

## بررسی عددی رفتار لرزه ای اتصالات تیر به ستون بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند در تیر و ستون کد B-۵۳B

مهدی تاج فر نویسنده مسئول - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد  
سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

علی خیرالدین - استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

Email: mahdi\_tajfar@yahoo.com

Email: kheyroddin@semnan.ac.ir

### چکیده:

کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف توانمند HPFRCC به مصالحی شامل ملات سیمانی با سنگدانه‌های ریز دانه و الیاف اطلاق می‌شود. ویژگی شاخص این مصالح آن است که تحت بارگذاری کششی، رفتار سخت شوندگی کرنش از خود بروز می‌دهند. این مصالح توانمند در بسیاری موارد نظیر سازه‌های مقاوم در برابر زلزله، بهسازی لرزه‌ی اعضای ساختمانی به کار روند. در این نوشتار، پس از معرفی مختصر این مصالح توانمند، اتصال تیر به ستون مورد صحت سنجی قرار گرفت. در این بررسی در طول‌های متفاوت از ستون و تیر از مصالح کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف توانمند استفاده گردیده است و تاثیر طول‌های مختلف کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف توانمند در ستون و تیر بر عملکرد اتصال و همچنین با اتصال تیر به ستون بتن مسلح معمولی مقایسه گردیده است. در این بررسی نشان داده می‌شود که با استفاده از کامپوزیت‌های سیمانی مسلح با الیاف توانمند در طول‌های ۴۰۰ میلی‌متر، ۸۰۰ میلی‌متر و ۱۲۰۰ میلی‌متر در ستون و طول ثابت کامپوزیت‌ها ی سیمانی مسلح با الیاف توانمند در تیر ۸۰۰ میلی‌متر، باعث افزایش شکل پذیری اتصال به میزان ۱۰۹، ۱۴۹ و ۱۱۲ درصد و مقاومت تسلیم اتصال به میزان ۷۶، ۱۸۶ و ۲۴۴ درصد نسبت به حالتی که اتصال تیر به ستون از بتن مسلح معمولی، شده است.

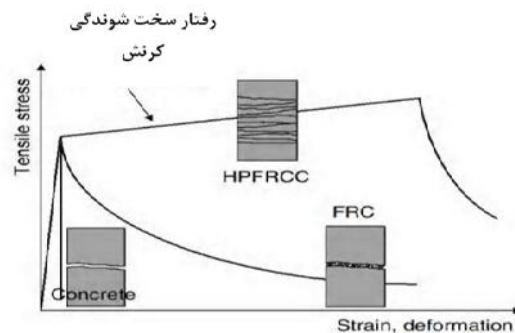
کلمات کلیدی: HPFRCC، بتن مسلح، اتصال تیر به ستون، شکل پذیری، جذب انرژی، روش اجزای محدود

## ۱. مقدمه

بتن یکی از مهم ترین مصالح ساختمانی است که به دلیل در دسترس بودن مصالح ساخت بتن و ارزانی نسبی آنها، استفاده از بتن در همه کشورهای دنیا، رو به افزایش است. تقریباً در دهه ۱۹۸۰ میلادی، مفهوم بتن توانمند<sup>۱</sup> مطرح شده است. این مصالح نوین، بتنی است که خصوصیات و ویژگی‌های ویژه‌ای، شامل مقاومت، دوام، سخت شوندگی کرنشی و مقاومت در برابر عوامل مهاجم خارجی را دارد. مهم ترین عیب بتن، مقاومت کششی پایین، ترک خوردگی و شکنندگی آن در برابر بارهای وارده می‌باشد. به همین دلیل، از سالیان خیلی دور، مصالح ساختمانی نظیر خشت‌های رُسی، با الیاف طبیعی نظیر موی اسب و کاه، مسلح شده اند.

نمان<sup>۲</sup> و رینهارت<sup>۳</sup> در چهارمین کارگاه جهانی رایلم<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۳ میلادی، مصالحی را که دارای یک بخش سخت‌شوندگی کرنش کششی در منحنی تنش-کرنش خود بوده‌اند را به عنوان کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند HPFRCC معرفی کردند. مصالح HPFRCC جدای از بتن‌های الیافی<sup>۵</sup> FRC دسته‌بندی شده‌اند. [۱]

مقایسه رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و HPFRCC، در شکل ۱ با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱- مقایسه رفتار کششی بتن معمولی، بتن الیافی و HPFRCC [۱]

روشی که برای تعریف کامپوزیت سیمانی مسلح الیافی در رده‌ی مصالح توانمند بکار می‌رود، بر مبنای شکل منحنی تنش-کرنش کششی آن قرار دارد. شکل ۱. اگر منحنی تنش کرنش نشان دهنده رفتار سخت شوندگی کرنش بعد از مرحله ترک‌خوردگی اولیه باشد، در رده‌ی مصالح توانمند قرار می‌گیرد. در غیر این صورت، برای یک کامپوزیت FRC معمولی، منحنی تنش-کرنش دارای رفتار نرم شوندگی کرنش بلافاصله پس از نخستین ترک‌خوردگی است. لذا می‌توان گفت که کامپوزیت‌های سیمانی مسلح الیافی توانمند یک نوع خاص از کامپوزیت‌های FRC هستند که علامت مشخصه‌ی آنها رفتار سخت شوندگی کرنش در کشش پس از اولین ترک‌خوردگی است که با ترک‌های چندگانه تا رسیدن به کرنش‌های نسبتاً زیاد همراه می‌شود.

گروه‌های اصلی الیاف مورد استفاده در بتن‌های سازه‌ی عبارت‌اند از: الیاف فولادی در شکل‌ها و ابعاد مختلف و نیز ریز الیاف‌ها، الیاف شیشه‌ی بی که در ملات‌های سیمانی فقط با عنوان الیاف مقاوم در برابر محیط قلیایی به کار می‌روند، الیاف مصنوعی شامل پلی پروپیلن PP<sup>۶</sup>، پلی اتیلن، پلی الفین، پلی وینیل الکل PVA<sup>۷</sup> و الیاف کربنی [۲]. الیاف طبیعی گیاهی برای بتن‌های توانمند مناسب نیستند. الیاف پشم شیشه نیز به علت اثرات مخر بر سلامتی انسان و محیط زیست به طور کلی ممنوع و توسط سایر الیاف پلی مری جایگزین گشته‌اند. مطمئناً مهم‌ترین بخش در بتن سازه‌ی بی، الیاف فولادی هستند که با قلاهای انتهایی و تغییرات مختلف انجام شده بر روی شکل این الیاف، سبب افزایش پیوستگی بین الیاف و ملات و افزایش تاثیر الیاف می‌شوند.

High Performance Concrete  
Naaman  
Reinhardt  
Rilem Workshop  
Fiber Reinforced Concrete  
Poly Propylene  
Poly-Vinyl Alcohol

در سال‌های اخیر، ۲ نوع از مصالح HPFRCC ظهور یافته اند که دوکتال<sup>۸</sup> و کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی نامیده می‌شوند. دوکتال نتیجه تحقیقات اولیه در سال ۱۹۸۱ می‌باشد [۳]. در این کامپوزیت، به منظور افزایش مقاومت کششی و فشاری، از یک ملات متراکم و سفت، همراه با الیاف با مقاومت بالا استفاده می‌شود. قدرت ملات باعث ایجاد نیروی پیوستگی قوی بین الیاف و ملات می‌شود و لذا مقاومت زیادی پس از ترک خوردگی حاصل می‌شود. در صورت کاربرد الیاف با مقاومت بالا، این مصالح برای کاربردهای کشسان طرح می‌شوند و عملکرد الیاف در زمان وقوع حالت‌های حدی نهایی موثر است و در آن زمان وارد کار می‌شوند. تحقیقات انجام شده در سال ۲۰۰۳ بر روی این کامپوزیت، مقاومت کششی برابر با ۱۲ مگاپاسکال و شکل‌پذیری ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ درصد را برای این مصالح، نشان داده است [۴].

کامپوزیت‌های سیمانی مهندسی ECC<sup>۹</sup> در دانشگاه میشیگان توسعه یافته است و به علت شکل‌گیری و گسترش ترک‌های ریز چندانگانه، شکل‌پذیری کششی آن افزایش یافته است. در حالی که مقدار الیاف به کمتر از ۲٪ کاهش یافته است. این مصالح برای کاربردهای کشسان و خمیری طرح می‌شوند و وجود الیاف تحت بارهای سرویس و بهره‌برداری نیز موثر بوده است و در آن زمان نیز وارد کار می‌شوند. طبق تحقیقات انجام شده در سال‌های ۱۹۹۳ و نیز ۲۰۰۳ مقاومت کششی ۴ تا ۶ مگاپاسکال و شکل‌پذیری کششی ۳ تا ۵ درصد را نتیجه داده است [۵و۶]. ECC می‌تواند دارای کاربردهای مختلفی باشد:

EC خود تراکم<sup>۱۰</sup> در بتن‌ریزی‌های با مقیاس وسیع و بتن‌ریزی در نواحی با آرماتورگذاری فشرده، ECC سبک<sup>۱۱</sup> به منظور کاهش بار مرده سازه‌ها، ECC سبز برای کاهش اثرات زیست محیطی و توسعه پایدار، ECC خود ترمیم شونده برای بهبود و بازایی خصوصیات مکانیکی مصالح پس از تحمل خسارت به کار می‌رود. [۷و۸و۹و۱۰و۱۱]

## ۲. مشخصات مدل‌های تحلیلی

### ۲.۱. نرم افزار مورد استفاده

در این نوشتار، از نرم افزار ABAQUS که یک نرم افزار غیرخطی المان محدود است، استفاده می‌شود. این نرم افزار به علت داشتن المان‌های متعدد، قابلیت مدل سازی بتن، میلگردهای فولادی، بتن مسلح، FRP و کامپوزیت‌های سیمانی را داراست. برای مدل سازی بتن، شیوه‌ها و گزینه‌های مختلفی در این نرم افزار موجود است. [۱۲]

برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن در نرم‌افزار آباکوس، سه روش یا سه مدل ساختاری برای بتن، پیشنهاد شده است. سه مدل پیشنهادی عبارتند از:

مدل ترک پخشی بتن<sup>۱۲</sup>، مدل ترک خوردگی شکننده بتن<sup>۱۳</sup>، مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن<sup>۱۴</sup>

مدل ترک پخشی بتن در مواردی استفاده می‌شود که سازه بتنی تحت بار یکنواخت<sup>۱۵</sup> قرار داشته باشد. در این مدل، ترک خوردگی کششی بتن و یا خردشدگی فشاری آن در نظر گرفته شده است.

مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن، براساس فرضیات آسیب‌دیدگی همسان استوار است و برای سازه‌های بتنی تحت بارهای مختلف و از جمله بار چرخه‌ای کاربرد دارد. 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. با عنایت به رفتار کششی ویژه ی کامپوزیت HPFRCC از گزینه Concrete Damage Plasticity استفاده می‌شود. در این گزینه امکان وارد کردن نقاط مختلف منحنی تنش-کرنش بتن و کامپوزیت در کشش و فشار وجود دارد. در مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن،

Ductal  
Engineered Cementitious Composites  
Self Consolidating ECC  
Light Weight ECC  
Smeared crack concrete model  
Brittle cracking model  
Concrete damaged plasticity model  
Monotonic

دو مکانیزم برای انهدام بتن پیش‌بینی شده است. مکانیزم اول، ترک‌خوردگی بتن تحت کشش است و مکانیزم دوم، خردشدگی بتن تحت فشار می‌باشد.

در شکل ۲، منحنی تنش- کرنش بتن تحت کشش نشان داده شده است. رابطه تنش کرنش کششی بتن تا رسیدن تنش به مقدار تنش گسیختگی بتن،  $\sigma_{t_0}$ ، به صورت خطی می‌باشد. رسیدن به تنش گسیختگی با تشکیل مجموعه‌ای از ریزترک‌ها در بتن همراه است. پس از آن، به دلیل ترک‌خوردگی بتن به صورت ماکروسکوپی، شاخه نرم‌شدگی بتن آغاز می‌شود که با موضعی-شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک‌خوردگی همراه است.

با توجه به شکل ۳، منحنی تنش- کرنش بتن در فشار تا تنش تسلیم اولیه،  $\sigma_{t_0}$ ، به صورت خطی تغییر می‌کند. سپس ناحیه غیرخطی و افزایش منحنی شروع می‌شود و تا نقطه مربوط به تنش نهایی،  $\sigma_{cu}$ ، که همان نقطه مقاومت فشاری بتن است، ادامه می‌یابد. پس از آن، شاخه نرم‌شونده منحنی تنش کرنش آغاز می‌گردد و بتن تحت فشار، خرد می‌شود. [۱۲]

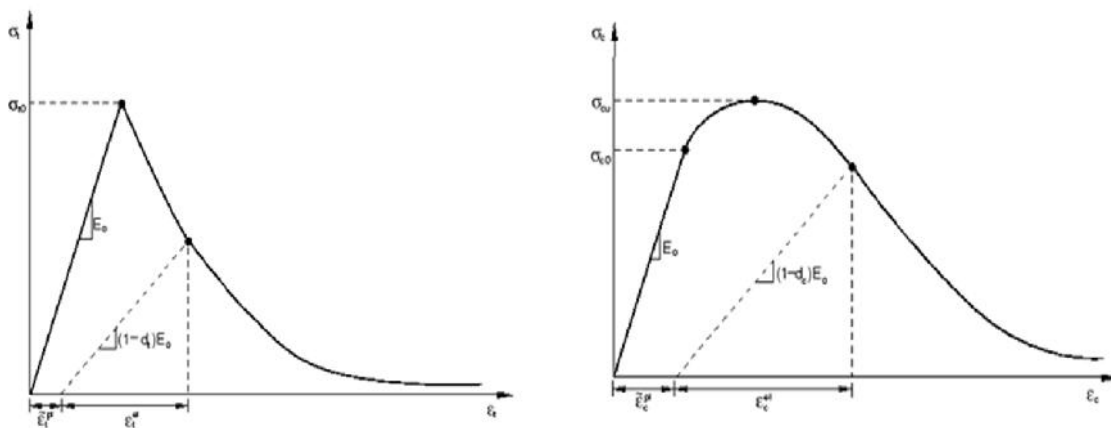
همانطور که در شکل ۳و۲ ملاحظه می‌شود، در حالت باربرداری در قسمت نرم‌شوندگی منحنی تنش- کرنش، شیب منحنی باربرداری از شیب منحنی الاستیک کمتر است که این موضوع، نشان‌دهنده در نظر گرفته شدن آسیب در مدل می‌باشد. کاهش سختی بتن بر اثر باربرداری در شاخه نرم‌شونده، بوسیله پارامترهای  $d_t$  و  $d_c$  در نظر گرفته شده است. این کاهش سختی 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.

معادلات تنش- کرنش بتن در کشش و فشار، به ترتیب، در روابط ۱ و ۲، ارائه شده است:

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

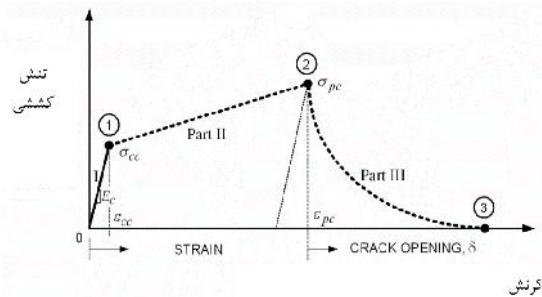
$$\sigma_c = (1 - d_c)E_c(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad 2$$

که در آن،  $E_c$  مدول الاستیسیته بتن پیش از آسیب‌دیدگی بتن می‌باشد.



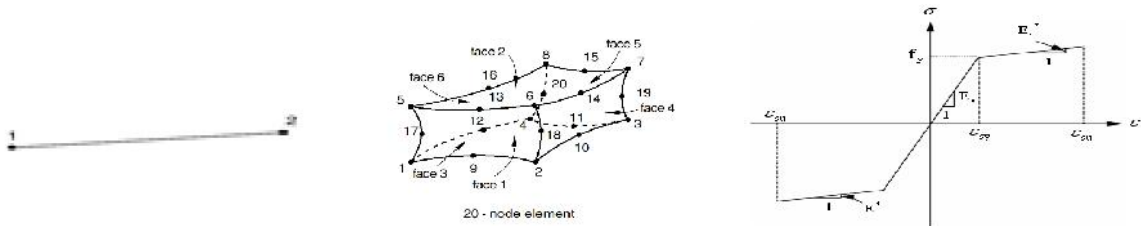
شکل ۳- منحنی تنش- کرنش بتن و HPFRCC تحت فشار [۱۲] شکل ۲- منحنی تنش- کرنش بتن تحت کشش [۱۲]

منحنی تنش-کرنش HPFRCC تحت کشش از یک رابطه ی خطی تا رسیدن به  $\sigma_{cc}$  پیروی می‌کند. سپس منحنی رفتار افزایشده یی را شروع می‌کند تا به تنش  $\sigma_{pc}$  برسد. از این نقطه به بعد با گسترش ترک خوردگی‌ها در کامپوزیت، شاخه نرم شونده منحنی آغاز می‌شود که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک در یک صفحه همراه است شکل ۴. منحنی تنش-کرنش HPFRCC در فشار مشابه با بتن معمولی است.



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش HPRCC تحت کشش [۱۲]

منحنی تنش-کرنش استفاده شده برای میلگردها نیز به صورت دوخطی مطابق شکل ۵ وارد می‌شود. برای مدل سازی بتن و کامپوزیت‌های سیمانی از المان Solid و برای مدل سازی فولاد از المان Truss استفاده می‌شود. در این تحقیق از المان مکعبی ۲۰ گرهی Solid که در شکل ۶ نیز نشان داده شده است، استفاده می‌شود. هر گره در این المان دارای ۶ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است. برای مدل سازی میلگردهای فولادی، المان دو بعدی Truss که در شکل ۷ نشان داده شده است، به کار می‌رود. این المان دو گرهی قابلیت مدل سازی رفتار غیرخطی فولاد را دارا می‌باشد. همچنین سطح اتصال بتن با HPRCC (بتن کامپوزیتی، مطابق روش مرسوم در نرم افزار ABAQUS از اتصال Tie استفاده شده است.



شکل ۵- منحنی تنش-کرنش فولاد [۱۲]

شکل ۶- المان ۲۰ گرهی مکعبی Solid

برای مدل سازی بتن و HPRCC [۱۲]

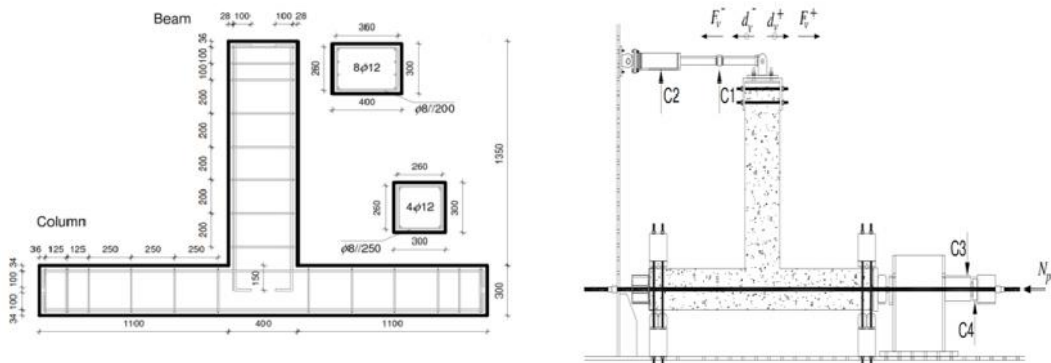
شکل ۷- المان دو بعدی Truss برای مدل سازی آرماتور [۱۲]

## ۲.۲. مدل‌های مورد بررسی و نحوه مدل سازی

در این مقاله، یک اتصال خارجی تیر به ستون، (بتن مسلح معمولی که توسط فرناندس در آزمایشگاه تست شده، مورد صحت سنجی قرار گرفته است [۱۳]). مشخصات میلگرد مورد استفاده در این اتصال در جدول ۱ آورده شده است. ابعاد این اتصال و جزئیات بارگذاری و آرماتورگذاری آن نیز در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. برای در نظر گرفتن اثر نیروی محوری ستون در رفتار اتصال، در حین انجام آزمایش، نیروی محوری برابر با ده درصد ظرفیت باربری محوری ستون ۲۲۰ کیلونیوتن به ستون وارد شده است. در انتهای تیر، از تکیه‌گاه غلطکی و در پایین ستون، از تکیه‌گاه ثابت مفصلی استفاده شده است. بالای ستون در مقابل حرکت در صفحه عمود بر اتصال، مهار شده است. جک هیدرولیکی ۵۰۰ کیلونیوتنی به صورت رفت و برگشتی در صفحه اتصال، جابجا می‌گردد.

جدول ۱- مشخصات فولاد مورد استفاده در اتصال [۱۳]

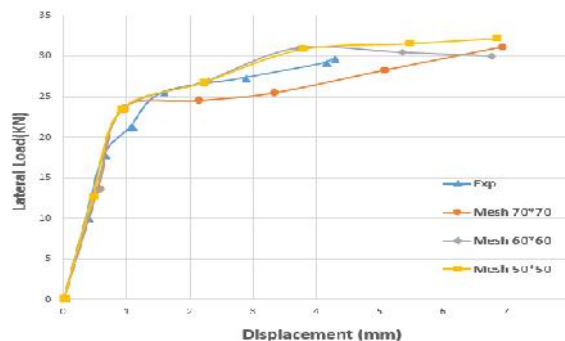
Specimen	No. M bars		No. M	
	F <sub>y</sub> , MPa	F <sub>u</sub> , MPa	F <sub>y</sub> , MPa	F <sub>u</sub> , MPa
۱	۴۶۵	۶۱۳	۴۴۲	۵۶۲



شکل ۸- جزئیات بارگذاری اتصال [۱۳]

شکل ۹- ابعاد هندسی و جزئیات آرماتورگذاری اتصال [۱۳]

سه مدل تحلیلی با مش بندی‌های مختلف برای کالیبره نمودن نتایج تحلیل به کار رفت. ابعاد المان‌ها و نتایج حاصل از تحلیل غیر خطی این اتصال‌ها منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی این سه اتصال نیز در شکل ۱۰ ارائه شده است. در تحلیل غیر خطی بتن با افزایش بیش از حد المان‌ها، تعداد ترک‌ها نیز بیشتر شده است و در نتیجه سختی و بار نهایی عضو کاهش می‌یابد. این پدیده، وابستگی مش نامیده می‌شود. به همین دلیل است که در برخی از تحقیقات پیشنهاد شده است که اندازه‌ی المان با توجه به کرنش نهایی بتن انتخاب شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود و همچنین با توجه به مطالب فوق‌الذکر از بین مدل‌های با مش بندی ۵۰ در ۵۰، ۶۰ در ۶۰ و ۷۰ در ۷۰ میلی‌متر، مدل با مش بندی متوسط و به ابعاد ۶۰ در ۶۰ میلی‌متر بیشترین تطابق را با کار آزمایشگاهی داشته و لذا به عنوان مدل مورد بررسی انتخاب می‌گردد.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی اتصال‌ها با مش بندی‌های مختلف و نتایج آزمایشگاهی

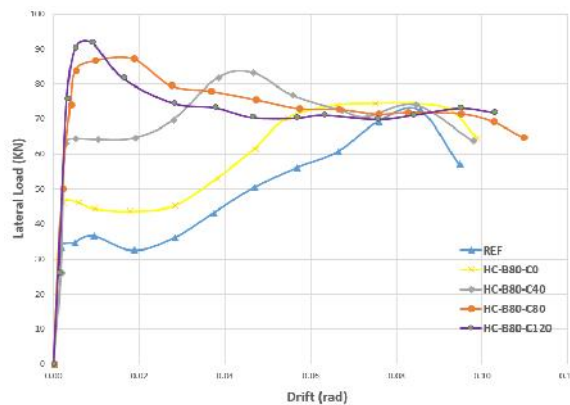
### ۳. نتایج و نمودارها

نحوه نام گذاری مدل‌ها و توضیحات مربوط به آن در جدول ۲ ارائه شده است. 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 مبنا پی‌برد. نام مدل آزمایشگاهی مبنا، REF انتخاب شد. عبارت HC در مدل‌ها نشان‌دهنده آن است که مدل، از ترکیب بتن معمولی و مصالح HPRCC تشکیل شده است. مقاومت فشاری بتن معمولی و مصالح HPRCC، ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد.

جدول ۲- نحوه نام گذاری مدل ها

توضیح	عبارت
اتصال، از بتن معمولی ساخته شده است.	REF
طول ناحیه HPFRCC در تیر با طول ثابت ۸۰۰ میلی متر، در طول ستون از بتن معمولی است.	HC-B -C
طول ناحیه HPFRCC در تیر با طول ثابت ۸۰۰ میلی متر، در ستون برابر با ۴۰۰ میلی متر و مابقی نواحی از بتن معمولی	HC-B -C
طول ناحیه HPFRCC در تیر با طول ثابت ۸۰۰ میلی متر، در ستون برابر با ۸۰۰ میلی متر و مابقی نواحی از بتن معمولی	HC-B -C
طول ناحیه HPFRCC در تیر با طول ثابت ۸۰۰ میلی متر، در ستون برابر با ۱۲۰۰ میلی متر و مابقی نواحی از بتن معمولی	HC-B -C

در شکل ۱۱، نتایج پوش منحنی‌های هیستریزس برای چهار نوع طول ناحیه HPFRCC در ستون با طول ثابت ۸۰۰ میلی‌متر از HPFRCC در تیر، نشان داده شده است. بیانگر این موضوع است که با افزایش طول HPFRCC در ستون باعث افزایش شکل پذیری می‌گردد. همچنین در جدول ۳، مقادیر مقاومت و تغییرشکل تسلیم و نهایی مدل‌ها داده شده است. در جدول ۴، نیز درصد تغییرات پارامترهای مختلف مدل‌های اجزای محدود، نسبت به اتصال مبنا، محاسبه شده است.



شکل ۱۱- نمودارهای نتایج پوش منحنی‌های هیستریزس برای چهار نوع طول ناحیه HPFRCC در ستون در حالی که طول ناحیه HPFRCC در تیر، ثابت و در ستون، متغیر است

جدول ۳- مقادیر مقاومت و تغییرشکل تسلیم و نهایی مدل‌های اجزای محدود

نام مدل	$P_y$ kN	$\delta_y$ mm	Drift y %	$P_u$ kN	$\delta_u$ mm	Drift u %	$\mu = \delta_u / \delta_y$	$P_{max}$ k N	$\delta_{max}$ mm	$P_{max} / P_y$	$P_{cr}$ بتن kN	$\delta_{cr}$ بتن mm	جذ انژی
REF	۲۶/۱	۳۸/۹۸	۲/۹	۶۱/۸	۱۲۲/۹	۹/۱	۳/۱۵	۷۲/۷	۱۱۵/۲	۲/۷۸	۲۶/۴۱	۲/۲	۱۲۵۳۳۲
HC-B۸۰-C۰	۲۵/۸	۱۸/۵۵	۱/۴	۶۳/۳	۱۳۳/۲	۹/۹	۷/۱۸	۷۴/۵	۱۱۲/۶	۲/۸۹	۳۶/۱۲	۲/۲	۱۶۰۹۶۷
HC-B۸۰-C۴۰	۴۵/۹	۲۰	۱/۵	۷۰/۸	۱۳۱/۹	۹/۸	۶/۵۹	۸۳/۳	۶۲/۶	۱/۸۱	۴۸/۸۱	۲/۴۲	۱۹۹۹۴۸
HC-B۸۰-C۸۰	۷۴/۷	۱۸/۷۵	۱/۴	۷۴/۲	۱۴۷/۷	۱۰/۹	۷/۸۸	۸۷/۳	۲۵	۱/۱۷	۲۶/۸	۰/۶۲	۲۳۰۹۰۷
HC-B۸۰-C۱۲۰	۸۹/۸	۲۰/۷	۱/۵	۷۸	۱۳۸/۶	۱۰/۳	۶/۷۰	۹۱/۸	۱۲/۱	۱/۰۲	۴۸/۲۸	۲/۰۵	۲۴۸۰۴۱

$P_y$ : اولین لحظه‌ای که آرماتور تسلیم می‌شود       $\delta_y$ : جابجایی در لحظه تسلیم آرماتور  
 $P_u$ : مقاومت نهایی اتصال       $\delta_u$ : جابجایی نهایی اتصال  
 $\mu$ : نسبت شکل پذیری       $P_{max}$ : مقاومت حداکثر اتصال یا حداکثر مقاومت اتصال  
 $\delta_{max}$ : جابجایی حداکثر اتصال       $P_{max}/P_y$ : نسبت مقاومت حداکثر به مقاومت تسلیم اتصال  
 $P_{cr}$ : مقاومت ترک خوردگی اتصال       $\delta_{cr}$ : جابجایی ترک خوردگی اتصال

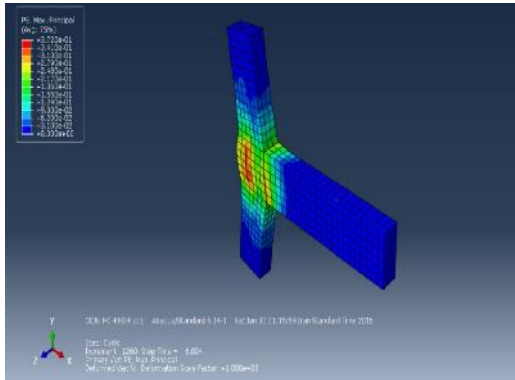
جدول ۴- درصد تغییرات پارامترهای مختلف اتصال، نسبت به اتصال مبنا

نام مدل	درصد تغییرات											توضیحات
	$P_y$	$\delta_y$	$P_u$	$\delta_u$	$\mu$	$P_{max}$	$\delta_{max}$	$P_{max}/P_y$	$P_{cr}$	$\delta_{cr}$	جذ انرژی	
REF	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	اتصال مبنا
HC-B80-C0	-۱/۳	-۵۲/۴	+۲/۵	+۸/۳	+۱۲۷/۶	+۲/۵	-۲/۲	+۳/۹	+۳۶/۸	۰/۰	+۲۸/۴	---
HC-B80-C40	+۷۶	-۴۸/۷	+۱۴/۷	+۷/۲	+۱۰۹	+۱۴/۵	-۴۵/۷	-۳۴/۹	+۸۴/۸	۱۰	+۵۹/۵	---
HC-B80-C80	+۱۸۵/۸	-۵۱/۹	+۲۰/۱	+۲۰/۱	+۱۴۹/۸	+۲۰/۱	-۷۸/۳	-۵۸	+۱/۵	-۷۱/۸	+۸۴/۲	---
HC-B80-C120	+۲۴۳/۹	-۴۶/۹	+۲۶/۲	+۱۲/۷	+۱۱۲/۲	+۲۶/۲	-۸۹/۴	-۶۳/۳	+۸۲/۸	-۶/۸	+۹۷/۹	---

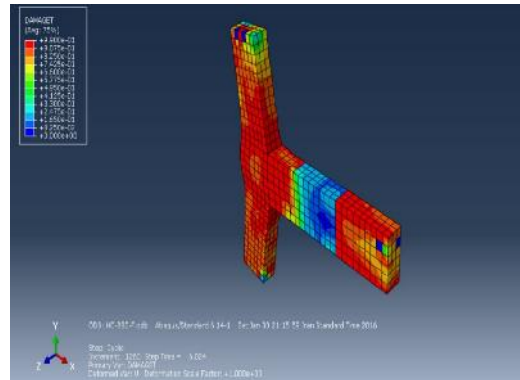
شکل ۱۱ و جداول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که استفاده از مصالح HPFRCC در تیر و ستون، باعث افزایش مقاومت تسلیم، مقاومت حداکثر، مقاومت نهایی و شکل پذیری اتصال، نسبت به اتصال مبنا شده است؛ به نحویکه در مدل‌های HC-B80-C40، HC-B80-C80، HC-B80-C120 به ترتیب ۷۶، ۱۸۶ و ۲۴۴ درصد افزایش در مقاومت تسلیم و همچنین ۱۴، ۲۰ و ۲۶ درصد افزایش در مقاومت حداکثر ۱۴، ۲۰ و ۲۶ درصد افزایش در مقاومت نهایی نسبت به مدل مبنا ایجاد شده است. در خصوص نسبت شکل پذیری نیز با افزایش طول HPFRCC در ستون، این نسبت نیز افزایش می‌یابد در مدل‌های HC-B80-C40، HC-B80-C80، HC-B80-C120 به ترتیب ۱۰۹، ۱۴۹ و ۱۱۲ درصد نسبت به مدل مبنا افزایش یافته است. همچنین درصد جذ انرژی در مدل‌های اتصال با افزایش طول HPFRCC در ستون، روند افزایشی دارد به نحوی که در مدل‌های HC-B80-C40، HC-B80-C80 و HC-B80-C120 به ترتیب ۵۹، ۸۴ و ۹۸ درصد نسبت به مدل مبنا افزایش یافته است.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در حالتی که در تیر، از مصالح HPFRCC استفاده شده است، استفاده از مصالح HPFRCC در ستون، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت و نسبت شکل‌پذیری اتصال داشته است. لذا تقویت تیر به تنهایی منطقی نمی‌باشد و پس از تقویت تیر الزاماً باید ستون‌های تکیه گاهی نیز تقویت گردند. اما از سوی دیگر شکل‌پذیری اتصال HC-B80-C120 نسبت به اتصال HC-B80-C80، ۳۵ درصد کاهش داشته است. لذا افزایش طول HPFRCC در ستون بیشتر از ۸۰۰ میلی متر منطقی نمی‌باشد. با استفاده توأم از مصالح HPFRCC در تیر و ستون، مفصل پلاستیک به تیر منتقل شده است ولی با استفاده از مصالح HPFRCC فقط در تیر، مفصل پلاستیک در ستون تشکیل شده است.

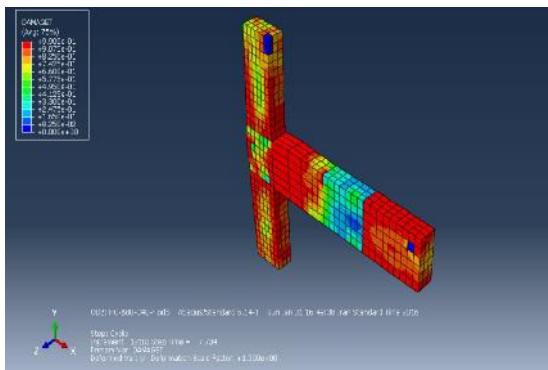




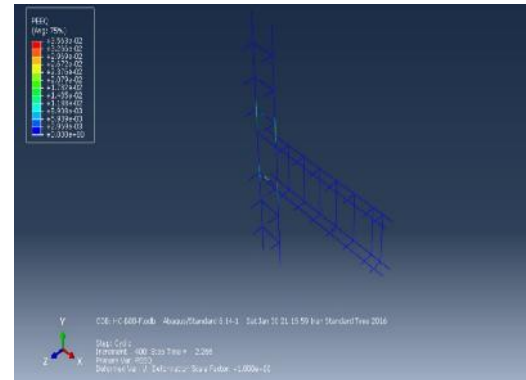
شکل ۱۳- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B10-C کرنش پلاستیک اصلی حداکثر تحت بار نهایی ۶۳/۳۴ کیلونیوتن



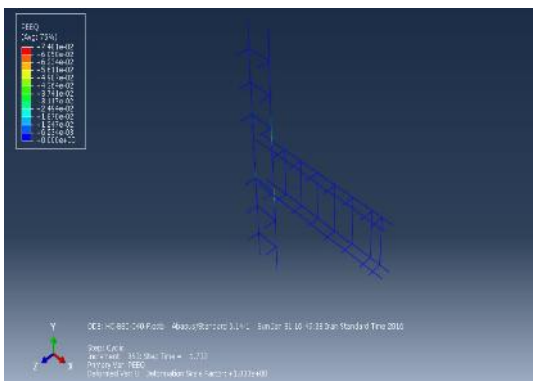
شکل ۱۲- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B10-C آسیب کششی تحت بار نهایی ۶۳/۳۴ کیلونیوتن



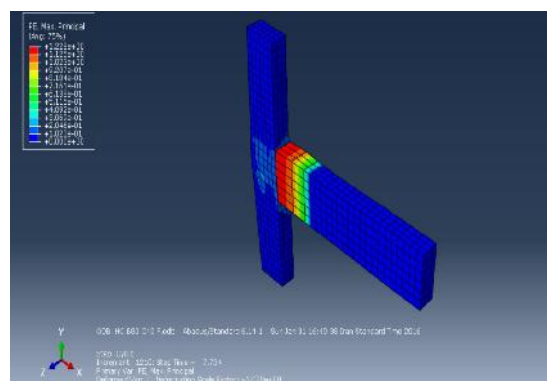
شکل ۱۵- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B10-C کانتور آسیب کششی تحت بار نهایی ۷۰/۸۷ کیلونیوتن



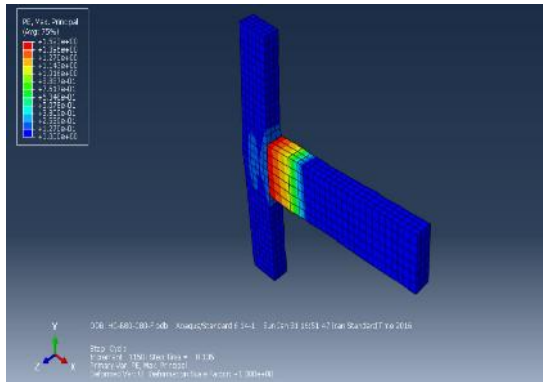
شکل ۱۴- الگوی شروع تسلیم فولاد در اتصال HC-B10-C کرنش پلاستیک معادل تحت بار تسلیم ۲۵/۷۸ کیلونیوتن



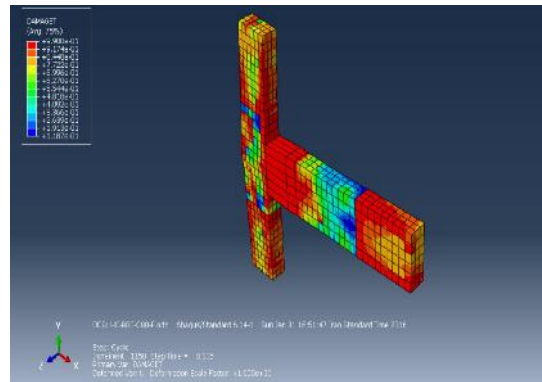
شکل ۱۷- الگوی شروع تسلیم فولاد در اتصال HC-B10-C کرنش پلاستیک معادل تحت بار تسلیم ۴۵/۹۹ کیلونیوتن



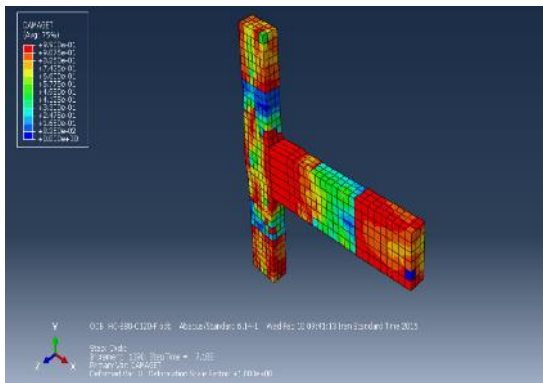
شکل ۱۶- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B10-C کرنش پلاستیک اصلی حداکثر تحت بار نهایی ۷۰/۸۷ کیلونیوتن



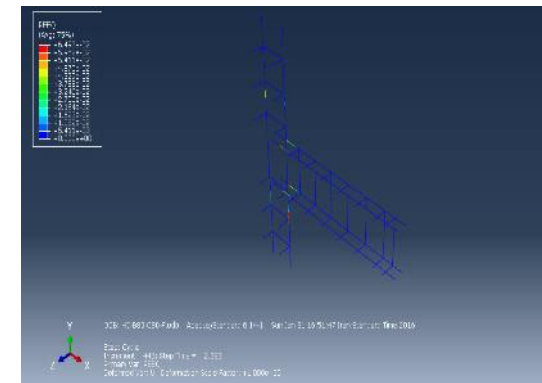
شکل ۱۹- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B<sub>10</sub>-C<sub>10</sub> کرنش پلاستیک اصلی حداکثر تحت بار نهایی ۷۴/۲۴ کیلونیوتن



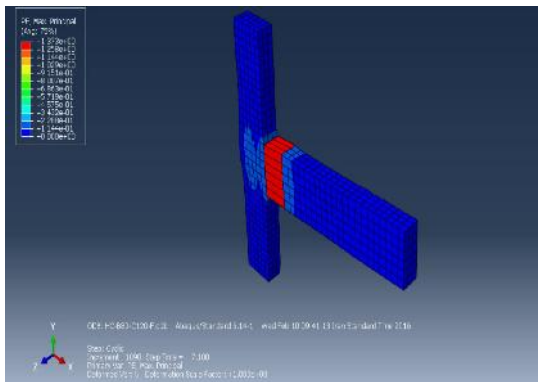
شکل ۱۸- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B<sub>10</sub>-C<sub>10</sub> آسیب کششی تحت بار نهایی ۷۴/۲۴ کیلونیوتن



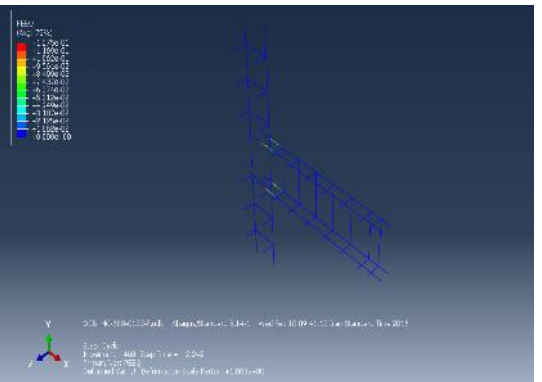
شکل ۲۱- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B<sub>10</sub>-C<sub>120</sub> آسیب کششی تحت بار نهایی ۷۸/۰۱ کیلونیوتن



شکل ۲۰- الگوی شروع تسلیم فولاد در اتصال HC-B<sub>10</sub>-C<sub>10</sub> کرنش پلاستیک معادل تحت بار تسلیم ۷۴/۶۸ کیلونیوتن



شکل ۲۳- الگوی شروع تسلیم فولاد در اتصال HC-B<sub>10</sub>-C<sub>120</sub> کرنش پلاستیک معادل تحت بار تسلیم ۸۹/۸۷ کیلونیوتن



شکل ۲۲- الگوی انهدام و ترک خوردگی اتصال HC-B<sub>10</sub>-C<sub>120</sub> کرنش پلاستیک اصلی حداکثر تحت بار نهایی ۷۸/۰۱ کیلونیوتن

#### ۴. نتیجه گیری

با گسترش بتن‌های توانمند، نوع خاصی از مصالح برتر تحت عنوان HPFRCC برای ساخت و ساز ایجاد شده است. این مصالح توانمند می‌تواند در بسیاری موارد نظیر بهسازی لرزه ای اعضای سازه ای و نیز به عنوان فیوزهای سازه ای بکار روند. تشکیل ترکهای ریز چندگانه عامل اصلی تامین شکل پذیری کششی این مصالح است. یکی از ویژگی‌هایی که HPFRCC را برای انجام عملیات ترمیمی و جایگزینی بتن معمولی، مناسب می‌سازد این است که با توجه به شباهت ساختاری آن با بتن، امکان ایجاد پیوستگی قوی بین بتن قبلی و این کامپوزیت وجود دارد.

- تقویت ناحیه مفصل پلاستیک تیر باعث افزایش مقاومت حداکثر، مقاومت نهایی و شکل پذیری اتصال می‌گردد.
- تقویت همزمان ناحیه مفصل پلاستیک تیر و ستون باعث بهبود رفتار اتصال نسبت به حالت تقویت تیر به تنهایی می‌گردد.
- مناسب ترین طول تقویت در ستون برابر با طول تقویت در تیر می‌باشد و افزایش طول تقویت ستون مزاد بر طول تقویت تیر حتی ممکن است باعث کاهش شکل پذیری اتصال گردد.
- با استفاده توام از مصالح HPFRCC در تیر و ستون، مفصل پلاستیک به تیر منتقل شده است ولی با استفاده از مصالح HPFRCC فقط در تیر، مفصل پلاستیک در ستون تشکیل شده است.
- جایگزینی مصالح HPFRCC به جای بتن معمولی در ناحیه مفصل پلاستیک ستون، شکل پذیری، جذ انرژي، مقاومت تسلیم و مقاومت حداکثر اتصال تیر به ستون بتن آرمه افزایش می‌یابد.

#### ۵. مراجع

- [۱] Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. Setting the stage: toward performance-based classification of FRC composites, In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPFRCC C-۴, Proc. of the ۴th Int'l RILEM Workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds. Published by RILEM S.A.R.L., ۲۰۰۳
- [۲] Brandt AM. Cement-based composites: materials, mechanical properties and performance, London, E&FN Spon, pp. ۴۷۰, ۱۹۹۵.
- [۳] Bache, H. Densified cement/ultra-fine particle-based materials, CBL Rapport No. ۴۰, Aalborg Portland, ISBN ۸۷-۸۹۱۳۲-۰۰-۹, ۱۹۸۱.
- [۴] Chanvillard, G. and Rigaud, S. Complete characterization of tensile properties of ductal UHPFRC according to the French recommendations, In Proc. of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPFRCC ۴, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds, pp. ۲۱-۳۴. RILEM Publications S.A.R.L., ۲۰۰۳
- [۵] Li, V.C. From Micromechanics to Structural Engineering – the design of cementitious composites for Civil Engineering applications, JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering ۱۰ ۲, pp. ۳۷-۴۸, ۱۹۹۳.
- [۶] Fischer, G., Wang, S. and Li, V.C. Design of engineered cementitious composites for processing and workability requirements, Seventh International Symposium on Brittle Matrix Composites, pp. ۲۹-۳۶. Warsaw, Poland, ۲۰۰۳.
- [۷] Kong, H.J., Bike, S. and Li, V.C. Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization, Journal of Cement and Concrete Composites ۲۵ ۳, pp. ۳۰۱-۳۰۹, ۲۰۰۳.
- [۸] Lepech, M.D. and Li, V.C. Large scale processing of engineered cementitious composites, ACI Materials Journal, ۲۰۰۷.
- [۹] Wang, S. and Li, V.C. High early strength engineered cementitious composites", ACI Materials Journal, ۱۰۳ ۲, pp. ۹۷-۱۰۵, ۲۰۰۶.

- [۱۰] Yang, Y., Lepech, M. and Li, V.C. Self-healing of engineered cementitious composites under cyclic wetting and drying. In Proc. Int. Workshop on Durability of Reinforced Concrete under Combined Mechanical and Climatic Loads CMCL, pp. ۲۳۱-۲۴۲. Qingdao, China, ۲۰۰۵.
- [۱۱] Li, V.C. and Yang, E.H. Self-healing in concrete materials. In Self Healing Materials: An Alternative Approach to ۲۰ Centuries of Materials Science, S. van der Zwaag, ed., pp. ۱۶۱-۱۹۳, ۲۰۰۷.
- [۱۲] ضیایی، م، پیغاله، ا. «راهنمای مدلسازی با نرم افزار ABAQUS»، انتشارات پندار پارس، ۱۳۸۸.
- [۱۳] Fernandes P. and Sena-Cruz J. ۲۰۱۲, "Efficiency of Different Techniques in Seismic Strengthening of RC Beam-Column Joints", Materials and Structures.