix Ductility on Deformation Behavior of Steel Reinforced ECC Flexural Members under Reversed Cyclic Loading Conditions" *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 6, pp. 781-790, 2002.
- Hemmati, A., "Investigation of Flexural Behavior of HPFRCC Beams and Frames" PhD Thesis, Department of Structural Engineering, Semnan University, 2013. (in Persian فارسی).
- Hemmati, A., Kheyroddin, A., Sharbatdar, M.K., Park, Y. and Abolmaali, A., "Ductile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC) Frames" *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 115, pp.681–689, 2016.
- Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K., "Plastic Hing Rotation Capacity of Reinforced HPFRCC Beams" *ASCE's Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, No. 2, 2015.
- Hemmati, A., Kheyroddin, A. and Sharbatdar, M.K., "Using HPFRCC for Increasing the Capacity of R.C Frame" *Journal of Sharif Civil Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 97–106, 2012. (in Persian فارسی).
- Kim, J.H.J., Lim, Y.M., Won, J.P., Park, H.G. and Lee, K.M., "Shear Capacity and Failure Behavior of DFRCC Repaired RC Beams at Tensile Region" *Journal of Engineering Structure*, Vol. 29, No. 1, pp. 121–131, 2007.
- Lavorato, D., Bergami, A.V., Nuti, C., Briseghella, B., Xue, J., Tarantino, A.M., Marano, G.C., Santini, S., "Ultra-High- Performance Fiber- Reinforced Concrete Jacket for the Repair and the Seismic Retrofitting of Italian and Chinese RC Bridges" 6<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference, 2017.
- Maalej, M., Ahmed, S. F. U. and Paramasivam, P., "Corrosion Durability and Structural Response of Functionally-Graded Concrete Beams", *JCI International workshop on ductile fiber reinforced Cementitious composites (DFRCC)-Application and Evaluation, Japan*, PP. 161-170, 2002.
- Maheri, M. R., Karihaloo, B. and Alaei, F. J., "Seismic Performance Parameters of RC Beams Retrofitted by CARDIFRC" *Journal of Engineering Structures*, 26, pp. 2069-2079, 2004.
- Park, W. S., Kim, J. E., Kim, S. W., Yun, S.H., Eom, N.Y. and Yun, H.D., "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, 2013.
- Parra-Montesinos, G.J., Peterfreund, S.W. and Chao, S.H., "Highly Damage-Tolerant Beam-Column Joints Through Use of High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites" *ACI Structural Journal*, 102(3), PP. 487-495, 2005.
- 2- Saghafi, M.H., Shariatmadar, H., Kheyroddin, A., "Experimental Study and Application of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites for Retrofitting Beam-Column Joints in Rigid-Framed Railway Bridges" *Transportation Infrastructure Engineering*, Vol. 2, Issue 1, pp. 33-51, 20016. (in Persian فارسی).
- Shafaei, J., Hosseini, A. and Marefat, M. S., "Seismic Retrofit of External RC Beam- Column Joints by Joint Enlargement Using Prestressed Steel Angles" *Journal of Engineering Structures* 81, pp. 265-288, 2014.
- Shafaei, J., Zareian, M. S., Hosseini, A. and Marefat, M. S., "Effect of Joint Flexibility on Lateral Response of Reinforced Concrete Frames" *Journal of Engineering Structures* 81, pp. 412-431, 2014.
- Sharbatdar, M.K., Kheyroddin A. and Emami, E., "Cyclic Performance of Retrofitted Reinforced Concrete Beam-Column Joints Using Steel Prop" *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp.287–294, 2012.
- Tasnimi, A.A. and Salimi, M., "The effect of concrete confinement on the behavior factor of concrete structures" *Journal of Engineering*, Tarbiat Modares university, Vol.19, Issue 1, 2007.
- Yoo, C. H., Choi, H. K., Choi, Y.C. and Choi, C.S., "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, 2009.
- Yun H. D., Byun J. B., Jeon, S. M. and Hwang, S. K., "Compressional Behavior of HPFRCC Columns Under Axial Loads" *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 22(10), pp. 29–36, 2006.
- Zhang, R., Matsumoto, K., Hirata, T., Ishizeki, y. and Niwa, J., "Application of PP-ECC in Beam-Column Joint Connections of Rigid-Framed Railway Bridges to Reduce Transverse Reinforcements" *Journal of Eng. Struct*, 86:146-156, 2015.