

تأثیر کاربرد کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) در بهبود رفتار چرخه-ای اتصالات تیر به ستون بتن آرمه

فرزین مولودی^۱، علی خیرالدین^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۶	مطالعات اخیر نشان داده است که اتصالات تیر به ستون در سازه‌های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار هستند؛ به طوری که خرابی این قسمت‌ها که از اجزای اصلی انتقال نیرو در ساختمان هستند، باعث انهدام و ناپایداری کل سازه می‌شود. یکی از روش‌های نوین برای ساخت اتصالات تیر به ستون، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند (HPFRCC) می‌باشد. این مصالح، شامل ملات سیمانی با سنگ‌دانه‌های ریز و الیاف بوده و به دلیل اینکه تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت‌شوندگی کُرنشی از خود نشان می‌دهند، قابلیت ترک‌خوردگی‌های زیاد قبل از شکست و قابلیت جذب انرژی بالایی دارد و می‌تواند منجر به شکل‌گیری سازه‌هایی با مقاومت و شکل‌پذیری بالاتر، نسبت به سازه‌های بتنی رایج شود. در این مقاله، پس از معرفی مصالح HPFRCC، میزان تأثیرگذاری کاربرد مصالح HPFRCC در بهبود عملکرد اتصال تیر به ستون، بررسی شده است. به همین منظور، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط چاو ^۴ در دانشگاه میشیگان، مبنای صحت‌سنجی ^۵ مدل اجزای محدود قرار گرفته و تأثیرگذاری پارامترهای مختلف اتصال، به صورت تکی و یا ترکیبی، در مدل مینا، بر روی عملکرد اتصال، بررسی شده است. نتایج تحلیل مدل‌های اجزای محدود غیرخطی، نشان داد که نسبت شکل‌پذیری برای مدل‌های HC-B0-C711.2 و HC-B0-C355.6 از مدل‌های دیگر، بیشتر می‌باشد؛ به صورتی که نسبت شکل‌پذیری آنها نسبت به اتصال مینا، ۵۰/۱ درصد بیشتر است. علاوه بر این، مقاومت حداکثر اتصال HC-BS50، از تمامی مدل‌های دیگر، بیشتر می‌باشد؛ به طوری که مقاومت حداکثر آن، نسبت به اتصال مینا، ۴/۶ درصد بیشتر است.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۳۰	
واژگان کلیدی: HPFRCC کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند، بتن آرمه، اتصال تیر به ستون، رفتار چرخه‌ای، شکل‌پذیری.	

۱- مقدمه

جدید و یا بهسازی لرزه‌ای اتصالات موجود، ارائه شده است. یکی از روش‌های نوین برای ساخت اتصالات تیر به ستون، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند می‌باشد. مصالح HPFRCC به دلیل اینکه تحت کشش، رفتار سخت‌شوندگی کُرنشی از خود نشان می‌دهند، قابلیت ترک‌خوردگی‌های زیاد قبل از شکست و قابلیت جذب انرژی بالایی دارد. مفهوم بتن توانمند^۶، تقریباً در دهه ۱۹۸۰ میلادی، مطرح شده است. این مصالح نوین، بتنی است که

اتصالات تیر به ستون در سیستم قاب خمشی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد؛ زیرا رفتار کلی قاب خمشی، وابستگی مستقیم به رفتار اتصالات تیر به ستون دارد. از آنجا که اتصالات تیر به ستون تحت تأثیر نیروهای بزرگی در حین زلزله قرار دارد، یکی از نقاطی که احتمال آسیب در آن وجود دارد، اتصال خمشی تیر به ستون است. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی جهت ساخت اتصالات

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: kheyroddin@semnan.ac.ir

۱. کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران

³ High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites

⁴ Chao Shih-Ho

⁵ Verify

⁶ High Performance Concrete

ترک خوردگی اولیه، رفتار سخت‌شوندگی کرنش، مشاهده می‌گردد؛ در صورتی که در منحنی تنش - کرنش بتن الیافی، بلافاصله پس از نخستین ترک خوردگی، رفتار نرم-شوندگی کرنش، بروز می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت که مصالح HPFRCC، نوع خاصی از بتن‌های الیافی می‌باشند که ویژگی بارز آن‌ها، رفتار سخت‌شوندگی کرنش کششی پس از ترک خوردگی اولیه می‌باشد که با ترک‌های چندگانه تا رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد، همراه است. تنها در مصالح HPFRCC، مقاومت پس از ترک خوردگی، σ_{PC} ، بالاتر از مقاومت ترک خوردگی اولیه، σ_{CC} ، می‌باشد [۳].

مصالح HPFRCC، مرکب از دو بخش اصلی، شامل: الیاف طبیعی یا مصنوعی با درصد حجمی کمتر از ۲ درصد و همچنین ملات، شامل: سنگ‌دانه‌های ریز، سیمان و مواد افزودنی هستند. به دلیل پیوستگی بین الیاف و ملات، ترکیب این دو با یکدیگر، منجر به شکل‌گیری یک کامپوزیت قوی می‌شود. این مصالح، به لحاظ خصوصیات مکانیکی و فیزیکی، تفاوتی با بتن‌های الیافی معمولی، به جز قابلیت ترک خوردگی چندگانه، رفتار کششی و شکل-پذیری بالا، ندارند. در برخی از آزمایش‌ها، مصالح HPFRCC توانسته‌اند تا چهار درصد کرنش را تحمل کنند [۵].

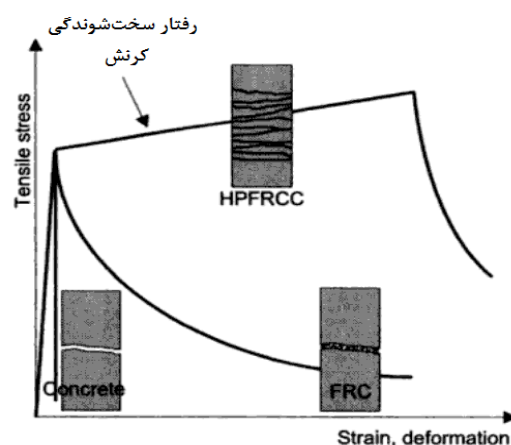
انواع الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند، از نظر جنس مصالح، عبارت‌اند از:

- الیاف طبیعی آلی^۵، مانند سلولز، کنف^۶، بامبو، موی اسب و غیره.
- الیاف طبیعی معدنی^۷، نظیر آزبست، پشم کوهی^۸ و غیره.
- الیاف ساخته دست بشر، مانند فولاد، تیتانیوم^۹، شیشه، کربن، پلیمرها و مصنوعی‌ها^{۱۰} که الیاف مصنوعی، شامل الیاف^{۱۱} PVA،^{۱۲} PP،^{۱۳} PE و غیره هستند.

در مصالح HPFRCC، پس از وقوع اولین ترک، الیاف شروع به پُل زدن^{۱۴} می‌کنند و از گسترش ترک، جلوگیری می‌شود. با افزایش نیروی کششی، ترک جدیدی در نقطه‌ای

خصوصیات ویژه‌ای، شامل سخت‌شوندگی کرنشی، مقاومت، دوام و مقاومت در برابر عوامل مهاجم خارجی را دارد. مهم-ترین عیب بتن، مقاومت کششی پایین و مقاومت کم در برابر بازشدگی و گسترش ترک‌ها (شکندگی بتن) می‌باشد. به همین دلیل، از زمان‌های قدیم، مصالح ساختمانی شکننده نظیر خشت‌های رُسی، با الیاف طبیعی نظیر کاه و موی اسب، مسلح می‌شدند.

نمان^۱ و رینهارت^۲ در چهارمین کارگاه آموزشی ریلیم^۳ در سال ۲۰۰۳ میلادی، مصالحی را که در منحنی تنش - کرنش کششی خود، دارای یک بخش سخت‌شوندگی کرنش کششی بوده‌اند را به عنوان کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند معرفی نمودند. همچنین مصالح HPFRCC جدای از بتن‌های الیافی (FRC^۴) دسته‌بندی شده‌اند [۱] و می‌توان گفت یکی از مهم‌ترین کاربردهای بتن الیافی، مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتن مسلح می‌باشد [۲].



شکل ۱: مقایسه منحنی‌های تنش - کرنش کششی بتن معمولی، بتن الیافی (FRC) و مصالح HPFRCC و نحوه انهدام آن‌ها [۴]

در شکل (۱)، منحنی‌های تنش - کرنش کششی بتن معمولی، بتن الیافی (FRC) و مصالح HPFRCC و نحوه انهدام آن‌ها، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۱)، مشخص می‌باشد که در اثر تنش‌های کششی، تنها در مصالح HPFRCC، ترک‌های چندگانه تشکیل شده‌اند. در منحنی تنش - کرنش مصالح HPFRCC، پس از مرحله

⁸ Rock-wool

⁹ Titanium

¹⁰ Synthetic

¹¹ Poly-Vinyl Alcohol

¹² Poly Propylene

¹³ Poly Ethylene

¹⁴ Bridging

¹ Naaman

² Reinhardt

³ Rilem Workshop

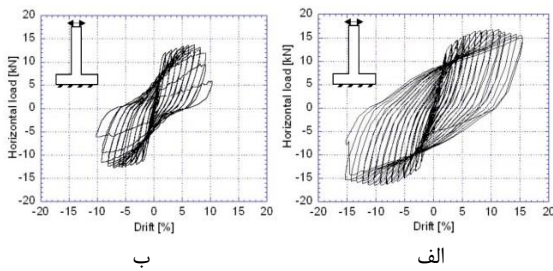
⁴ Fiber Reinforced Concrete

⁵ Natural Organic Fibers

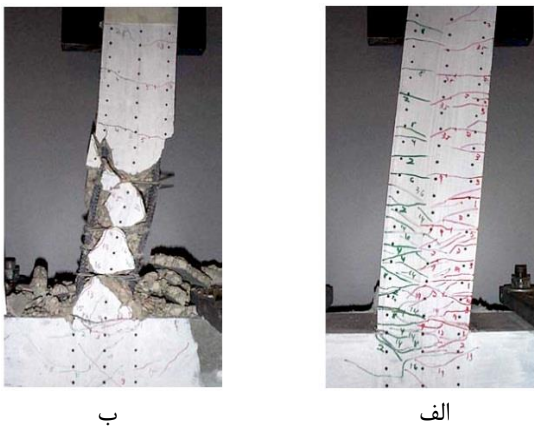
⁶ Jute

⁷ Natural Mineral

جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳: منحنی‌های هیستریزس بار جانبی - دررفت ستون‌های ساخته شده از: الف- مصالح ECC (بدون خاموت) و ب- بتن معمولی (دارای خاموت) [۱۲]



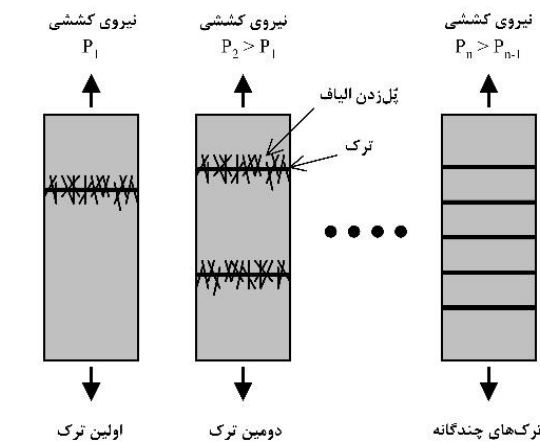
شکل ۴: آسیب وارد به ستون‌های ساخته شده از: الف- مصالح ECC (بدون خاموت) و ب- بتن معمولی (دارای خاموت) [۱۲]

فیشر و لی، آزمایش‌هایی را در زمینه بررسی و مقایسه رفتار خمشی یک ستون ساخته شده از بتن معمولی (دارای خاموت) و یک ستون ساخته شده از مصالح ECC (بدون خاموت)، تحت بار جانبی رفت و برگشتی انجام داده‌اند [۱۲] که نتایج منحنی‌های هیستریزس بار جانبی - دررفت ستون‌های مذکور، در شکل (۳) و آسیب وارده به ستون‌های مذکور، در شکل (۴) نشان داده شده است.

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مصالح ECC [۱۱]

چگالی (g/cm^3)	کرنش کششی نهایی (%)	مدول یانگ (GPa)	مدول گسیختگی (MPa)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مقاومت ترک- خوردگی اولیه (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
۰/۹۵-۲/۳	۱-۸	۱۸-۳۴	۱۰-۳۰	۴-۱۲	۳-۷	۲۰-۹۵

دیگر تشکیل می‌گردد و این مکانیسم تا تشکیل چندین ترک در محل‌های مختلف نمونه HPFRCC ادامه می‌یابد (شکل (۲)).



شکل ۲: نحوه تشکیل ترک‌های چندگانه در مصالح HPFRCC [۶]

انواع متداول مصالح HPFRCC به صورت زیر می‌باشد:
داکتال^۱: این کامپوزیت، نتیجه تحقیقات اولیه بیک^۲ در سال ۱۹۸۱ می‌باشد. در این کامپوزیت، به منظور افزایش مقاومت کششی و فشاری، از یک ملات متراکم و سفت، همراه با الیاف با مقاومت بالا استفاده می‌شود [۷].
 تحقیقات انجام شده توسط چانویلارد^۳ و ریگاد^۴ در سال ۲۰۰۳ بر روی این کامپوزیت، مقاومت کششی برابر با ۱۲ مگاپاسکال و شکل‌پذیری ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ درصد را نشان داده است [۸].

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی (ECC)^۵: این مصالح در دانشگاه میشیگان توسعه یافته است و بر اساس آزمایش‌های انجام گرفته توسط لی^۶ در سال ۱۹۹۳ و فیشر^۷ در سال ۲۰۰۳ در این دانشگاه، شکل‌پذیری ۳ تا ۵ درصد و مقاومت کششی ۴ الی ۶ مگاپاسکال از خود نشان داده است [۹ و ۱۰]. خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مصالح ECC در

⁶ Li
⁷ Fischer

¹ Ductal
² Bache
³ Chanvillard
⁴ Rigaud
⁵ Engineered Cementitious Composites

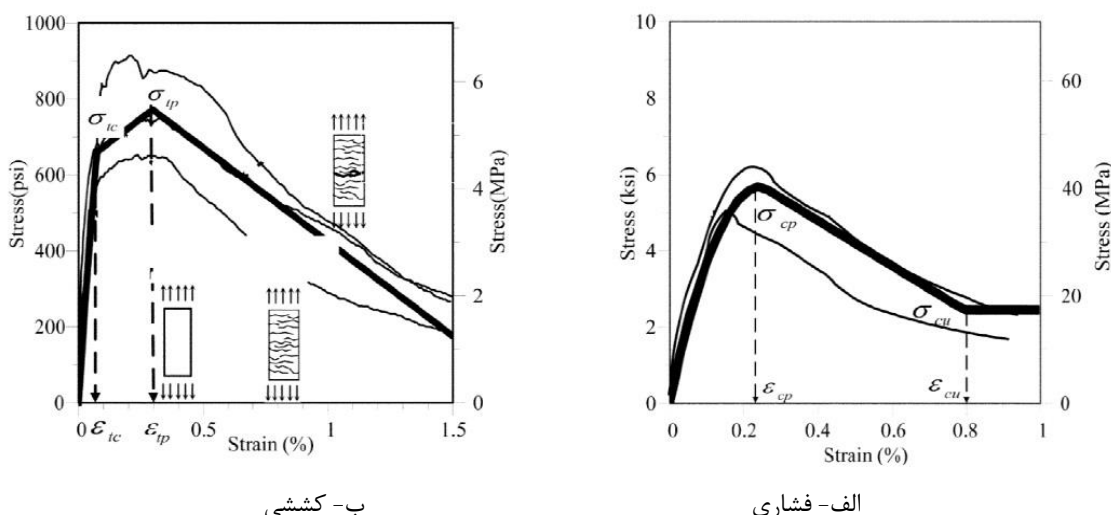
قاب با مصالح HPFRCC، نسبت به بتن معمولی، دارای شکل‌پذیری و جذب انرژی بیشتری بوده و ضمن اینکه ترک‌خوردگی در تیر طولانی‌تر بوده، دارای حداقل طول ترک‌خوردگی در ستون نیز می‌باشد. همچنین دارای مقادیر بار جانبی نهایی بزرگ‌تری می‌باشد [۱۳].

روابط مختلفی برای منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی مصالح HPFRCC، توسط محققین مختلف ارائه شده است.

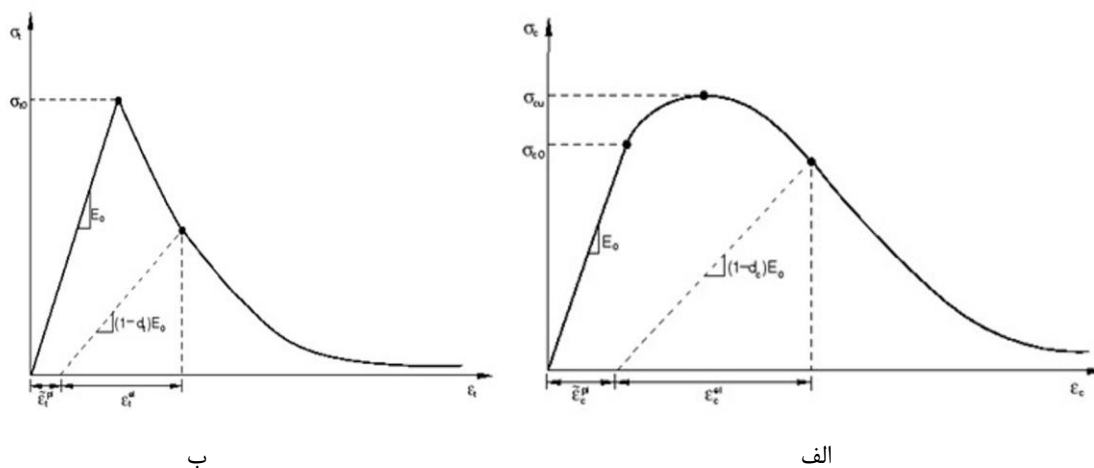
به عنوان نمونه، هانگ^۲ و التاویل^۳، منحنی‌های تنش - کرنش فشاری و کششی شکل (۵) را برای رفتار مصالح HPFRCC ارائه کرده‌اند که هرکدام از منحنی‌ها، از سه بخش تشکیل شده است.

نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که ستون ساخته شده از مصالح HPFRCC، نسبت به ستون بتن معمولی، آسیب کمتری را تحمل کرده است و از ظرفیت جذب انرژی بالاتری برخوردار می‌باشد [۱۲].

همتی و همکاران، به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌های مصالح HPFRCC و مقایسه آنها با بتن معمولی، مطالعات آزمایشگاهی را بر روی قاب‌های بتن مسلح انجام داده‌اند [۱۳]. نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که با جایگزینی مصالح HPFRCC به جای بتن معمولی در قاب بتن مسلح، الیاف به عنوان آرماتورهای فولادی اضافی عمل می‌کنند که باعث شکل‌پذیری قاب و مکانیسم پُل‌زنی^۱ شده و مانع از خرد شدن مصالح HPFRCC فشاری می‌شوند. همچنین



شکل ۵: منحنی تنش - کرنش فشاری و کششی مصالح HPFRCC [۱۴]



شکل ۶: منحنی تنش - کرنش تک‌محوری بتن تحت: الف- کشش ب- فشار [۱۷]

³ El Tawil

¹ Bridging Mechanism

² Hung

المان محدود است، استفاده شده است. این نرم‌افزار به علت داشتن المان‌های متعدد، قابلیت مدل‌سازی بتن، میلگردهای فولادی، بتن مسلح و کامپوزیت‌های سیمانی را داراست. برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن، شیوه‌ها و گزینه‌های مختلفی در این نرم‌افزار وجود دارد که با توجه به رفتار کششی ویژه مصالح HPFRCC، مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن^۲ استفاده می‌شود. در این گزینه، امکان وارد کردن نقاط مختلف تنش - کرنش بتن و کامپوزیت در کشش و فشار، وجود دارد [۱۵] و قادر به مدل‌سازی شرایط بارگذاری دلخواه، مانند بارگذاری چرخه‌ای می‌باشد [۱۶] و بر اساس فرضیات آسیب‌دیدگی همسان استوار است. در این مدل، اثر کاهش سختی الاستیک ناشی از کرنش‌های پلاستیک در کشش و فشار، در نظر گرفته شده است. همچنین در این مدل، تأثیر بهبود سختی در حالت بارگذاری چرخه‌ای، لحاظ شده است. مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن، بر اساس مطالعات لی و فنوس^۳ بنا نهاده شده است. در این مدل، منحنی تنش - کرنش تک‌محوری بتن معمولی و مصالح HPFRCC در کشش و فشار، به عنوان منحنی رفتاری بتن در نظر گرفته می‌شود [۱۷] و دو مکانیسم برای انهدام بتن پیش‌بینی شده است. مکانیسم اول، ترک‌خوردگی بتن تحت کشش و مکانیسم دوم، خردشدگی بتن تحت فشار می‌باشد [۱۸].

رابطه تنش-کرنش کششی بتن تا رسیدن تنش به مقدار تنش گسیختگی بتن، σ_{t0} ، در منحنی تنش - کرنش بتن تحت کشش (شکل ۶-الف))، به صورت خطی می‌باشد. رسیدن به تنش گسیختگی با تشکیل مجموعه‌ای از ریزترک‌ها در بتن همراه است. پس از آن، شاخه نرم‌شدگی بتن، به دلیل ترک‌خوردگی بتن به صورت ماکروسکوپی، آغاز می‌گردد که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک‌خوردگی همراه می‌باشد.

منحنی تنش - کرنش بتن در فشار (شکل ۶-ب))، تا تنش تسلیم اولیه، σ_{c0} ، به صورت خطی تغییر می‌نماید. سپس ناحیه غیرخطی و افزایش منحنی شروع شده و تا نقطه مربوط به تنش نهایی، σ_{cu} ، که همان نقطه مقاومت فشاری بتن است، ادامه می‌یابد. پس از آن، شاخه نرم‌شونده منحنی تنش - کرنش آغاز می‌شود و بتن تحت فشار، خرد می‌شود. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، در حالت

در منحنی تنش - کرنش فشاری، منحنی، از نقطه صفر تا نقطه تنش فشاری حداکثر و کرنش متناظر آن (σ_{cp} و ε_{cp})، به صورت تابع نمایی افزایش می‌یابد. پس از نقطه تنش فشاری حداکثر، منحنی به صورت خطی تا رسیدن به نقطه تنش فشاری نهایی و کرنش متناظر آن (σ_{cu} و ε_{cu})، به صورت خطی، کاهش می‌یابد. پس از نقطه تنش فشاری نهایی، رفتار پلاستیک کامل برای مصالح HPFRCC پیشنهاد شده است. روابط ارائه‌شده برای منحنی فشاری، در معادله (۱) ذکر شده است. در منحنی تنش-کرنش کششی، منحنی، از نقطه صفر تا نقطه تنش و کرنش متناظر با اولین ترک‌خوردگی (σ_{tc} و ε_{tc}) ادامه می‌یابد. پس از نقطه اولین ترک‌خوردگی، سختی مصالح، کاهش یافته و رفتار سخت‌شوندگی کرنشی، آغاز می‌شود. در این ناحیه از منحنی، ترک‌های چندگانه در نمونه، شکل می‌گیرد. پس از نقطه حداکثر تنش کششی، شکست نمونه در یک نقطه، متمرکز شده و منحنی، تا رسیدن به نقطه تنش صفر و کرنش کششی نهایی (ε_{tu})، به صورت خطی، کاهش می‌یابد. روابط ارائه‌شده برای منحنی تنش - کرنش کششی، در معادله (۲) ارائه شده است [۱۴].

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cp}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cp}} \right)^2 \right] \rightarrow \varepsilon_{cp} \leq \varepsilon < 0 \\ \sigma_{cp} \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{cp}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{cp}} \right) \rightarrow \varepsilon_{cu} \leq \varepsilon < \varepsilon_{cp} \\ k_0 f'_{cc} \rightarrow \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{tc}} \sigma_{tc} \rightarrow 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{tc} \\ \sigma_{tc} + (\sigma_{tp} - \sigma_{tc}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tc}}{\varepsilon_{tp} - \varepsilon_{tc}} \right) \rightarrow \varepsilon_{tc} \leq \varepsilon < \varepsilon_{tp} \\ \sigma_{tp} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tp}} \right) \rightarrow \varepsilon_{tp} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \\ 0 \rightarrow \varepsilon_{tu} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

در این مقاله، تأثیر کاربرد مصالح HPFRCC در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون بتنی، بررسی شده است.

۲- مشخصات مدل‌های تحلیلی

۲-۱- نرم‌افزار مورد استفاده

در این مقاله، از نرم‌افزار آباکوس^۱ که یک نرم‌افزار غیرخطی

³ Lee and Fenves

¹ ABAQUS

² Concrete damaged plasticity model

این المان‌ها قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن و فولاد را دارا می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه‌شده در تحقیقات چاو [۱۹]، منحنی تنش - کرنش میلگردهای M10، M19 و M6، رسم شده و اندرکنش بین فولاد و بتن، با استفاده از قید Embedded region در نرم‌افزار آباکوس، در نظر گرفته شد.

۲-۲- مدل‌های مورد بررسی و نحوه مدل‌سازی

در این مقاله، نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط چاو در دانشگاه میشیگان [۱۹]، در خصوص نمونه شماره دو، مبنای صحت‌سنجی مدل اجزای محدود قرار گرفته و نمونه شماره دو اتصال داخلی تیر به ستون، از بتن مسلح معمولی و مصالح HPFRCC ساخته شده است (شکل (۱۱)). نحوه انجام آزمایش اتصال آزمایشگاهی، در شکل (۷) نشان داده شده است.

در بخش‌هایی از تیر در مجاورت محل اتصال تیر به ستون، به طول دو برابر عمق تیر، از مصالح HPFRCC شامل ۱/۵ درصد حجمی الیاف پلی‌اتیلن استفاده شده است. این مقدار از الیاف، حداقل درصد حجمی است که به وسیله آن، رفتار سخت‌شوندگی کرنشی در آزمایش‌های کششی مصالح فراهم شده است. ابعاد هندسی و جزئیات میلگردگذاری دو نمونه آزمایشگاهی، در شکل (۸) (الف و ب) ارائه شده است.

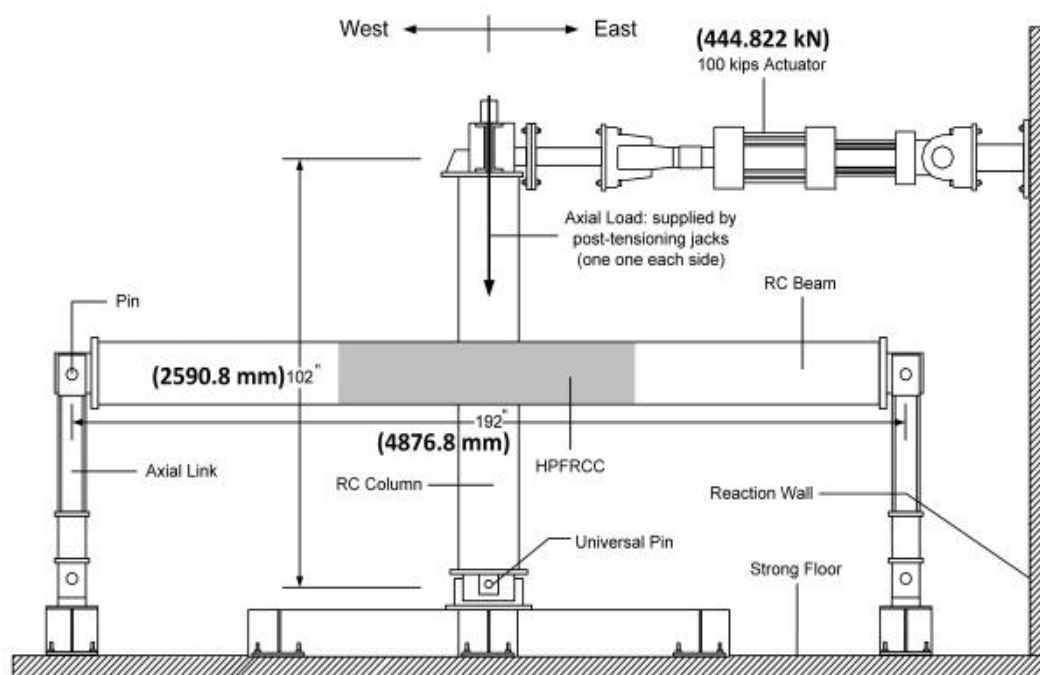
باربرداری در قسمت نرم‌شوندگی منحنی تنش - کرنش، شیب منحنی باربرداری از شیب منحنی الاستیک کمتر است که این موضوع، نشان‌دهنده در نظر گرفته شدن آسیب در مدل می‌باشد. کاهش سختی بتن بر اثر باربرداری در شاخه نرم‌شونده، به وسیله پارامترهای d_t و d_c در نظر گرفته شده و می‌تواند بر اثر ترک‌خوردگی بتن در کشش یا انهدام بخشی از بتن در فشار رخ دهد. پارامترهای d_t و d_c ، مقادیری بین صفر و یک دارند و تابعی از کرنش پلاستیک می‌باشند. مقدار صفر برای این پارامترها، نشان‌دهنده بتن بدون آسیب و مقدار یک برای آنها، بیانگر از بین رفتن همه مقاومت بتن می‌باشد [۱۷].

معادلات تنش - کرنش بتن در کشش و فشار، به ترتیب، در روابط (۳) و (۴)، آمده است:

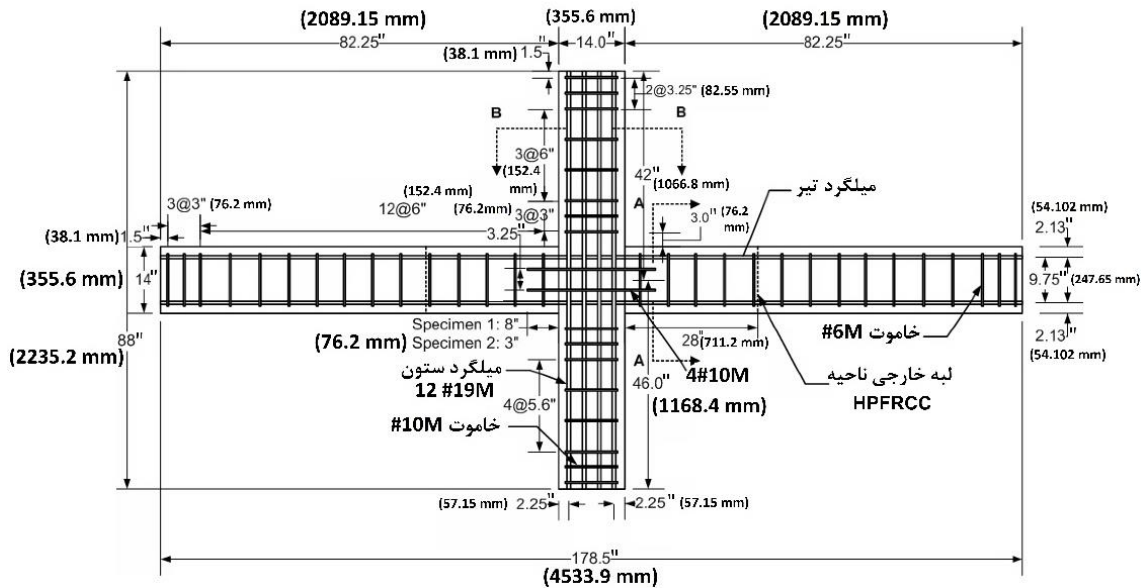
$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (3)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (4)$$

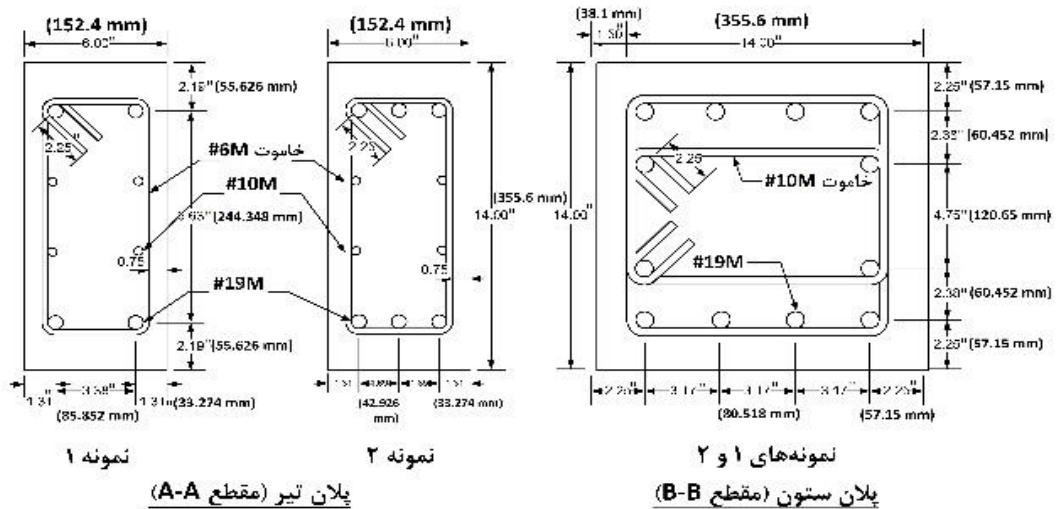
که در آن، E_0 ، مدول الاستیسیته بتن قبل از آسیب‌دیدگی بتن؛ $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$ و $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$ ، کرنش خمیری بتن تحت فشار و کشش و ε_t و ε_c ، کرنش کل بتن تحت فشار و کشش می‌باشد. برای مدل‌سازی مصالح HPFRCC و بتن معمولی، از المان سه‌بُعدی هشت گرهی C3D8R و برای مدل‌سازی فولاد، از المان سه‌بُعدی دو گرهی خرپا C3D2 استفاده شده است.



شکل ۷: نحوه انجام آزمایش اتصال آزمایشگاهی [۱۹]



شکل ۸- الف: ابعاد هندسی و جزئیات میلگردگذاری دو نمونه آزمایشگاهی [۱۹]



شکل ۸- ب: ابعاد هندسی و جزئیات میلگرد گذاری دو نمونه آزمایشگاهی [۱۹]

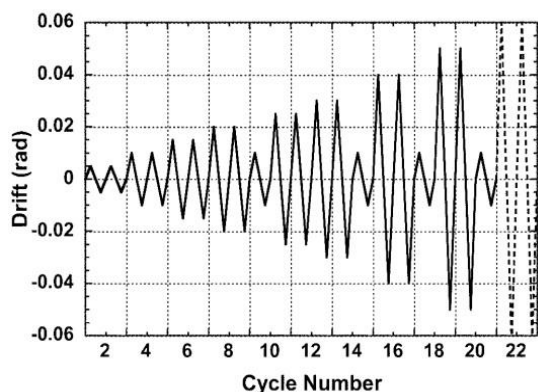
جدول ۲: خلاصه نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های مصالح HPFRCC و اتصال تیر به ستون [۱۹]

Specimen	High-Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC)			$\frac{\sum M_{nc}}{\sum M_{ub}}$	$(v_j)_{max}$ ($\sqrt{f'_c}$, MPa)	$(\gamma)_{max}$, rad	Drift capacity, Rad	Max. Beam rotation, Rad
	σ_{pc} , MPa	ϵ_{pc}	f'_c , MPa					
1	2.7	0.010	39.3	2.2	1.2	0.002	0.05	0.045
2	2.2	0.013	42.7	1.6	1.4	0.008	0.06	0.045

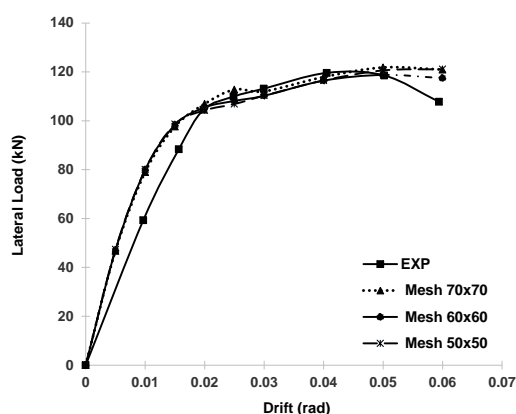
جدول ۳: مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی استفاده شده در اتصال آزمایشگاهی [۱۹]

Specimen	No. 19M Bars		No. 10M		No. 6M Stirrups	
	f_y , MPa	f_u , MPa	f_y , MPa	f_u , MPa	f_y , MPa	f_u , MPa
1	540	660	500	770	560	610
2	435	695	NA	NA		

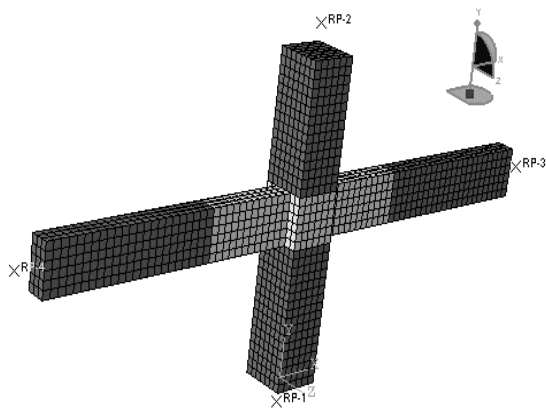
با ۴۳/۹ و ۴۱/۳ مگاپاسکال به دست آمده است [۱۹]. مشخصات مکانیکی میلگردهای طولی و عرضی استفاده‌شده در نمونه‌های ۱ و ۲ اتصال تیر به ستون، در جدول ۳، ارائه شده است.



شکل ۹: تاریخچه تغییر مکان جانبی نقطه مرجع بالای ستون [۱۹]



شکل ۱۰: نمودارهای نتایج پوش بار - دررفت مدل اجزای محدود، برای مقادیر مختلف اندازه مش‌بندی



شکل ۱۱: اتصال مدل‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

با توجه به شکل‌های (۷) الی (۹)، مشخصات ارائه‌شده در جداول ۲ و ۳ و سایر داده‌های مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط چاو در دانشگاه میشیگان، مدل تحلیلی از

به منظور در نظر گرفتن اثر نیروی محوری ستون در رفتار اتصال، در حین انجام آزمایش، نیروی محوری برابر با چهار درصد ظرفیت باربری محوری ستون (۲۳۲ کیلو نیوتن)، به ستون وارد شده است. در دو انتهای تیر، از تکیه‌گاه غلتکی و در پایین ستون، از تکیه‌گاه ثابت مفصلی استفاده شده است. بالای ستون، در مقابل حرکت در صفحه عمود بر اتصال، مهارشده است؛ لیکن به وسیله جک هیدرولیکی ۱۰۰ Kips (۴۴۴.۸۲۲ کیلو نیوتن) به صورت رفت و برگشتی در صفحه اتصال، جابجا می‌شود و تحت بارگذاری چرخه‌ای شبه دینامیکی آزمایش شده‌اند. تاریخچه تغییر مکان رفت و برگشتی نقطه مرجع بالای ستون، از ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ رادیان تغییر می‌کند (شکل (۹)). البته در مدل‌سازی و تحلیل مدل‌های مختلفی که به منظور بررسی اثرات پارامترهای مختلف اتصال، بر روی رفتار لرزه‌ای اتصال، انجام گرفته، بارگذاری تا دررفت‌های بالاتر، مثلاً ۰/۱ رادیان نیز به اتصال، اعمال شده است.

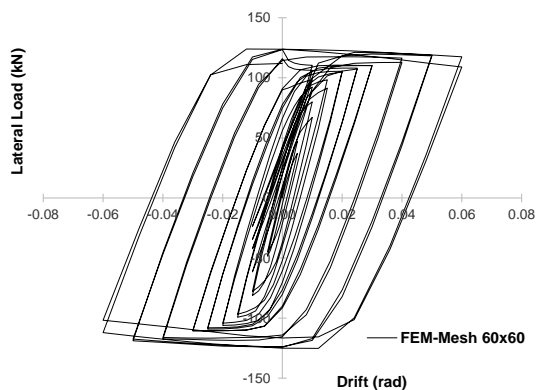
تحلیل مدل اجزای محدود، در دو گام انجام شده است. در گام اول؛ مدل، تحت بار محوری وارد بر ستون و در گام دوم؛ مدل، تحت بار تغییر مکانی رفت و برگشتی وارد بر نقطه مرجع بالای ستون، تحلیل شده است. در تحلیل‌های اجزای محدود، اثرات غیرخطی هندسی (NLGEOM) و غیرخطی مصالح، در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، به منظور بررسی امکان جایگزینی مصالح HPFRCC با میلگردهای عرضی (خاموت)؛ در چشمه اتصال، از میلگرد عرضی، استفاده نشده است. علاوه بر میلگردهای لایه‌های فوقانی و تحتانی تیر که در سرتاسر طول تیر، امتداد دارند، چهار میلگرد به طول ۵۰۸ میلی‌متر در دو لایه میانی در تیر در محل چشمه اتصال، استفاده شده است. در جدول ۲، خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی مصالح HPFRCC ارائه شده است.

که در جدول فوق، σ_{pc} حداکثر مقاومت پس از ترک‌خوردگی؛ ϵ_{pc} ظرفیت کرنش کششی در حداکثر تنش؛ M_{nc} و M_{ub} به ترتیب برابر با ظرفیت لنگر خمشی اسمی ستون و لنگر مقاوم نهایی تیر؛ γ_j و γ به ترتیب تنش برشی اتصال و اعوجاج برشی اتصال می‌باشند.

بتن معمولی مورد استفاده در ستون‌ها و نواحی از تیر که از محل اتصال تیر به ستون، دور هستند، به وسیله یک مخلوط‌کن معمولی بتن تهیه شده است. مقاومت فشاری متوسط بتن معمولی برای نمونه‌های ۱ و ۲، به ترتیب برابر

در شکل (۱۱)، اتصال مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس و در شکل (۱۲)، منحنی هیستریزیس برای مدل کالیبره شده، ارائه شده است.

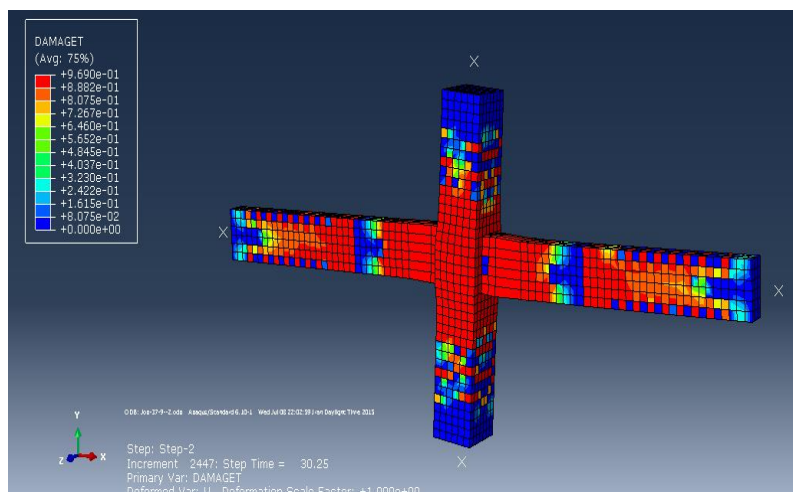


شکل ۱۲: منحنی هیستریزیس برای مدل کالیبره شده

نمونه دو اتصال آزمایشگاهی، ساخته شد و برای کالیبره کردن نتایج تحلیل اجزای محدود با نتایج نمونه دو اتصال آزمایشگاهی، تحلیل های حساسیت بر روی پارامترهای موجود در نرم افزار آباکوس، برای بتن معمولی و مصالح HPFRCC، انجام شده است. همچنین برای بررسی تأثیر اندازه مش بندی المان ها بر روی نتایج مدل اجزای محدود، سه مدل تحلیلی با مش بندی های مختلف از نمونه دو اتصال آزمایشگاهی، برای کالیبره کردن نتایج تحلیل، به کار رفت که منحنی های پوش بار - دریفت این سه اتصال، در شکل (۱۰) ارائه شده است. همان گونه که ملاحظه می شود، مدل با مش بندی متوسط و به ابعاد 60×60 میلی متر، منجر به نتایج نزدیک تری با نتایج آزمایشگاهی شده است؛ لذا به عنوان مدل مورد بررسی، انتخاب شده است. همچنین

جدول ۴: نحوه نام گذاری مدل ها

عبارت	توضیح
C	اتصال، از بتن معمولی ساخته شده است.
H	اتصال، از مصالح HPFRCC ساخته شده است.
HC	اتصال، از ترکیب بتن معمولی و مصالح HPFRCC ساخته شده است.
B0	طول ناحیه HPFRCC در تیر، برابر با صفر است.
B355.6	طول ناحیه HPFRCC در تیر، برابر با $355/6$ میلی متر است.
C355.6	طول ناحیه HPFRCC در ستون، برابر با $355/6$ میلی متر است.
BS50	فاصله بین خاموت ها در تیر، برابر با 50 میلی متر است.
CS70	فاصله بین خاموت ها در ستون، برابر با 70 میلی متر است.
f_c28	مقاومت فشاری بتن و مصالح HPFRCC، 28 مگاپاسکال است.
f'_c35	مقاومت فشاری بتن و مصالح HPFRCC، 35 مگاپاسکال است.
WO4Bars	اتصال، فاقد چهار میلگرد طولی در تیر، در چشمه اتصال می باشد.



شکل ۱۳: کانتور آسیب کششی (DAMAGET) در دریفت $0/09$ رادیان تحت بار جانبی $82/67$ کیلونیوتن در مدل HC-BS50 (الگوی ترک خوردگی نهایی بتن)

جدول ۵: مشخصات مدل‌ها

نام مدل	f'_c (concrete) (MPa)	f'_c (HPFRCC) (MPa)	طول HPFRCC در تیر (mm)	طول HPFRCC در ستون (mm)	فاصله بین خاموت‌ها در تیر* (mm)	فاصله بین خاموت‌ها در ستون* (mm)	توضیحات
HC-Michigan	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-B355.6	۴۱/۳	۴۲/۷	۳۵۵/۶	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-B1066.8	۴۱/۳	۴۲/۷	۱۰۶۶/۸	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-BO-C355.6	۴۱/۳	۴۲/۷	۰	۳۵۵/۶	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-BO-C711.2	۴۱/۳	۴۲/۷	۰	۷۱۱/۲	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-C355.6	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۳۵۵/۶	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-C711.2	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	از بتن معمولی در کل مدل استفاده شده است.
C	۴۱/۳	۴۲/۷	۰	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	از مصالح HPFRCC در کل مدل استفاده شده است.
H	۴۱/۳	۴۲/۷	کل طول تیر	کل طول ستون	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-fc28	۲۸	۲۸	۷۱۱/۲	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-fc35	۳۵	۳۵	۷۱۱/۲	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-BS50	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۵۰	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-BS100	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۱۰۰	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-BS200	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۲۰۰	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-CS70	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۱۵۲	۷۰	
HC-CS152	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۱۵۲	۱۵۲	
HC-WO4Bars	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۰	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	فاقد چهار میلگرد طولی در تیر در چشمه اتصال می‌باشد.
HC-C711.2-fc28	۲۸	۲۸	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	
HC-C711.2-fc35	۳۵	۳۵	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۵۲	۷۶: نزدیک اتصال: ۱۵۲: دور از اتصال:	

ادامه جدول ۵

نام مدل	f'_c (concrete) (MPa)	f'_c (HPFRCC) (MPa)	طول HPFRCC (mm) در تیر	طول HPFRCC (mm) در ستون	فاصله بین خاموت‌ها در تیر* (mm)	فاصله بین خاموت‌ها در ستون* (mm)	توضیحات
HC-C711.2-BS50	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۵۰	۷۶	نزدیک اتصال: ۷۶ دور از اتصال: ۱۵۲
HC-C711.2-BS100	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۰۰	۷۶	نزدیک اتصال: ۷۶ دور از اتصال: ۱۵۲
HC-C711.2-BS200	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۲۰۰	۷۶	نزدیک اتصال: ۷۶ دور از اتصال: ۱۵۲
HC-C711.2-CS50	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۵۲	۵۰	
HC-C711.2-CS70	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۵۲	۷۰	
HC-C711.2-CS152	۴۱/۳	۴۲/۷	۷۱۱/۲	۷۱۱/۲	۱۵۲	۱۵۲	

*در چشمه اتصال، هم در تیر و هم در ستون، خاموت وجود ندارد.

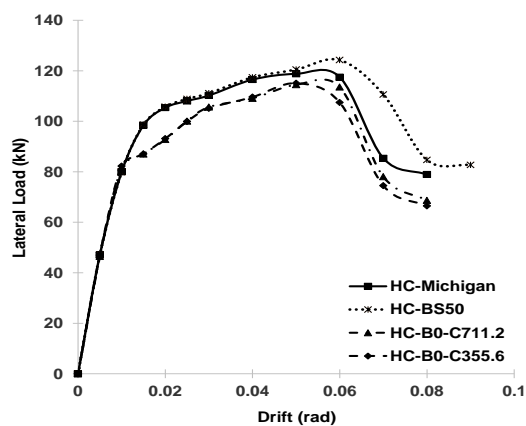
جدول ۶: خلاصه نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های اجزای محدود

نام مدل	HC-Michigan	HC-BS50	HC-B0-C711.2	HC-B0-C355.6
P_y (kN)	۹۱/۳۹۷۶	۹۱/۳۵۸۴	۸۱/۵۸۱۳	۸۲/۲۳۳۵
δ_y (mm)	۳۳/۵۲۵	۳۳/۵۲۵	۲۲/۳۵	۲۲/۳۵
Drift y (%)	۱/۵	۱/۵	۱	۱
P_u (kN)	۷۸/۸۹۳	۸۲/۶۶۹۶	۶۸/۶۷۹۲	۶۶/۴۴۵۹
δ_u (mm)	۱۷۸/۸	۲۰۱/۱۵	۱۷۸/۸	۱۷۸/۸
Drift u (%)	۸	۹	۸	۸
$\mu = \delta_u / \delta_y$	۵/۳۳	۶	۸	۸
P_{max} (kN)	۱۱۸/۷۷۹	۱۲۴/۲۴۷	۱۱۴/۴۶۷	۱۱۵/۰۷۸
δ_{max} (mm)	۱۱۱/۷۵	۱۳۴/۱	۱۱۱/۷۵	۱۱۱/۷۵
P_{max} / P_y	۱/۲۹۹	۱/۳۵۹۹	۱/۴۰۳۱	۱/۳۹۹۴
P_{cr} (kN) (بتن)	۱۰/۳۴۱۲	۱۰/۳۵۱۸	۱۱/۴۴۵۵	۱۱/۶۳۴۸
δ_{cr} (mm) (بتن)	۲/۲۳۵	۲/۲۳۵	۲/۲۳۵	۲/۲۳۵

جدول ۷: درصد تغییرات پارامترهای مختلف مدل‌های اجزای محدود، نسبت به اتصال مبنا

نام مدل	HC-BS50	HC-B0-C355.6	HC-B0-C711.2
P_y	-۰/۰۴۳	-۱۰/۰۲۷	-۱۰/۰۷۴
δ_y	۰/۰	-۳۳/۳۳۳	-۳۳/۳۳۳
P_u	+۴/۷۸۷	-۱۵/۷۷۷	-۱۲/۹۴۶
δ_u	+۱۲/۵	۰/۰	۰/۰
μ	+۱۲/۵۷	+۵۰/۰۹۴	+۵۰/۰۹۴
P_{max}	+۴/۶۰۳	-۳/۱۱۶	-۳/۶۳
δ_{max}	+۲۰	۰/۰	۰/۰
P_{max} / P_y	+۴/۶۸۸	+۷/۷۲۹	+۸/۰۱۴
P_{cr}	+۰/۱۰۲	+۱۲/۵۰۹	+۱۰/۶۷۹
δ_{cr}	۰/۰	۰/۰	۰/۰

است؛ به طوری که طول ناحیه HPFRCC در تیر، برابر با ۱۰۶۶/۸ میلی‌متر بوده و بقیه مشخصات این اتصال، مشابه اتصال مبنای آزمایشگاهی دانشگاه میشیگان می‌باشد. همچنین نام مدل آزمایشگاهی مبنای HC-Michigan انتخاب شد. در جدول ۵ نیز مشخصات مدل‌ها ارائه شده است.

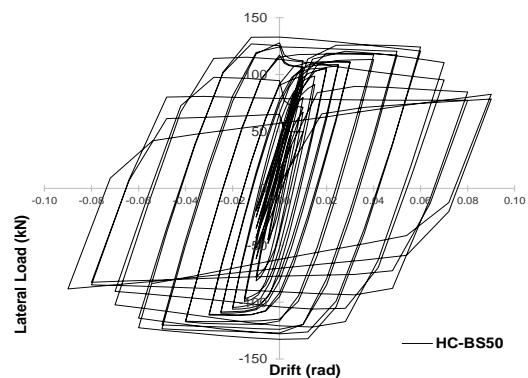


شکل ۱۷: نمودارهای مقایسه نتایج پوش منحنی‌های هیستریزس مدل‌های HC-BS50، HC-B0-C711.2 و

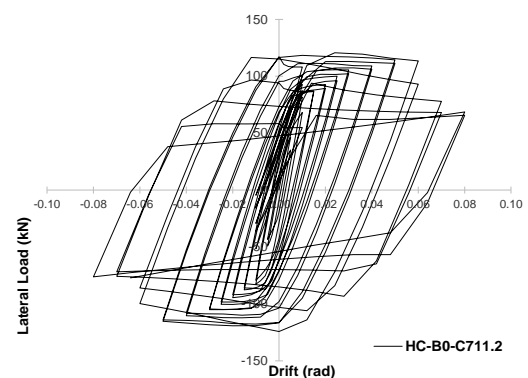
HC-B0-C355.6 با مدل آزمایشگاهی مبنای (دانشگاه میشیگان)

۳-۱- تأثیر کاربرد مصالح HPFRCC در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون

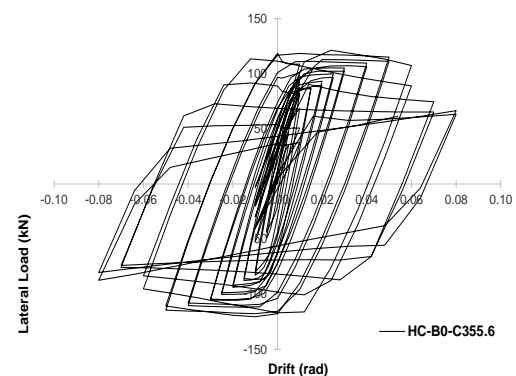
به منظور بررسی تأثیر کاربرد مصالح HPFRCC در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون، تمام اتصالات تیر به ستون مندرج در جدول ۵، در نرم‌افزار آباکوس، مدل‌سازی شده است و تحت بارگذاری چرخه‌ای ارائه شده در شکل (۹) قرار گرفته و تحلیل گردیده است که به عنوان نمونه، در شکل (۱۳)، الگوی انهدام^۱ و ترک‌خوردگی نهایی بتن در مدل HC-BS50 ارائه شده است. سپس نتایج به دست آمده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند و در نهایت، در اشکال (۱۴)، (۱۵) و (۱۶)، نتایج منحنی هیستریزس مدل‌های HC-BS50، HC-B0-C711.2 و HC-B0-C355.6 که یا دارای بیشترین مقاومت حداکثر و یا بیشترین نسبت شکل‌پذیری بوده‌اند، نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۷)، نمودارهای مقایسه نتایج پوش منحنی‌های هیستریزس مدل‌های مذکور، با مدل آزمایشگاهی مبنای (دانشگاه میشیگان)، ارائه شده است. خلاصه نتایج حاصل



شکل ۱۴: منحنی هیستریزس برای مدل تحلیلی HC-BS50



شکل ۱۵: منحنی هیستریزس برای مدل تحلیلی HC-B0-C711.2



شکل ۱۶: منحنی هیستریزس برای مدل تحلیلی HC-B0-C355.6

۳- نتایج و نمودارها

نام‌گذاری مدل‌های اجزای محدود، طوری انجام شده است که بتوان از روی نام مدل، به نوع تغییرات انجام شده در مدل، نسبت به مدل آزمایشگاهی مبنای (دانشگاه میشیگان)، پی بُرد. نحوه نام‌گذاری مدل‌ها در جدول ۴ تشریح شده است. به‌عنوان مثال، مدل HC-B1066.8 اتصالی است که از ترکیب بتن معمولی و مصالح HPFRCC ساخته شده

¹ Crack Pattern

علاوه بر این، نسبت شکل‌پذیری برای مدل‌های HC-B0-C711.2 (اتصال با ناحیه HPFRCC به طول ۷۱۱/۲ میلی‌متر فقط در ستون) و HC-B0-C355.6 (اتصال با ناحیه HPFRCC به طول ۳۵۵/۶ میلی‌متر فقط در ستون)، از مدل‌های دیگر، بیشتر می‌باشد؛ به صورتی که نسبت شکل‌پذیری آن، نسبت به اتصال مبنا (دانشگاه میشیگان)، ۵۰/۱ درصد بیشتر است و از این دو مدل نیز می‌توان به عنوان الگوهای قابل طرح دیگری در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون بتن‌آرمه با بیشترین شکل‌پذیری در میان سایر مدل‌ها، نام برد.

از تحلیل مدل‌ها، در جدول ۶ و درصد تغییرات پارامترهای مختلف مدل‌های اجزای محدود، نسبت به اتصال مبنا، در جدول ۷ ارائه شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقاومت حداکثر اتصال (HC-BS50 اتصال دانشگاه میشیگان با فاصله خاموت گذاری ۵۰ میلی‌متر در تیر)، برابر با ۱۲۴/۲۴۷ کیلونیوتن بوده که از مدل‌های دیگر، بیشتر می‌باشد؛ به طوری که مقاومت حداکثر آن، نسبت به اتصال مبنا (دانشگاه میشیگان)، ۴/۶ درصد بیشتر است؛ پس از این اتصال، می‌توان به عنوان یکی از الگوهای قابل طرح در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون بتن‌آرمه با بیشترین مقاومت حداکثر در میان سایر مدل‌ها، نام برد. علاوه بر این، نسبت شکل‌پذیری برای مدل‌های HC-B0-C711.2 (اتصال با ناحیه HPFRCC به طول ۷۱۱/۲ میلی‌متر فقط در ستون) و HC-B0-C355.6 (اتصال با ناحیه HPFRCC به طول ۳۵۵/۶ میلی‌متر فقط در ستون)، برابر با ۸ بوده که از مدل‌های دیگر، بیشتر می‌باشد؛ به صورتی که نسبت شکل‌پذیری آن، نسبت به اتصال مبنا (دانشگاه میشیگان)، ۵۰/۱ درصد بیشتر است؛ از این دو مدل نیز می‌توان به عنوان الگوهای قابل طرح دیگری در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون بتن‌آرمه با بیشترین شکل‌پذیری در میان سایر مدل‌ها نام برد. البته مقاومت حداکثر اتصال HC-B0-C355.6 برابر با ۱۱۵/۰۷۸ کیلونیوتن است که ۰/۵ درصد بیشتر از مقاومت حداکثر اتصال HC-B0-C711.2 می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی جهت ساخت اتصالات جدید و یا بهسازی لرزه‌ای اتصالات موجود، ارائه شده است که یکی از روش‌های نوین برای ساخت اتصالات تیر به ستون، استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند می‌باشد. استفاده از مصالح HPFRCC می‌تواند منجر به شکل‌گیری سازه‌هایی با مقاومت و شکل‌پذیری بالاتر، نسبت به سازه‌های بتنی رایج شود؛ به صورتی که می‌توان اتصال HC-BS50 (اتصال دانشگاه میشیگان با فاصله خاموت‌گذاری ۵۰ میلی‌متر در تیر) را که مقاومت حداکثر آن، نسبت به اتصال مبنا (دانشگاه میشیگان)، ۴/۶ درصد بیشتر است، به عنوان یکی از الگوهای قابل طرح در بهبود رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون بتن‌آرمه با بیشترین مقاومت حداکثر در میان سایر مدل‌ها، نام برد.

۵- مراجع

- [1] A.E. Naaman & H.W. Reinhardt, 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, A. E. Naaman & H. W. Reinhardt (ed.), 2003, pp. 1-4.
- [۲] ف. جندقی، م.ک. شربتدار، و م. جلالی، "بررسی جنبه‌های گوناگون مدل‌سازی عددی تیرهای بتن مسلح مقاوم شده در برش با پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP) به روش نصب در نزدیکی سطح (NSM)"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۵، شماره ۱۹، ۱۳۸۸، صفحه ۸۴-۶۹.
- [3] M. Fakharifar, A. Dalvand, M. Arezoumandi, M.K. Sharbatdar, G. Chen & A. Kheyroddin, "Mechanical Properties of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites", Construction and Building Materials, Vol. 71, 2014, pp. 510-520.
- [4] G. Fischer, "Characterization of Fiber-Reinforced Cement Composites by Their Tensile Stress-Strain Behavior and Quantification of Crack Formation", In: Sixth International RILEM Symposium on Fiber-Reinforced Concretes (FRC), Varenna, Italy, pp. 331-338.
- [5] V.C. Li, S. Wang & C. Wu, "Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC)", ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 6, 2001, pp. 483-492.
- [6] M. Kunieda & K. Rokugo, "Recent Progress on HPFRCC in Japan Required Performance and Applications", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 4, No. 1, 2006, pp. 19-33.
- [7] H.H. Bache, "Densified Cements Ultra-Fine Particle-Based Materials", Presented at the Second International Conference on Super plasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, Report No. 40, 1981.
- [8] G. Chanvillard & S. Rigaud, "Complete Characterisation of Tensile Properties of Ductal UHPFRC According to the French Recommendations", In: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), Proceeding of the Fourth International RILEM Workshop, A. E. Naaman & H. W. Reinhardt (ed.), HPFRCC4, 2003, pp. 21-34.
- [9] V.C. Li, "From Micromechanics to Structural Engineering-the Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 10, No. 2, 1993, pp. 37-48.
- [10] G. Fischer, S. Wang & V.C. Li, "Design of Engineered Cementitious Composites (ECC) for Processing and Workability Requirements", In: Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites, 2003, pp. 29-36.
- [11] V.C. Li, Engineered Cementitious Composites (ECC) – Material, Structural, and Durability Performance, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 2007.
- [12] G. Fischer & V.C. Li, "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, 2002, pp. 781-790.
- [13] A. Hemmati, A. Kheyroddin, M.K. Sharbatdar, Y. Park, & A. Abolmaali, "Ductile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite (HPFRCC) Frames", Journal of Construction and Building Materials, Vol. 115, 2016, pp. 681-689.
- [14] C.C. Hung & S. El-Tawil, "Hybrid Rotating/Fixed-Crack Model for High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites", ACI Materials Journal, Vol. 107, No. 6, 2010, pp. 568-576.
- [15] M. Ziaei, & E. Peyghaleh, Guidelines for Modeling in ABAQUS Software. Tehran, Iran, (In Persian), 2009.
- [۱۶] م.ع. لطف‌اللهی یقین، و م. ضیائیون، "بررسی رفتار ستون‌های مرکب دولایه تحت اثر متقابل نیروی محوری و لنگر خمشی"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۱۰، شماره ۳۱، ۱۳۹۱، صفحه ۲۳-۱۵.
- [17] ABAQUS (Computer Software), Abaqus Analysis User's Manual.
- [۱۸] ع. خلیلی، ع. خیرالدین، م.ک. شربتدار، ا. فراهانی، "بررسی رفتار غیرخطی قاب‌های بتن مسلح مقاوم‌سازی شده به کمک طوقه و دستک فولادی در اتصال و تقویت تیر و ستون"، نشریه علمی و پژوهشی مدل‌سازی در مهندسی، دانشگاه سمنان، دوره ۱۴، شماره ۴۶، ۱۳۹۵، صفحه ۳۸-۲۵.
- [19] Sh.H. Chao, Bond Characterization of Reinforcing Bars and Prestressing Strands in High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Under Monotonic and Cyclic Loading. PhD Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 2005.