مدل‌سازی و بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات پیش‌ساخته بتنی تحت بارهای چرخه‌ای تناوبی

سمیرا ساقی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
saghi.samira@gmail.com

هاشم شریعتمدار
دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
shariatmadar@um.ac.ir

کلید واژه‌ها: *اتصال پیش‌ساخته، تولید صنعتی، بارگذاری چرخه‌ای، منحنی هیسترزیس، سختی*

چکیده

در طراحی یک سازه سعی بر آن است که سازه در طول بارگذاری لرزه‌ای وارد ناحیه غیرالاستیک شده و انرژی ناشی از زلزله را مستهلک نماید. در طراحی لرزه‌ای سازه در برابر یک زلزله واقعی، اتصالات در مقاومت سازه‌ها به ویژه سازه‌های بتنی، در برابر بارهای متناوب نقش بسیار مهمی بازی می‌کنند و لازم است بهای بیشتری به اتصالات داده شود. از جمله اقدامات مؤثر در این زمینه می‌توان به ساخت و بررسی اتصال در کارخانه اشاره نمود. پیش‌سازی و تولید صنعتی می‌تواند در رفع نواقص موجود کمک شایانی نماید، زیرا کنترل تولید آسان‌تر خواهد بود.
در این پژوهش، با ارائه مدلی از اتصالات پیش‌ساخته و راستی‌آزمایی آن با مدل آزمایشگاهی به بررسی رفتار آن‌ها پرداخته می‌شود. بدین منظور، مدل‌سازی کامل اتصالات انجام شده و مدل ساده شده‌ای (شامل تیر و ستون و فنر) از آن‌ها نیز ارائه می‌گردد. این مدل ساده شده جهت آسان نمودن مدل‌سازی قاب‌ها در نرم‌افزار ارائه و بررسی می‌گردد. پس از مدل‌سازی مدل پیشنهادی در نرم‌افزار Abaqus، کفایت و توانایی آن ارزیابی خواهد شد. نمودارهای به دست آمده از دو حالت مدل‌سازی با نمودارهای حاصل از مدل‌های آزمایشگاهی مقایسه شدند. مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفته و تحلیل می‌گردند. سرانجام رفتار لرزه‌ای اتصالات پیش‌ساخته با اتصالات درجا مقایسه شده و نتایج، شامل منحنی‌های هیسترزیس، میرایی اتصال، مقاومت اتصال و سختی اتصال مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

مقدمه

بتن پیش‌ساخته علاوه بر فراهم نمودن کیفیت بالا برای اعضای سازه، باعث صرفه‌جویی در وقت و هزینه می‌شود. در زلزله‌های اخیر، سازه‌های بتنی آسیب‌های سنگینی دیدند که این امر کارایی ضعیف اتصالات را در این سازه‌ها به اثبات رساند (PCI, 1992; PPCI, 2007).
در حقیقت اتصالات نقاط ضعف سازه‌های پیش‌ساخته در رفتار خمشی، محوری و برشی هستند. در طول عملیات ساخت، نقاط اتصال بین اجزای پیش‌ساخته باعث ایجاد نقاط ضعف و دارای سختی کم می‌شوند که تغییرشکل‌های بزرگ محلی در این نقاط در طول زلزله‌های بزرگ بوجود می‌آید (Khoo, Li, & Yip, 2006). به علت ضعف اتصالات پیش‌ساخته در جذب و پخش انرژی و مقاومت ناکافی آن‌ها، سازه‌های پیش‌ساخته کمتر در نواحی با لرزه‌خیزی زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرند، حتی برخی از آیین‌نامه‌ها استفاده از آن را در نواحی با خطر لرزه‌خیزی زیاد ممنوع کرده‌اند (Korkmaz & Tankut, 2005).

سازه‌های بتنی پیش‌ساخته مزایای فراوانی دارند و از جمله آن‌ها می‌توان به بالا بردن سرعت ساخت، افزایش کیفیت کنترل و کاهش کار کارگاهی اشاره نمود (Ochs & Ehsani, 1993). تحقیقات میدانی زلزله‌های گذشته در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته بعد از زلزله نرتریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵) و ون چاوون (۲۰۰۸) در چین نشان داد که سازه‌های بتنی پیش‌ساخته در این زلزله‌های مخرب گسیخته می‌شوند (Korkmaz & Tankut, 2005). بنابراین لازم است که رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتنی پیش‌ساخته که در مناطق با لرزه‌خیزی زیاد استفاده می‌شوند، مورد ارزیابی قرار گیرد (Xue & Yang, 2010).

محققان برای بررسی رفتار دینامیکی اتصالات تیر به ستون در قاب‌های خمشی پیش‌ساخته، ابتدا نوع اتصال را از لحاظ چند بعدی بودن انتخاب می‌کنند. در قاب‌های پیرامونی پیچیدگی طراحی و ساخت اتصالات تیر به ستون نسبت به قاب‌های میانی کمتر است، از این رو بسیاری از

تحقیقات به بررسی اتصالات در قاب‌های پیرامونی پرداخته‌اند (Ertas, Ozden, & Ozturan, 2006).

با پیداش رایانه و امکان حل معادلات سنگین، زیاد و پیچیده‌ی ریاضی، محققان شروع به نوشتن برنامه‌هایی کردند که به واسطه آنها رایانه می‌توانست معادلات پیچیده ریاضی را برای پدیده‌های مختلف فیزیکی حل کند. از جمله این پدیده‌ها رفتار سازه‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف بودند. اگرچه روش‌های آزمایشگاهی پاسخ واقعی را به ما می‌دهند، اما می‌توانند مشکلاتی از قبیل حجم، اندازه و شکل قطعات بتنی، شرایط بارگذاری و آزمایش و صرف هزینه و وقت زیاد را ایجاد کنند که روش‌های عددی این مشکلات را ندارند (Park, 1995).

با پیشرفت علم، روش‌های عددی برای حل معادلات سنگین به کار گرفته شد. روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود از جمله این روش‌های عددی هستند. روش اجزای محدود به دلیل نظام‌مند بودن، دقت بالاتر و سادگی در برنامه‌نویسی، بیشتر در خدمت علم قرار گرفت. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به SAP2000، DIANA، ANSYS، Abaqus و OpenSees اشاره نمود. هر کدام از این نرم‌افزارها مدل‌های مختلف مواد از جمله فولاد و بتن را در شرایط مختلف از قبیل پیش‌تنیدگی، محصورشدگی و ترک‌خوردگی دارا می‌باشند و همچنین این قابلیت را دارند که مدل‌های جدیدتر و دقیق‌تر بتوانند به آنها معرفی شوند.

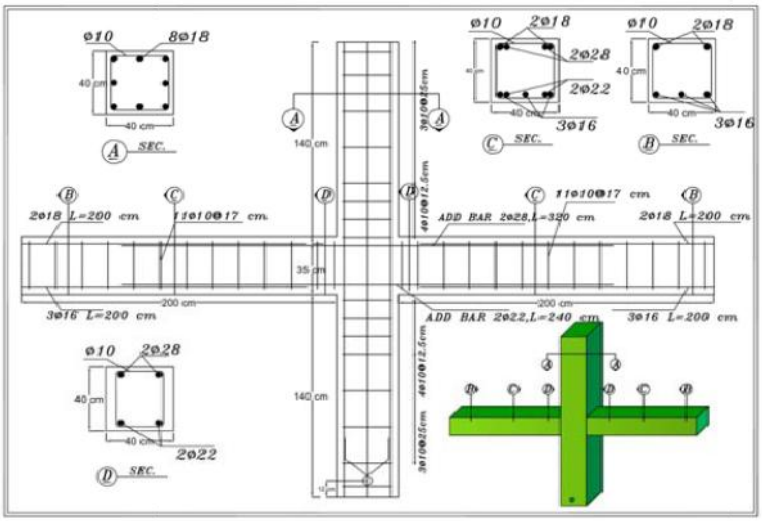
نحوه‌ی مدل‌سازی

دو نمونه پیش‌ساخته و یک نمونه یک‌پارچه از اتصالات تیر به ستون با ابعاد واقعی تحت بار چرخه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. میلگردهای یکی از اتصالات پیش‌ساخته به صورت مستقیم (PC1) و دیگری به صورت U شکل (PC2) ساخته شدند (Shariatmadar & Zamani Bydokhti, 2011, 2014). همه نمونه‌ها از یک قاب پیرامونی ۵ طبقه با دو تیر که به دو طرف ستون متصل بودند، انتخاب شدند. دو اتصال پیش‌ساخته (PC2 & PC1) و نیز نمونه یک‌پارچه (MO) بر طبق مقاومت و سختی مورد نیاز و براساس آئین‌نامه بتن ایران طراحی و ساخته شدند. مقطع تیرها ۴۰x۴۰ سانتی‌متر و طول آزاد آن‌ها ۲۰۰ سانتی‌متر می‌باشد. طول کلی ستون‌های نمونه ۳۲۰ سانتی‌متر است و تیرها به وسط ارتفاع متصل بودند. میلگردهای طولی ستون برای تمام نمونه‌ها ۸Φ۱۸ می‌باشد. میلگردهای طولی از نوع AIII و بتن پیش‌ساخته براساس مقاومت ۲۸۰ مگاپاسکال طراحی شدند. ساخت بتن درجا نمونه‌ها در آزمایشگاه و مشابه بتن نمونه‌ها بود.

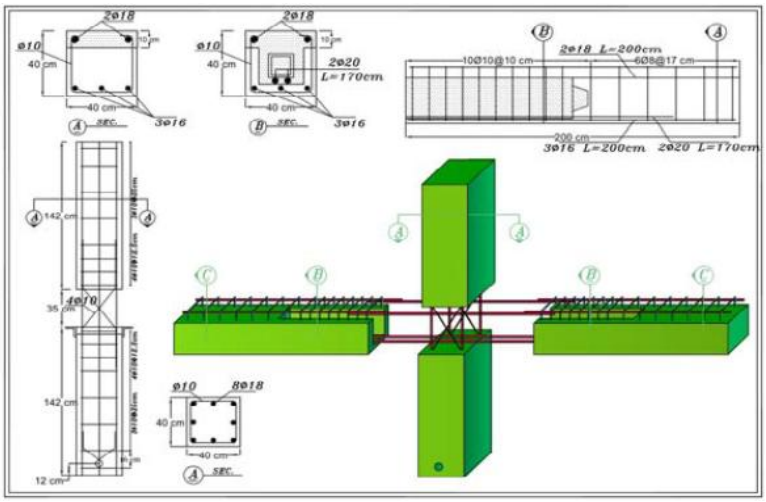
خاموت‌ها از نوع Φ۲۰ و به فاصله تقریبی ۱۲۵ میلی‌متر در ۷۰ سانتی‌متری بالا و پایین محل اتصال و در سایر قسمت‌ها ۲۵۰ میلی‌متر است. میلگردهای بالا و پایین تیر به ترتیب ۲Φ۱۸ و ۳Φ۱۶ است. در ناحیه اتصال میلگرد تقویتی ۲Φ۲۸ در بالا و ۲Φ۲۲ در پایین قرار داده شده است. شکل‌های ۱ تا ۳ جزئیات ابعاد و نحوه‌ی آرماتورگذاری را نشان می‌دهند. تاریخچه بارگذاری مطابق شکل ۴ و شرایط تکیه‌گاهی مطابق شکل ۵ می‌باشد.

در مدل‌سازی این اتصالات در نرم‌افزار Abaqus، برای مدل‌سازی بتن از المان Solid هشت‌گرهی C3D8I و برای میلگردها از المان Truss دو گرهی T3D2 و در ادامه برای شبیه‌سازی اتصالات با فنرهایی در انتهای آن‌ها از المان B12 با مقطع فایبر که یک المان تیر می‌باشد، استفاده شده است. بتن به صورت مدل آسیب دیده‌ی پلاستیک و فولاد به صورت منحنی دوخطی در برنامه تعریف شده‌اند.

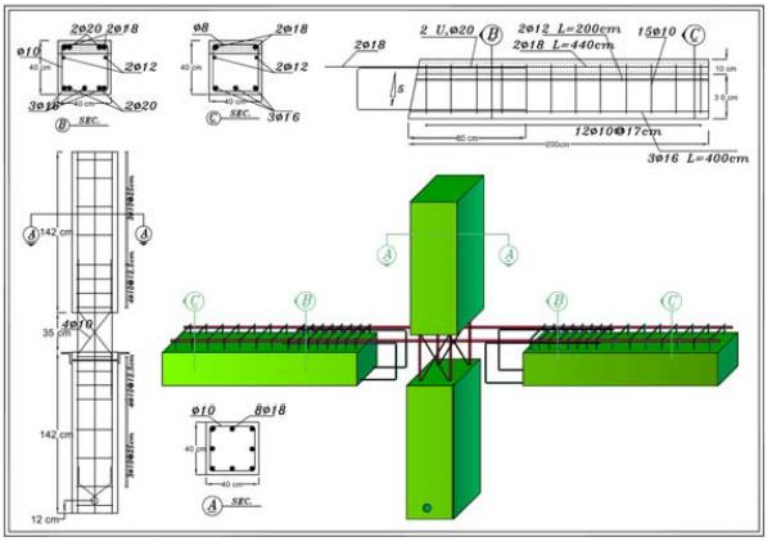
در نرم‌افزار جهت ایجاد شرایط آزمایشگاهی از قبیل بتن‌ریزی چشمه اتصال در اتصالات پیش‌ساخته، چسبندگی بین دو مرحله بتن‌ریزی، مدل نمودن لغزش آرماتورها در بتن و ... مدل مواد (بتن و فولاد) دستخوش تغییرات شده‌اند تا این تفاوت در نمونه‌ها را به شرایط واقعی نزدیک‌تر نمایند. این اثرات در نمونه‌ها، با اعمال ضرایبی در در مدل مواد دیده شده است.



شکل ۱: ابعاد و دتایل آرماتورگذاری نمونه یک‌پارچه (Shariatmadar & Zamani Bydokhti, 2011, 2014)

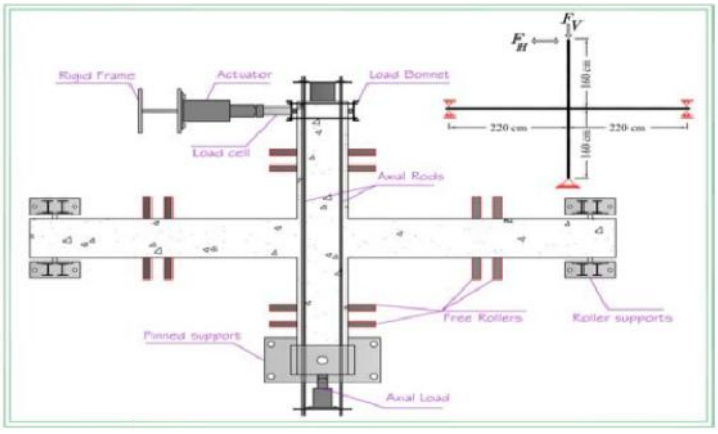


شکل ۲: ابعاد و دتایل آرماتورگذاری نمونه PC1 (Shariatmadar & Zamani Bydokhti, 2011, 2014)

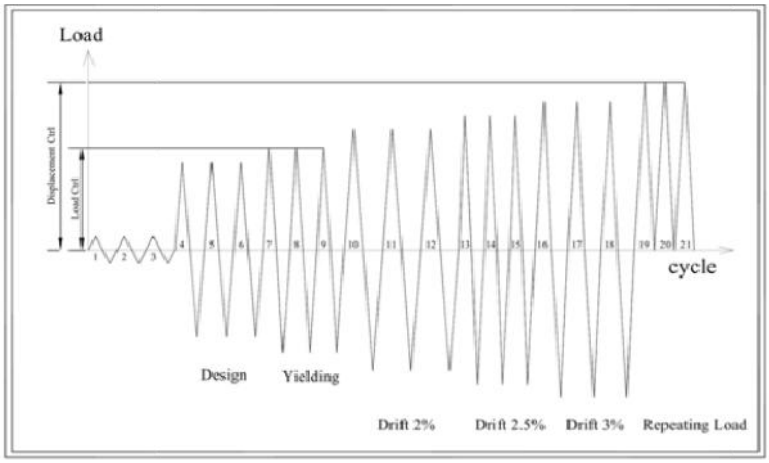


شکل ۳: ابعاد و دتایل آرماتورگذاری نمونه PC2 (Shariatmadar & Zamani Bydokhti, 2011, 2014)

فنرها در مدل ساده شده به نوعی همان مفاصل پلاستیک می‌باشند. در ناحیه انتهای چشمه اتصال، در هر چهار طرف، سه فنر قرار می‌گیرد که نمایانگر رفتار محوری، برشی و خمشی اتصال در آن قسمت خواهد بود. رفتار این فنرها براساس ویژگی‌های مقطع در آن قسمت محاسبه و تعیین می‌شود. این مدل‌ها نیز با مدل آزمایشگاهی مقایسه شده و راستی‌آزمایی می‌گردند. مدل ساده شده شامل فنر در مدل‌سازی قاب‌ها بسیار حائز اهمیت خواهد بود، زیرا مدل‌سازی اتصال با تمامی جزئیات در قاب‌ها با تعداد دهانه و طبقات زیاد بسیار مشکل بوده و حجم بالایی از محاسبات خواهد داشت.



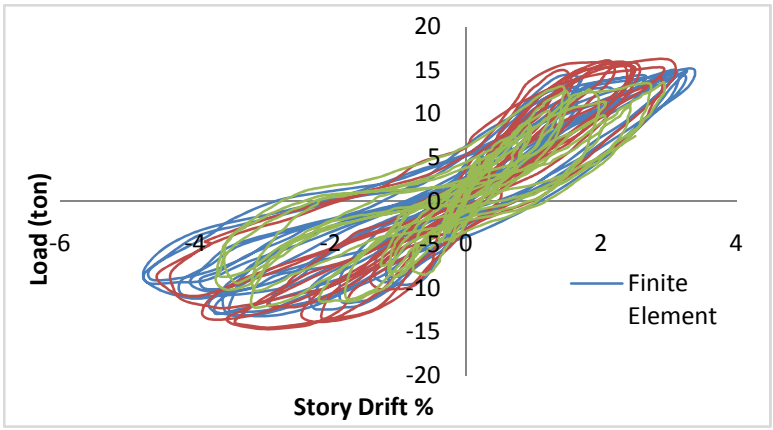
شکل ۴: نحوه‌ی بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی (Shariatmadar & Zamani Bydokhti, 2011, 2014)



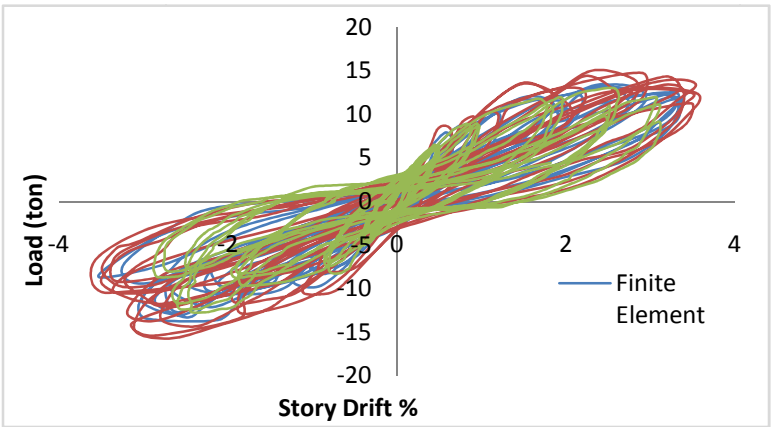
شکل ۵: تاریخچه‌ی بارگذاری براساس بار- چرخه (Shariatmadar & Zamani Bydokhti, 2011, 2014)

تحلیل و بررسی

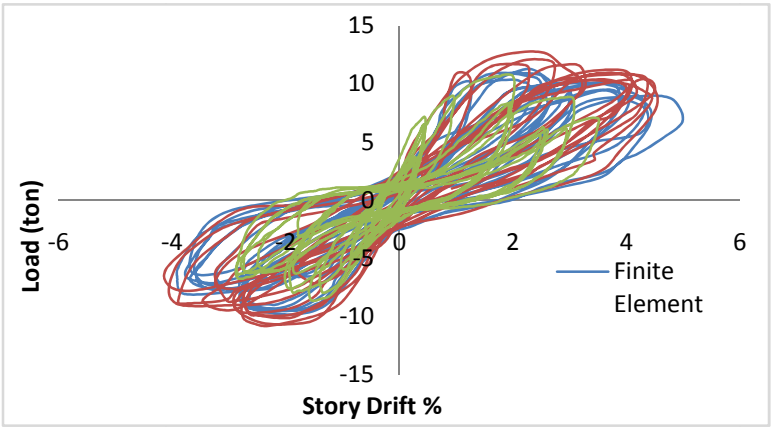
در شکل‌های ۶ تا ۸، منحنی هیسترزیس اتصالات در حالات آزمایشگاهی، مدل کامل و مدل ساده شده آمده است. در تمامی شکل‌ها همانگونه که مشاهده می‌شود تطبیق خوبی بین مدل کامل و نمونه‌های آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. در محدوده‌ی رفتار الاستیک تقریبا همه منحنی‌ها بر یکدیگر منطبقند و در منطقه غیرالاستیک نمونه‌های مدل‌سازی شده بالاتر از منحنی آزمایشگاهی واقع شده‌اند که این امر به علت وجود خطاهای غیرقابل کنترل در مراحل مختلف آزمایش است. در تمامی شکل‌ها مدل ساده شده نسبت به دو حالت دیگر منحنی سخت‌تری را نشان می‌دهد. از آنجایی که تمام رفتار اتصال در یک مفصل متمرکز است و سایر قسمت‌ها دخالتی در توزیع یا تحمل نیروهای وارده ندارند، این رفتار قابل پیش‌بینی می‌باشد.



شکل ۶: منحنی هیسترزیس اتصال MO



شکل ۷: منحنی هیسترزیس اتصال PC1



شکل ۸: منحنی هیسترزیس اتصال PC2

۶ مربوط به نمونه درجا ریخته شده‌ی MO می‌باشد. سختی منحنی مدل دقیق حدود ۱۶٪ بیشتر از منحنی آزمایشگاهی می‌باشد. این امر نشان‌دهنده‌ی آن است که مدل آزمایشگاهی نرم‌تر است. علت این امر می‌تواند ابعاد مش‌ها، ایده‌آل‌سازی شرایط آزمایشگاهی در مدل تحلیلی، غیرخطی شدن رفتار مواد و پارامترهای اصطکاکی تعریف شده در نرم‌افزار و عدم لحاظ نمودن لغزش آرماتورها در بتن باشد.

شکل ۷ مربوط به نمونه درجا ریخته شده‌ی PC1 می‌باشد. سختی منحنی مدل دقیق حدود ۸٪ کمتر از منحنی آزمایشگاهی می‌باشد. این تفاوت می‌تواند علاوه بر آنچه در نمونه MO گفته شد، ناشی از دقت مدل‌سازی رفتار بتن باشد. ۸ مربوط به نمونه درجا ریخته شده‌ی PC2 می‌باشد. سختی منحنی مدل دقیق حدود ۶٪ کمتر از منحنی آزمایشگاهی می‌باشد.

با توجه به نمودارهای فوق مشاهده می‌شود که کاهش ظرفیت در مدل‌های آزمایشگاهی نسبت به مدل عددی نسبتاً بیشتر است. مطابق جدول ۱، میرایی کلیه‌ی اتصالات مدل‌سازی شده نسبت به اتصالات آزمایشگاهی بیشتر می‌باشد. نمونه‌های آزمایشگاهی نسبت به نمونه‌های مدل‌سازی شده نرم‌تر رفتار می‌کنند، زیرا در مدل‌سازی، مدل دقیقی برای مدل‌سازی رفتار بتن که خود ماده‌ای پیچیده در زمینه رفتاری می‌باشد وجود ندارد و همچنین اثر لغزش در پیوستگی بین آرماتور و بتن را نمی‌توان به خوبی لحاظ نمود. در نتیجه نمی‌توان دقیقاً دو مدل را بر هم منطبق نمود. از طرفی در مدل‌سازی بسیاری از شرایط آزمایشگاهی ساده‌سازی شده و در نتیجه مقداری از خطاها حذف شده و در نظر گرفته نمی‌شوند. در تمامی حالات ارائه شده میرایی اتصالات پیش‌ساخته نسبت به اتصال درجا بیشتر می‌باشد. که این امر نشان‌دهنده‌ی مقاومت کمتر و نیز نرمی اتصالات پیش‌ساخته است.

جدول ۱: میرایی معادل برای نمونه‌های مختلف

	نمونه	A_e	A_p	ζ(%)
مدل آزمایشگاهی	**MO**	43.19	86.79	16
	PC1	30.41	72.56	19
	PC2	29.42	77.59	21
مدل المان‌های محدود	**MO**	34.15	77.21	18
	PC1	27.05	71.36	21
	PC2	23.52	73.85	25
مدل ساده شده	**MO**	43.42	87.26	16
	PC1	27.17	68.26	20
	PC2	24.77	71.56	23

تحلیل نتایج

منحنی‌های هیسترزیس

با دقت در منحنی‌های هیسترزیس نشان داده شده، مشاهده می‌شود بازشدگی در اتصالات پیش‌ساخته نسبت به اتصال درجا بیشتر بوده که حاکی از قابلیت بیشتر این نوع از اتصالات در جذب و استهلاک انرژی است. همانگونه که پیش‌تر اشاره شد علت این امر لغزش بیشتر آرماتورها در بتن‌ریزی مرحله دوم اتصالات پیش‌ساخته و عدم پیوستگی کامل بین دو مرحله بتن‌ریزی می‌باشد. این امر منجر به ایجاد ترک در ناحیه چشمه اتصال شده که به نوبه‌ی خود باعث باز شدن بیشتر ترک‌ها و تسلیم قابل توجه آرماتورها می‌گردد که نتیجه این امر افزایش توانمندی اتصال در استهلاک انرژی است. بازشدگی حلقه‌ها در نمونه PC2 نسبت به نمونه PC1 در دو اتصال پیش‌ساخته بیشتر است که علت آن می‌تواند آرایش میلگردها در ناحیه‌ی چشمه‌ی اتصال باشد. در ارتباط با اتصال PC1 در قسمت چشمه اتصال میلگردها سرتاسری عبور داده می‌شوند که نسبت به اتصال PC2 که فقط قسمت U انتهای هر تیر در این ناحیه قرار می‌گیرد پیوستگی بهتری را بین تیر و ستون ایجاد می‌کند و عملکرد بهتری دارد.

میرایی سازه‌ها

در رابطه با میرایی سازه‌ها، میرایی در اتصال پیش‌ساخته نسبت به اتصال درجا بیشتر است و در اتصال PC2 نبست به دو اتصال دیگر میرایی بیشتر می‌باشد. حلقه‌ها در اتصال PC2 بازتر می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی جذب انرژی بیشتر این نوع از اتصال است. علت این امی می‌تواند ترک‌خوردگی زودرس در چرخه‌های تسلیم در نمونه PC2 نسبت به دو نمونه دیگر باشد که این خود نشان‌دهنده‌ی آن است که این نوع اتصال نرم‌تر می‌باشد. در مجموع اتصالات پیش‌ساخته نسبت به اتصالات درجا نرم‌تر می باشند و سختی اولیه نیز در این نوع از اتصالات کمتر است.

در مجموع برای هر سه حالت مشاهده شد که نمونه پیش‌ساخته در زمینه‌ی سختی و مقاومت مقدار کمتر و در زمینه‌ی میرایی و جذب انرژی عدد بیشتری را از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

دستاوردهای پژوهش انجام گرفته را می‌توان به صورت زیر بررسی نمود. نتایج مربوط به شیوه مدل‌سازی سه‌بعدی اتصالات به صورت کامل با در نظر گرفتن رفتار دقیق و ساده‌سازی شده می‌باشند. بنابراین، پژوهش حاضر مجموعه‌ای منسجم جهت برداشتن گامی رو به جلو در مسیر بررسی اتصالات پیش‌ساخته بتنی در قلمرو مهندسی زلزله فراهم می‌نماید. استفاده از اتصالات تیر به ستون پیشنهادی مورد مطالعه در این پژوهش علاوه بر قابل اجرا بودن به دلیل سادگی جزئیات و حداقل زمان جهت ساخت رضایت‌بخش می‌باشند و قابلیت بسط و توسعه در صنعت ساختمان‌سازی کشور را دارند.

در این پژوهش مدل‌های مورد استفاده برای اتصالات دقیق و ساده‌سازی شده معرفی شدند. اما دستاورد عمده مطالعه حاضر برای مدل‌سازی اتصالات، مدل دقیق آن می‌باشد.

- نتایج حاصله از مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارای دقت خوبی بوده به طوری که اختلاف بین این دو کمتر از ۱۰٪ است. بنابراین صحت نتایج مدل‌سازی توسط نتایج آزمایشگاهی تأیید می‌شود.
- اتصالات پیش‌ساخته پیشنهادی رفتار شکل‌پذیری را از خود نشان می‌دهند و دارای ظرفیت باربری بالایی می‌باشند.
- نتایج آنالیز غیرخطی نشان می‌دهد که رفتار این نوع از اتصالات در قاب‌های خمشی پیش‌ساخته قابل اعتماد و مورد قبول است. اگرچه اتصالات به صورت پیوسته و ممتد اجرا نمی‌گردند ولی این نوع از اتصالات در قاب‌های خمشی پیش‌ساخته یا سیستم‌های چندگانه با لحاظ نمودن سختی و مقاومت مرتبط با آن‌ها به خوبی قابل استفاده می‌باشند.
- با توجه به مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی نسبی طبقات در نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی، مکانیزم‌های ترک خوردگی و تسلیم مشابه می‌باشد.

فهرست مراجع

Ertas, O., Ozden, S., & Ozturan, T. (2006). Ductile connections in precast concrete moment resisting frames. *PCI Journal*, *51*(3), 66–76.

Khoo, J.-H., Li, B., & Yip, W.-K. (2006). Tests on precast concrete frames with connections constructed away from column faces.

Korkmaz, H. H., & Tankut, T. (2005). Performance of a precast concrete beam-to-beam connection subject to reversed cyclic loading. *Engineering Structures*, *27*(9), 1392–1407.

Ochs, J. E., & Ehsani, M. R. (1993). Moment Resistant Connections in Precast Concrete Frames for Seismic Regions. *PRECAST/PRESTRESSED CONCRETE INSTITUTE. JOURNAL*, *38*(5).

Park, R. (1995). A perspective on the seismic design opf precast concrete structures in New Zealand. *PCI Journal*, *40*(3), 40–60.

PCI. (1992). Prestressed Cocrete Institute, Desing Handbook. *4th Edn*, (Chicago, USA).

PPCI, C. on C. D. (2007). Precast and Prestressed Cocrete Institute.

Shariatmadar, H., & Zamani Bydokhti, E. (2011). Experimental Invastigation of Pracast Concrete Beam to Column Connections Subjected to Reversed Cyclic Loads. *Sixth International Conference of Seismology and Earthquake Engineering (SEE6)*.

Shariatmadar, H., & Zamani Bydokhti, E. (2014). An Investigation of Seismic Response of Precast Concrete Beam to Column Connections: Experimental Study. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, *15*(No. 1), 53–71.

Xue, W., & Yang, X. (2010). Seismic tests of precast concrete, moment-resisting frames and connections. *PCI Journal*, *55*(3).