

بررسی عملکرد اتصالات قاب‌های خمشی پیش‌ساخته بتنی

حسین مهرداد^۱، میلاد رومیانی^{۲*} علی مهدوی‌فر

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، hmehrad@aut.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر، miladroomiani@aut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران دانشگاه آزاد اسلامی، a.mahdavi@iauec.ac.com

در گذشته ساختمان سازی به صورت سنتی و بدون توجیه اقتصادی در استفاده از زمان و مصالح صورت می‌گرفت تا این‌که در کشورهای صنعتی استفاده از قطعات پیش‌ساخته ساختمانی باعث گردید که ساختمان سازی به صورت صنعتی و پیشرفته صورت پذیرد. امروزه سازه‌های بتنی پیش‌ساخته به خاطر سرعت بالای اجرا و کیفیت بسیار خوب بیشتر از سازه‌های درجاریز مورد توجه قرار گرفته‌اند، البته این سازه‌ها علاوه بر موارد ذکر شده دارای مزایای دیگری نیز هستند که از جمله آن‌ها می‌توان به کنترل کیفی بالا، قیمت تمام شده مناسب، سبک شدن نهایی سازه، مقاومت لرزه‌ای مناسب، استفاده مجدد از قطعات پیش‌ساخته پس از پایان کاربری سازه و ایجاد هماهنگی مناسب بین طرح معماری و اجرای سازه‌های اشاره کرد که این موارد دال بر لزوم گسترش هرچه بیشتر این صنعت در کشور ما می‌باشد. روند اجرای این سازه‌ها به صورتی است که بعد از ساخت قطعات پیش‌ساخته در کارگاه نوبت به مونتاژ آن‌ها خواهد رسید که البته اتصال بین اجزاء پیش‌ساخته همیشه مشکل‌زا بوده و یکی از نقاط ضعف این سازه‌ها به شمار می‌رود به صورتی که خرابی این سازه‌ها در زلزله‌های مختلف نشان داده است که اتصالات در این سازه‌ها یکی از بحرانی‌ترین نقاط بوده و نیازمند دقت در طراحی و اجراست؛ بنابراین بر اساس ضرورت پیش‌آمده تلاش‌های بسیار زیادی در جهت رفع این مشکل صورت گرفته است. با توجه به این که در آیین‌نامه *ACI* و آبا علی‌رغم بیان نکات کلی در مورد این اتصالات، اشاره‌ای به نحوه رسیدن به یک اتصال مقاوم خمشی جهت استفاده در مناطق لرزه‌خیز نشده است لذا اتصالات رایجی که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد اکثراً حاصل تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مختلف می‌باشد، بنابراین در این مطالعه تعدادی از این اتصالات در نرم‌افزار اجزاء محدود *ABAQUS* شبیه‌سازی و تحلیل شده و به منظور تشخیص اتصالاتی مناسب با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

کلمات کلیدی: سازه صنعتی، اتصال بتنی، اتصال خمشی، پیش‌ساخته، اتصال پیش‌ساخته

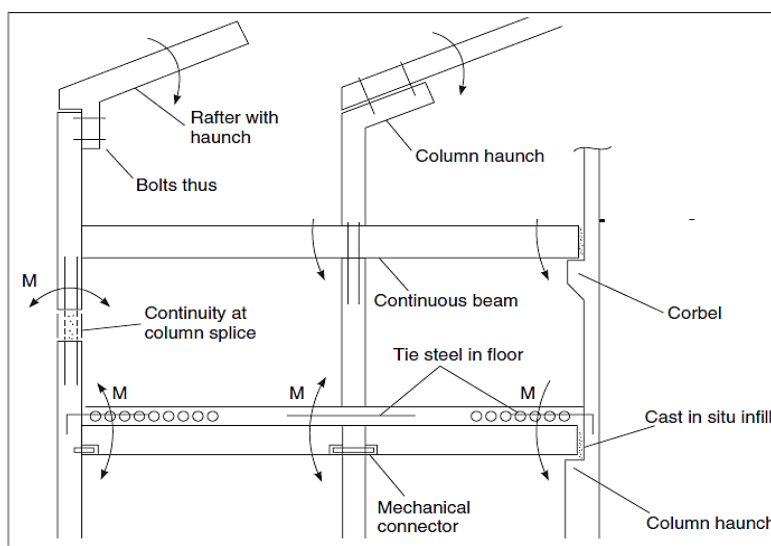
مقدمه

امروزه با پیشرفت علم و فناوری نیازها و خواسته‌های جدیدی در زمینه مهندسی سازه رخ نموده است. عامل زمان در ساخت سازه‌ها اهمیت دوچندان یافته و این امر گرایش به سازه‌های پیش ساخته را افزایش داده است همچنین با افزایش جمعیت بشری علاقه به داشتن فضاهای بزرگ بدون حضور ستون‌های میانی خواهان بسیاری پیدا کرده است. سیستم سازه‌های پیش ساخته را حدود ۳۴ سال پیش یک شخص آمریکایی ابداع کرد. مرحله صنعتی شدن آن حدود ۵ تا ۶ سال به طول انجامید. عمده‌ترین شرکت‌هایی که در دنیا این فناوری را به کار می‌گیرند شرکت E.V.G اتریش و RAM آمریکا می‌باشند [۱].

توجه زیاد صنایع اروپایی به فناوری سازه‌های پیش ساخته به خاطر مشکلاتی بود که در سایر روش‌های ساخت و ساز وجود داشت. به طور مثال در سازه‌های بتنی ریخته شده در جا، اصلی‌ترین مشکل موجود کنترل کیفیت سازه در کارگاه بود. در کل می‌توان گفت دلیل انتخاب روش سازه‌های پیش ساخته از بین روش‌های موجود امتیازات فراوانی می‌باشد که در تمام مراحل استفاده از این روش وجود دارد. البته این روش نیز دارای نواقص محدودی می‌باشد، اما با توجه به فعالیت‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر امید است که بتوان آن‌ها را حل نمود. یک سازه‌ی بتن‌آرمه‌ی پیش ساخته از مونتاژ قطعات پیش ساخته‌ای که به صورت مناسب با یکدیگر اتصال یافته‌اند، تشکیل می‌شود. بدین ترتیب قاب‌های سه‌بعدی‌ای که ظرفیت تحمل بارهای گرانشی و جانبی را دارند، تشکیل می‌شوند [۲]. این قاب‌ها برای سازه‌هایی از جمله: ادارات، واحدهای خرده‌پا، پارکینگ‌ها، مدارس و دیگر سازه‌هایی که نیازمند حداقل محدودیت‌های داخلی بوده و همچنین فضاهای چندمنظوره، انتخاب ایده‌آلی هستند.

طراحی و ساخت اتصالات و مفاصل مهم‌ترین مرحله در طراحی و اجرای سازه‌های بتنی پیش ساخته است. هدف اتصالات انتقال نیرو و بین اعضا و همچنین حفظ پایداری و استقامت سازه است. راه‌های مختلف زیادی از جمله: پیچی، جوشی، مرکب و... برای ایجاد یک اتصال وجود دارد؛ اما هر کدام از این روش‌ها در صورت اجرا باید ساده بوده و نکات طراحی بدون ابهام و دقیق با استفاده از نقشه‌های مربوطه به محل اجرای اتصال انتقال داده شود [۳]. مفاصل نباید فقط و فقط برای مقابله با بار سرویس و بار نهایی طراحی شوند، باید رابطه‌ای درست برای پیش‌بینی و محاسبه‌ی استحکام آن وجود داشته باشد که بر اساس آن اتصال در مقابل عوامل غیرعادی مانند: آتش، ضربه، انفجار، فروزش و... نیز مقاومت داشته باشد. نکته مهم دیگر این که شکست مفاصل نباید تحت هیچ شرایطی به فروریزش سازه منجر شود.

جهت بحث پیرامون اتصالات پیش ساخته بتنی و پارامترهای مؤثر در طراحی آن‌ها ابتدا باید با انواع اتصالات و محل تقریبی قرارگیری آن‌ها در سازه آشنا شد لذا بر همین اساس در شکل ۱ چند نمونه از اتصالات پیش ساخته و محل آن‌ها در سازه نشان داده شده است.



بررسی اجمالی چند پژوهش صورت گرفته

بتن پیش‌ساخته، عناصر سازه‌ای باکیفیت بالا و همچنین ساخت‌وساز مؤثر را فراهم می‌کند و باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه‌های کل سرمایه‌گذاری می‌شود. به‌منظور تأیید این منافع و گسترش سازه‌های بتنی پیش‌ساخته در مناطق لرزه‌ای، عملکرد و ظرفیت اتصالات طراحی‌شده مورد بررسی قرار گرفت. بسیاری از سازه‌های بتنی پیش‌ساخته توسط زمین‌لرزه‌های اخیر (آدانا جیهان در سال ۱۹۹۷ و Duzce و Koaceli در سال ۱۹۹۹) به شدت آسیب دیدند. این مسئله ضربه‌ای به مراکز صنعتی کشوری مانند ترکیه وارد آورد که البته عملکرد ضعیف اتصالات آن‌ها ممکن است دلیل اصلی این آسیب گسترده بوده باشد [۴].

در نتیجه، برنامه تحقیقاتی دوحله‌ای مبنی بر ضعف اتصالات تیر به ستون پیش‌ساخته در دانشگاه‌های Bogazici و Kocaeli بعد از زلزله ۱۹۹۹ توسعه یافت. این برنامه توسط شورای تحقیقات علمی و فنی ترکیه و انجمن بتن پیش‌ساخته ترکیه سازمان‌دهی شده بود [۴]. در مرحله اول از این طرح تحقیقاتی، اتصالات پیشنهادی مختلفی با اتصالات یکپارچه همتای خود مقایسه شدند. در فاز اول، انواع اتصالاتی که با توجه به شیوه ساختشان در آمریکای شمالی، اروپا و ژاپن به‌صورت گسترده کاربرد دارند، انتخاب شد و در فاز دوم اتصالات هیبریدی پس‌تنیده با نسبت آرماتورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. جزئیات و موقعیت اتصالات اعضاء بتنی پیش‌ساخته موضوع تعدادی از آزمایش‌ها، تحلیل‌ها و بررسی‌ها بود [۴].

در مطالعه Restrepo و همکاران [۵]، شش نوع مختلف از اتصالات ریخته شده درجا با جزئیات مختلف آرماتورگذاری و مکان اتصالات متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه ۵ در پژوهش Restrepo شامل تیرهای پیش‌ساخته بتنی قرار گرفته بین دو ستون با هسته مشترک بتنی ریخته شده درجا است که بین دو سر تیر و ستون ریخته می‌شود. تیرها به فاصله ۳۰ میلی‌متر یا ۱٫۲ اینچ از سر ستون قرار می‌گیرند و برای اجرای آن‌ها به هیچ جزئیات خاصی، از جمله کلیدهایی که برای برش تعبیه می‌شود نیازی نیست [۴].

Alcocer و همکاران، رودریگز و Blandon نیز در مورد عملکرد اتصالاتی گزارش کرده‌اند که مفصل پلاستیک از سطح ستون گسترش می‌یابد [۴]. اگرچه این نوع از اتصال شبیه‌سازی شده جهت انجام آزمون، به‌صورت کاملاً یکپارچه نیست اما می‌توان این نوع اتصال را در قاب‌های پیش‌ساخته بتنی و یا در بناهای ترکیبی استفاده کرد؛ به شرطی که مقاومت و سختی اتصال به‌صورت دقیق در نظر گرفته شده باشد. استفاده از بتن مسلح شده با آرماتورهای فولادی در اتصالات ریخته شده درجا برای بهبود شکل‌پذیری و استهلاک انرژی در نمونه و افت آهسته‌تر سختی، بسیار مؤثر گزارش شده است. اضافه شدن رشته‌های فولادی در ناحیه اتصال باعث بهتر شدن استحکام اتصال در محل وجود میلگردهاست [۴].

Seckin و Bhatt و همکارانشان اتصالات جوش داده شده را در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته گسترش دادند. اگرچه رفتار این اتصالات رضایت‌بخش بوده اما نیاز به جوش کاری زیادی در میلگردهای تیر و ستون دارد. هزینه و معضلات مربوط به کنترل کیفیت جوشکاری بیش‌ازحد، بدون شک بعضی از مزایای ذاتی بتن پیش‌ساخته را از بین می‌برد. علاوه بر این؛ حرارت تولید شده از جوشکاری بیش‌ازحد ممکن است باعث آسیب به قید میلگردهای فولادی و همچنین ترک خوردگی بتن اطراف آن‌ها شود که از این جهت باید جوشکاری را در سازه‌های بتن‌آرمه پیش‌ساخته به حداقل رساند [۴]. اتصالات پیچ شده با رابط انعطاف‌پذیری که به‌وسیله آن تیرهای پیش‌ساخته به سطح ستون وصل می‌شوند؛ شاید مقرون به‌صرفه‌ترین حالت ساخت‌وساز سازه‌های پیش‌ساخته باشد. در این نوع اتصالات نیروی اصطکاک بر اثر لنگر مقاوم در برابر نیروی برش عمودی در اتصال بین تیر و ستون به وجود می‌آید.

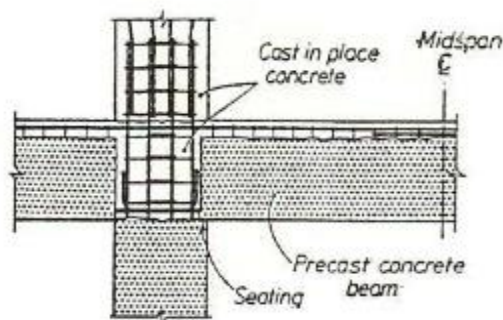
Franch و همکاران نیز پاسخ انواع مختلفی از اتصالات را ارائه کردند. در برخی از اتصالات مفصل پلاستیک از نقطه اتصال به سمت داخل اتصال انتقال می‌یابد. تحقیقات franch نشان می‌دهد که اتصالات مسلح شده با میلگرد کشیده شده و رزوه شده به قسمت‌های ثابت؛ بهترین و مطلوب‌ترین حالت از نظر عملکرد، ساخت و بحث مسائل اقتصادی را داراست. در برنامه presss اتصالات با جزئیات اتصال مشابه این حالت با در صد فولاد کمتر مورد آزمایش قرار گرفتند و عملکرد این اتصالات را شبیه اتصالات یکپارچه گزارش کردند. اشکال این اتصالات را جابجایی باقیمانده بسیار زیاد و همچنین سختی باقیمانده کم پس از پاسخ لرزه‌ای غیر ارتجاعی بیان کردند. Ghosh و همکارانش یک مقاله در مورد

مفهوم اتصال قوی ارائه کردند که با اجلاس بین‌المللی (۱۹۹۷) برای سازه‌های تابع آیین‌نامه رسمی (سازه‌های هم شکل) گسترش یافت و به تدوین مقررات طراحی مهندسی سازه برای سازه‌های پیش‌ساخته منجر شد [۴].

چند نمونه رایج از اتصالات تیر-ستون

اتصال ارائه‌شده توسط Restrepo و همکاران [۵]

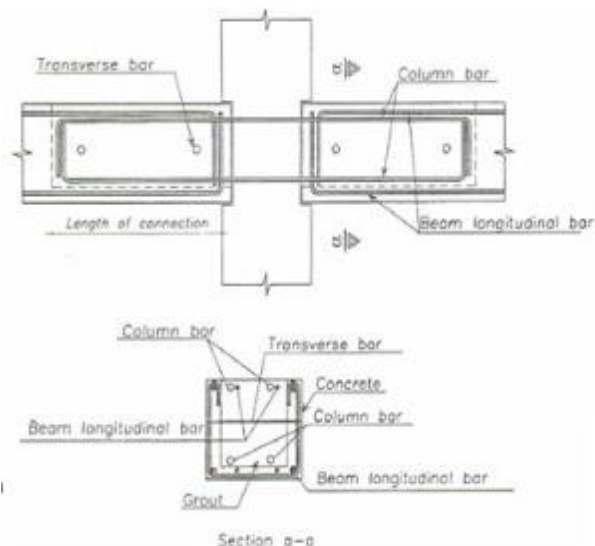
همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، مقطع پایینی تیر به صورت پیش ساخته بوده و مقطع بالایی به همراه چشمه اتصال به صورت درجا بتن‌ریزی می‌شود. تیر پیش‌ساخته بر روی ۳۰ میلی‌متر پوشش بتنی ستون تحتانی قرار می‌گیرد. میلگردهای پایینی تیر در داخل هسته‌ی اتصال تیر به ستون با خم ۹۰ درجه محکم می‌شوند. اتصال ستون فوقانی را می‌توان به صورت بتن‌ریزی درجا و از طریق هم‌پوشانی آرماتورهای طولی ستون و یا از طریق اتصالات مکانیکی قرارگرفته در پایین ستون فوقانی برقرار کرد [۵].



شکل ۲: اتصال ارائه شده توسط Restrepo و همکاران [۳].

اتصال پیش‌ساخته ارائه‌شده توسط Khaloo و پرستش [۶]، [۷]

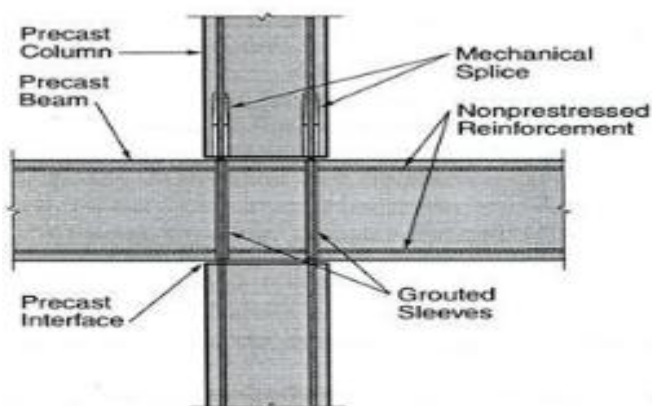
جزئیات این نوع اتصال در شکل ۳ آمده است. در این اتصال از جوش و بست‌های مکانیکی استفاده نشده و اتصال از طریق هم‌پوشانی میلگردهای طولی تیر با میلگردهای خارج شده از ستون صورت گرفته است. انتقال نیروی برشی از طریق نشیمن‌گاه تعبیه شده در ستون انجام می‌گیرد. تیرهای پیش‌ساخته در دو انتها به صورت U شکل و در وسط با مقطع کامل ساخته شده‌اند که باعث شده بتن‌ریزی درجا کاهش یابد و در هنگام اجرا نیازی به قالب‌بندی نباشد که این نکته به بالا بردن سرعت اجرای اتصال کمک می‌کند. از طرفی به دلیل اینکه چشمه‌ی اتصال به همراه ستون به صورت یکپارچه بتن‌ریزی شده است، این ناحیه دارای مقاومت و عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های مشابه اجرا شده به صورت بتن‌ریزی درجا در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته است.



شکل ۳: اتصال ارائه شده توسط Khaloo و پرستش [۳].

سیستم تیر بتنی پیش ساخته‌ی عبوری از میان ستون‌ها [۳].

در این نوع اتصال، تیر پیش ساخته به صورت سرتاسری از ناحیه‌ی اتصال عبور کرده و اتصال تیر به تیر در ناحیه‌ی میانی دهانه انجام می‌پذیرد. در نتیجه به دلیل ساخت صنعتی، ناحیه اتصال تیر به ستون دارای مقاومت و عملکرد بهتری نسبت به چشمه‌ی اتصال مشابه اجرا شده به صورت بتن‌ریزی درجا در سازه‌های پیش ساخته می‌باشد. اتصال تیرها بسته به شرایط ممکن است در وسط دهانه یا در نقطه‌ی عطف تیر از طریق هم‌پوشانی میلگردهای طولی یا روش‌های دیگر صورت گیرد. برای اتصال دادن قطعات پیش ساخته، در چشمه‌ی اتصال سوراخ‌های قائمی جهت عبور میلگردهای اصلی ستون تحتانی تعبیه شده است. این میلگردها پس از عبور از تیر در نوعی بست مکانیکی تعبیه شده در پایین ستون فوقانی قرار گرفته تا از ایجاد اتصالی مناسب پس از تزریق گروت با مقاومت بالا در فضای خالی باقی مانده بین میلگرد و این بست‌ها اطمینان حاصل شود (شکل ۴) [۳].



شکل ۴: تیر پیش ساخته عبوری از میان ستون [۳].

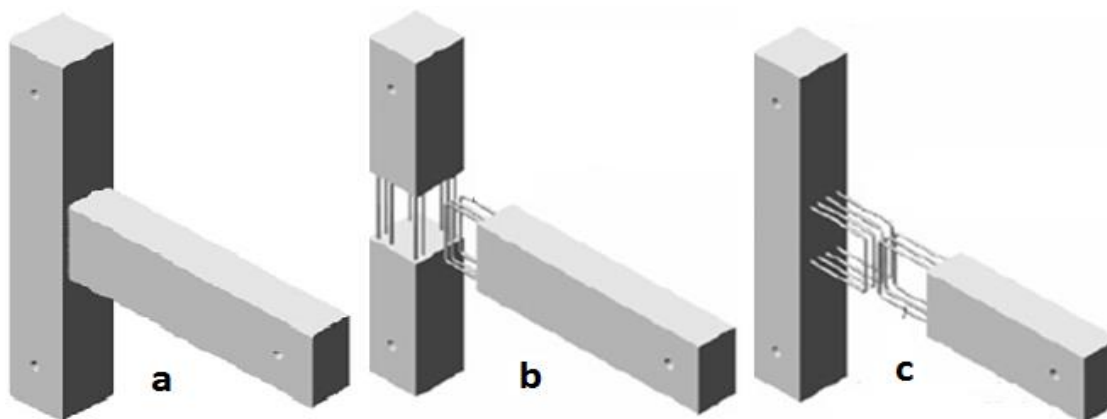
در این قسمت که مربوط به بررسی مطالعات پیشین در مورد اتصالات پیش ساخته بود، در ابتدا تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در مورد این اتصالات و همچنین تاریخچه انجام آن‌ها ذکر شده و در ادامه نیز به معرفی انواعی از اتصالات پیش ساخته رایج پرداخته شده است. بعد از

مطالعه این موارد و جهت بررسی هرچه بیشتر اتصالات مذکور، تعدادی از اتصالات پیشنهاد شده توسط پژوهشگران دیگر در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS شبیه سازی شده و بعد از انجام تحلیل نرم افزاری به تشریح نتایج حاصله پرداخته شده است.

مدل سازی در نرم افزار ABAQUS

در میان روش های متداول و موجود در تحلیل سازه ها روش اجزا محدود به عنوان یکی از کامل ترین و قدرتمندترین ابزارها برای تحلیل سازه شناخته شده است. پیشرفت های سال های اخیر در کاربرد روش اجزا محدود باعث شده که مدل سازی و تحلیل هر سازه یا جزئی از آن مانند یک اتصال با شبیه سازی دقیق و نزدیک به واقعیت ممکن گردد.

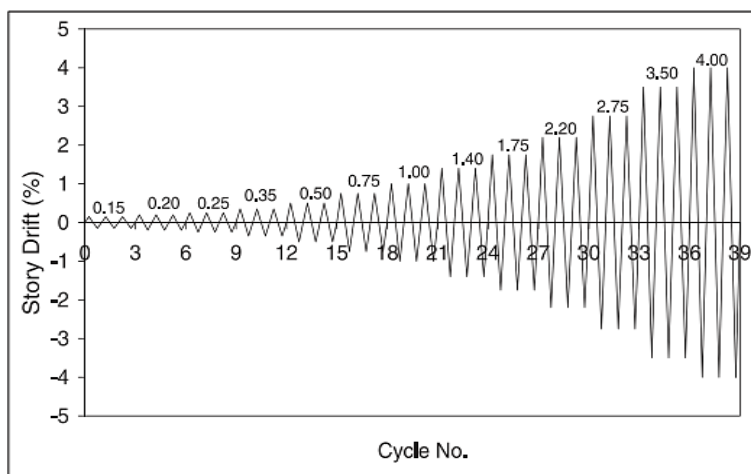
وجود پارامترهای متعدد و تأثیرگذار در سازه های بتنی موجب می شود تا پیش بینی کامل رفتار سازه بدون انجام آزمایش یا تحلیل های دقیق ممکن نبوده یا بسیار دشوار شود. از سویی، امکان انجام آزمایش و بررسی تغییرات هر پارامتر، عملی است که مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است. در حال حاضر با توجه به وجود روش های تحلیل اجزا محدود امکان تحلیل غیرخطی سازه ها با دقت قابل قبول و سرعت بیشتر امکان پذیر بوده و به این ترتیب می توان مقادیر تنش و تغییر شکل را در بخش های مختلف سازه محاسبه کرد. با توجه به مزایای مطرح شده در استفاده از روش اجزاء محدود در این مطالعه به جهت بررسی هرچه بیشتر عملکرد اتصالات بتنی، سه نوع اتصال بتنی پیش ساخته و یکپارچه که در واقع گونه های اصلی و مطرح برای اجرای این نوع اتصالات است در نرم افزار ABAQUS شبیه سازی و تحلیل شده و نتایج حاصله با یکدیگر مقایسه شده است. این اتصالات عبارتند از انواع یکپارچه (a)، پیش ساخته (بتن ریزی در محل ستون b) و پیش ساخته (بتن ریزی در محل تیر c). (شکل ۵)



شکل ۵: اتصالات یکپارچه و پیش ساخته بتنی

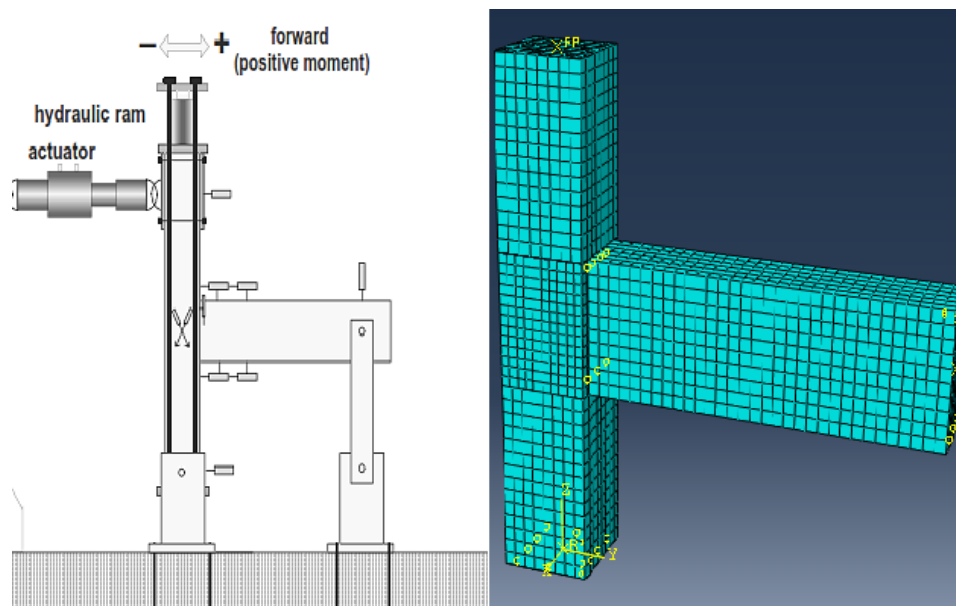
اتصال درجاریز (یکپارچه)

در این پژوهش به جهت مقایسه عملکرد انواع مختلف اتصالات پیش ساخته، نتایج مطالعه Ertas و همکاران [۴] مورد استفاده قرار گرفت. این مطالعه برای بررسی و مقایسه چندین نوع اتصال پیش ساخته مختلف با نمونه درجاریز صورت گرفته است. بارگذاری اعمال شده بر روی این نمونه ها به صورت شکل ۶ می باشد که دقیقاً همین شرایط بارگذاری بر نمونه شبیه سازی شده نیز اعمال شده است.



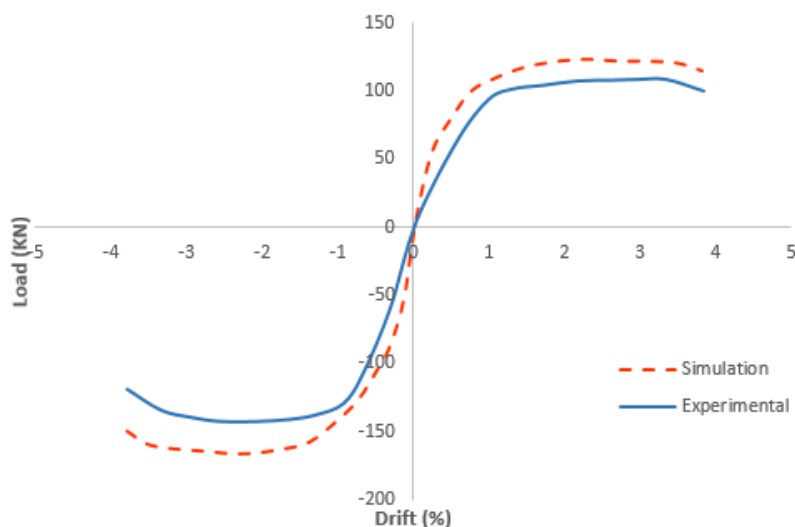
شکل ۶: نمودار بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده بر نمونه درجاریز [۴].

جزئیات آرماتور گذاری و مشخصات مصالح نمونه درجاریزی که در این قسمت شبیه سازی شده دقیقاً مشابه موارد استفاده شده در نمونه واقعی می باشد، به صورتی که آرماتورهای طولی استفاده شده دارای قطر ۲۰ میلی متر و تنش تسلیم ۴۷۲ مگا پاسکال و بتن مورد استفاده نیز دارای مقاومت فشاری ۵۰ مگا پاسکال می باشد. نمای مش بندی شده و همچنین جزئیات جک بارگذاری بر روی این نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: جزئیات جک بارگذاری و شکل مش بندی شده اتصال درجاریز.

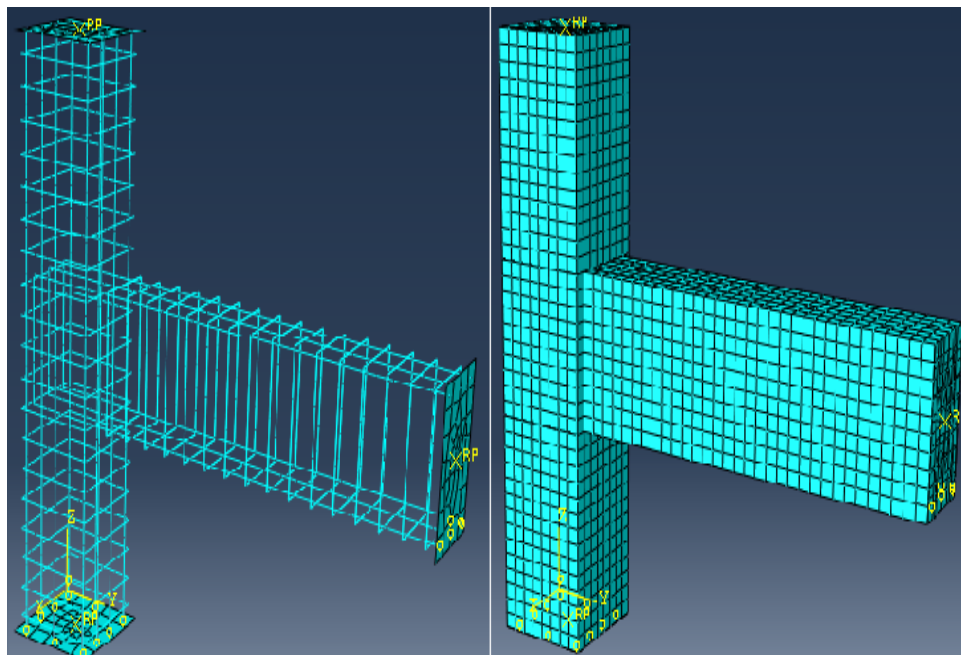
در شبیه سازی اتصال درجاریز [۴] برای اعمال بهتر شرایط تکیه گاهی صفحات صلبی به انتهای تیر و ستون چسبانده شده است و با اختصاص نقطه مرجع به این صفحات صلب، بارگذاری و شرایط مرزی دقیقاً مثل شرایط اعمال شده در آزمایشگاه به این نقاط مرجع نیز اعمال شده است. در شکل ۸ نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نرم افزاری به صورت نمودار پوش استخراج شده و جهت مقایسه هرچه بهتر، در یک دستگاه مختصات رسم شده اند.



شکل ۸: مقایسه نمودار بار - تغییر مکان حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی برای نمونه درجاریز.

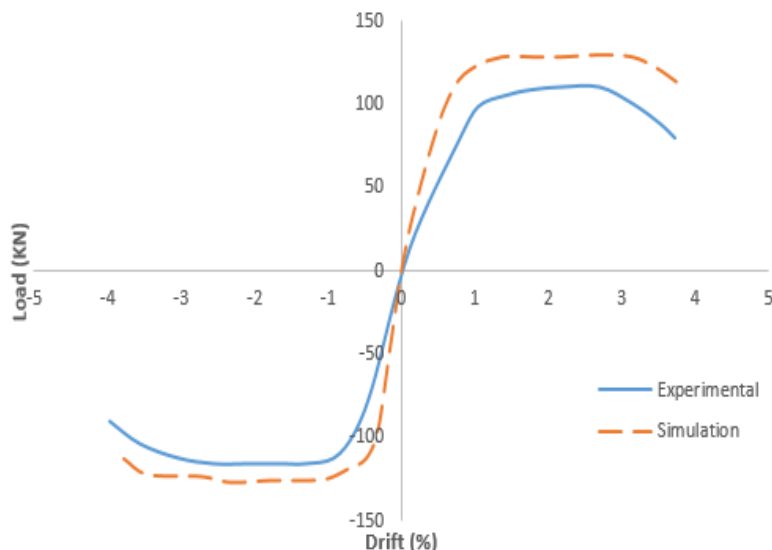
اتصال پیش‌ساخته (بتن‌ریزی در محل گپ ایجاد شده در ارتفاع ستون)

نمونه دیگری که نتایج نرم‌افزاری آن مورد بررسی قرار گرفته، یک اتصال پیش‌ساخته [۴] است که بتن‌ریزی محل اتصال، بین گپ ایجادشده در ارتفاع ستون و انتهای تیر صورت می‌گیرد. شکل ۹ نمای مش بندی شده این اتصال را در نرم‌افزار ABAQUS نشان می‌دهد.



شکل ۹: شکل مش بندی شده اتصال پیش‌ساخته در نرم‌افزار ABAQUS.

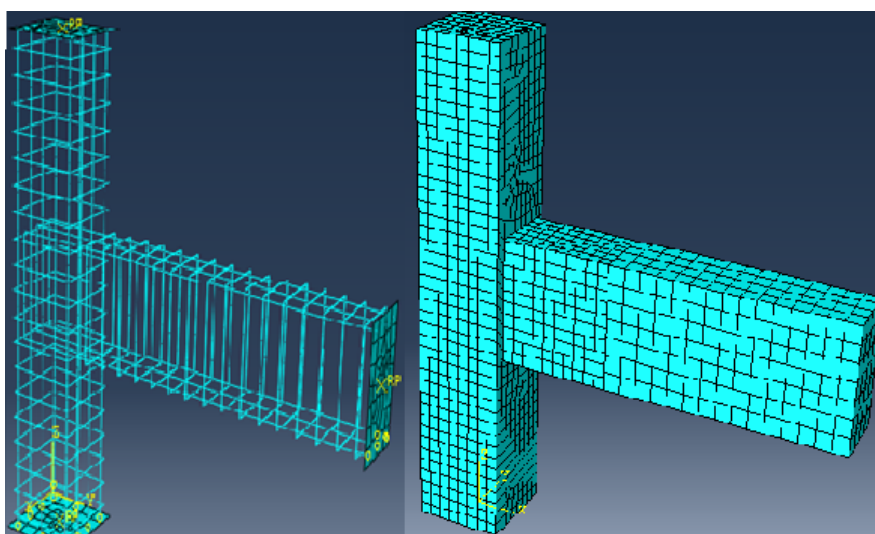
آرماتورهای طولی استفاده شده در این نمونه دارای قطر ۲۰ میلی‌متر و تنش تسلیم ۴۷۲ مگا پاسکال است. بتن مورد استفاده نیز دارای مقاومت فشاری ۵۰ مگا پاسکال می‌باشد. تنها اختلاف این نمونه نسبت به نمونه درجاریز علاوه بر پیش‌ساختگی، تفاوت در تعداد و محل آرماتورهای طولی است. در شکل ۱۰ نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نرم‌افزاری به صورت نمودار پوش برای نمونه پیش‌ساخته استخراج شده و جهت مقایسه هرچه بهتر، در یک دستگاه مختصات رسم شده‌اند.



شکل ۱۰: مقایسه نمودار بار - تغییر مکان حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی برای نمونه پیش‌ساخته.

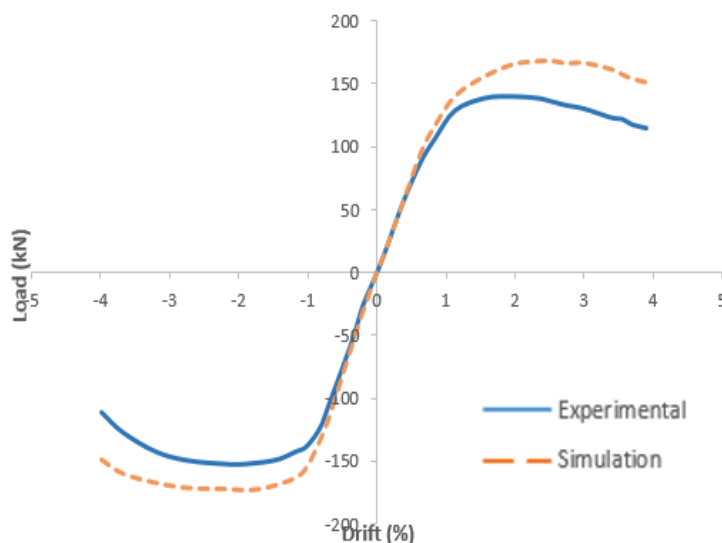
اتصال پیش‌ساخته (بتن‌ریزی در محل گپ ایجاد شده در انتهای تیر)

نمونه سومی که نتایج نرم‌افزاری آن آورده شده است، یک اتصال پیش‌ساخته [۴] است که بتن‌ریزی محل اتصال، بین گپ ایجاد شده در انتهای تیر صورت می‌گیرد. شکل ۱۱ نمای مش بندی شده این اتصال را در نرم‌افزار ABAQUS نشان می‌دهد. ضمناً تمامی مشخصات اتصال از جمله جزئیات آرماتور گذاری مانند نمونه قبلی می‌باشد با این تفاوت که میلگردهای U شکل در انتهای تیر (محل بتن‌ریزی) از قبل تعبیه شده است.



شکل ۱۱: شکل مش بندی شده اتصال پیش‌ساخته در نرم‌افزار ABAQUS.

در شکل ۱۲ نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نرم‌افزاری برای نمونه پیش ساخته (CIPC) به صورت نمودار پوش استخراج شده و جهت مقایسه هر چه بهتر، در یک دستگاه مختصات رسم شده‌اند.



شکل ۱۲: مقایسه نمودار بار - تغییر مکان حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی برای نمونه پیش ساخته.

نتیجه‌گیری

- یکی از عوامل مهم در بررسی اتصالات کارایی آن‌ها است. کارایی اتصال (Z) عبارت است از نسبت لنگر مقاوم نهایی اتصال (M_{II}) به لنگر پلاستیک (M_p). این مقدار برای نمونه یکپارچه به‌عنوان ضعیف‌ترین نمونه از این نظر، محاسبه شده و مقدار آن برابر ۱۰۲٪ است لذا این اتصالات از نظر کارایی مورد تأیید می‌باشند.
- آیین‌نامه ACI در صورتی کارایی اتصال در برابر بار لرزه‌ای را مطلوب فرض می‌کند که شکست در تغییر مکان نسبی بیشتر از ۳٫۵٪ اتفاق افتاده باشد. بر این اساس هر دو نمونه اتصال پیش ساخته و یکپارچه مورد بررسی در این مطالعه از نظر کارایی مورد تأیید آیین‌نامه مذکور هستند.
- مساحت سطح زیر نمودار بار - تغییر مکان برای نمونه پیش ساخته ۱۰ درصد بیشتر از نمونه یکپارچه است بنابراین به نظر می‌رسد اتصال پیش ساخته عملکرد بهتری در رابطه با جذب انرژی داشته باشد.
- با توجه به نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری و مقایسه شیب نمودارهای نیرو- تغییر مکان برای نمونه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که نمونه (CIPB) از نظر کاهش سختی بهترین عملکرد را دارد و نمونه‌های (CIPC) و یکپارچه از این نظر در جایگاه‌های بعدی قرار دارند.
- از نظر نسبت میرایی اتصال که پارامتر مهمی برای توصیف رفتار لرزه‌ای اتصال می‌باشد، نمونه (CIPC) بهترین عملکرد را داشته و نمونه‌های یکپارچه و (CIPB) به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند.
- با استناد به نتایج حاصل شده از این مطالعه می‌توان فهمید که هر سه نوع اتصال مطرح شده از لحاظ پارامترهای مختلف مورد تأیید آیین‌نامه ACI می‌باشند و تنها فاکتور زمان اجرا است که باعث برتری نمونه پیش ساخته نسبت به انواع دیگر می‌شود.

منابع و مراجع

- [۱] Elliot, Kim s; *Precast Concrete Structures*, First Published, Lincarce House, Jordan Hill, Oxford OX۲ ۸DP, ۲۰۰۲.
- [۲] Sochs, Jay E, Ehsani, Mohammad R.; "Moment Resistant Connections in Precast Concrete Frames for Seismic Regions", *Precast/Prestressed Concrete Insitute*, September-October ۱۹۹۳.
- [۳] ظفری نائینی، معین‌الدین؛ مدح‌خوان، مرتضی؛ "مروری بر رفتار اتصالات شکل‌پذیر تیر-ستون در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته"، دومین کنفرانس ملی بتن / ایران، ۱۳۸۹.
- [۴] Ertas, Onur., Sevket, Ozden., Ozturan, Turan.; "Ductile Connections in Precast Concrete Moment Resisting Frames", *PCI JOURNAL*, ۲۰۰۸.
- [۵] Restrepo, J, I., Park, R., Buchanan, A, h.; "Tests on Connections of Earthquake Resisting Precast Reinforced Concrete Perimeter Frames of Buildings", *PCI Journal*, Vol. ۴۰, No. ۴, p. p. ۴۴-۶۱, ۱۹۹۵.
- [۶] Khaloo, A, R., Parastesh, H.; "Cyclic Loading of Ductile Precast Concrete Beam-Column Connection", *ACI Structural Journal*, Vol. ۱۰۰, No. ۳, p. p. ۲۹۱-۲۹۶, ۲۰۰۳.
- [۷] Khaloo, A, R., Parastesh, H.; "Cyclic Loading Response of Simple Moment-Resisting Precast Concrete Beam-Column Connection", *ACI Structural Journal*, Vol. ۱۰۰, No. ۳, p. p. ۴۴۰-۴۴۵, ۲۰۰۳.