



بررسی عملکرد سازه‌های بتنی پیش ساخته تحت بار جانبی در مقایسه با سیستم‌های یکپارچه بتنی

علیرضا خالو، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

حسین پرستش، عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا و دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله ضمن معرفی انواع سیستم‌های سازه‌ای پیش ساخته بتنی، نقاط ضعف و قوت آنها از لحاظ کفایت سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که بکارگیری سیستم‌های قابی شکل در سازه‌های بتنی پیش ساخته بدلیل وجود مشکلات اجرایی و کمی اطلاعات بر روی اتصالات ممان‌گیر کمتر مورد توجه قرار گرفته است، لذا در ادامه ضمن بررسی انواع اتصالات خمشی تیر به ستون پیش ساخته، مزایای فنی و اقتصادی بکارگیری اتصالات خمشی مورد ارزیابی قرار میگیرد. به منظور بررسی اقتصادی دو سیستم قاب خمشی پیش ساخته و بتن درجا، میزان مصالح مصرفی بکار برده شده در یک ساختمان پنج طبقه بر اساس سیستم سازه‌ای مذکور با یکدیگر مقایسه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده سیستم قاب خمشی پیش ساخته از لحاظ رفتار سازه‌ای از قبیل میزان جذب انرژی، شکل پذیری و مقاومت و همچنین میزان مصالح مصرفی در اسکلت ساختمان، قابل رقابت با سیستم یکپارچه با بتن درجا میباشد.

کلید واژه‌ها: بتن پیش ساخته، قاب خمشی، اتصال صلب (ممان‌گیر)، شکل پذیری، تیر، ستون، لرزه خیزی

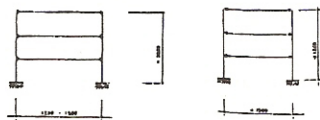
امروزه ساختمان سازی و بویژه مسکن از مشکلات عمده جامعه ماست. از این رو تحقیق و مطالعه در این زمینه از اهمیت خاصی برخوردار است. بتن از جمله مصالحی است که اگر با آگاهی و شناخت خصوصیات آن بکار گرفته شود، از نظر اقتصادی و کاهش وابستگی میتواند مؤثر باشد. هرگاه قطعه ای ساختمانی در جایی غیر از محل اصلی آن ساخته شده و سپس در محل اصلی اش نصب شود، پیش ساخته محسوب میشود. افزایش قابل توجه هزینه عملیات ساختمانی باعث شده تا طراحان به فکر روشهایی برای کاهش این هزینه ها بیفتند. در راستای این هدف روش پیش ساخته در یک قرن اخیر ابداع شده و گسترش یافته است. هم اکنون استفاده از ساختمانهای پیش ساخته در مناطق لرزه خیزی کم یا متوسط بیشتر رواج پیدا کرده است. از مهمترین عوامل مؤثر در بکارگیری ساختمانهای پیش ساخته در مناطق لرزه خیزی زیاد، جزئیات اتصالات، استاندارد شدن قطعات پیش ساخته، ثابت بودن خط تولید و مفاهیم اساسی قاب بندی میباشد. هم اکنون نیز مهمترین مسئله در صنعت پیش ساخته سازی، طراحی و ساخت اتصالاتی است که در برابر نیروها و حرکات مختلفی که توسط بارهای قائم، بارهای دینامیکی، نیروهای ناشی از افت، انقباض و خزش، تغییر درجه حرارت و نیروهای دوره ای مانند باد و زلزله اعمال میشود، مقاومت کند [۱].

مطالعات تحلیلی و تجربی فراوانی بر روی اتصالات بتنی در گذشته صورت گرفته است که تحت بارگذاری متناوب جانبی قرار گرفته اند. اما با وجود اینها تنها تعداد محدودی از این مطالعات بر روی اتصالات بتنی پیش ساخته بوده است. بمنظور گسترش استفاده از ساختمانهای پیش ساخته در مناطق با لرزه خیزی شدید و در رقابت با ساختمانهای بتنی درجا نیاز به بررسی اتصالات بتنی پیش ساخته و بخصوص اتصالات خمشی جهت جذب انرژی حرکت زمین میباشد. بنابر این شناخت رفتار این اتصالات تحت بارهای متناوب جانبی از اهمیت خاصی برخوردار میباشد تا بتوان سازه ای در حاشیه ایمنی مطمئن از نوع پیش ساخته در مناطق لرزه خیز شدید طراحی نمود.

انواع سیستمهای پیش ساخته بتنی

سیستم دیوار باربر

در این گروه از سازه ها، انتقال بارهای ثقلی از طریق قطعات سقف پیش ساخته به دیوارها صورت میگیرد [مطابق شکل ۱]. همچنین مقاومت در برابر بارهای جانبی نیز بمعده دیوارها بوده که بصورت دیوار برشی عمل میکنند. قطعات سقف آنها میتواند در ابعاد و اندازه های مختلف ساخته شوند که مستقیماً بر روی دیوارها قرار میگیرند. کلیه اتصالات از جمله اتصال سقف به دیوار و دیوار به پی، میتواند صلب و یا مفصلی باشد. این سیستم از نظر مقاومت در برابر بارهای جانبی به لحاظ سختی بالای قطعات دیوار هیچ ضعفی را از خود نشان نمیدهد. ولیکن همین مسئله باعث میشود که بخش زیادی از حرکت زمین در زلزله به سازه انتقال پیدا کند و جذب انرژی لرزه ایی این نوع سازه ها فقط در ناحیه اتصالات صورت میگیرد و قطعات دیوار سازه جذب انرژی چندانی ندارد [۱ و ۲].



شکل ۱ - سیستم دیوار باربر پیش ساخته (الف - اتصال مفصلی ب - اتصال صلب)

بطور کلی این گروه را از نظر ابعاد قطعات میتوان به دو دسته تقسیم بندی نمود:

سیستم دیوار باربر متشکل از قطعات بزرگ

در این دسته ابعاد قطعات دیوار و احتمالاً سقف خیلی بزرگ هستند، بطوریکه معمولاً در نمای یک اتاق هیچگونه اتصالی به چشم نمی خورد و اتصالات فقط در گوشه ها هستند و درها و پنجره ها اغلب در داخل قطعات تعبیه میشوند. در این گروه، تعداد قطعات کمتری بکار میرود و تعداد اتصالات نیز کمتر است. از این رو زمان نصب کمتر بوده و ساختمان از نظر سازه ای یکپارچه عمل میکند. ولیکن قطعات پایه قویتر بوده و بدنبال آن هزینه های حمل و نصب افزایش پیدا میکند.

سیستم دیوار باربر متشکل از قطعات کوچک

در این دسته همانطور که از نامش پیداست، قطعات دیوار و سقف نسبتاً کوچک هستند. بطوریکه سقف و دیوارهای جانبی یک اتاق یکپارچه نبوده و از اتصال چند قطعه کوچکتر بوجود می آیند. عرض قطعات کم و حداکثر تا ۲/۵ متر و طول آنها نیز معمولاً به اندازه طول یا ارتفاع اتاق است. بدلیل کوچک بودن قطعات، بلند کردن آنها به سهولت انجام میگردد. همچنین تولید انبوه قطعات و انبار کردن آنها نیز راحت تر است.

سیستم جعبه ای

در این سیستم قطعات پیش ساخته به شکل جعبه یا مکعب مستطیل توخالی هستند که ساختمان مورد نظر از کنار هم قرار گرفتن تعدادی از این جعبه ها معمولاً برابر یک اتاق یا واحد مورد استفاده در ساختمان در نظر گرفته میشود [شکل ۲]. درب و پنجره نیز در داخل قطعه تعبیه میشود. در این روش قطعات خیلی سنگین هستند و نسبت به معماری داخلی نیز حساسند. بطوریکه برای هر معماری خاص باید قطعات ویژه ای ساخته شوند. بدلیل سنگین بودن و بزرگی قطعات، بلند کردن و حمل آنها با مشکلات بیشتری صورت میگیرد. با توجه به کاهش تعداد اتصالات و به حداقل رسیدن آنها، سرعت نصب، یکپارچگی ساختمان و اطمینان سازه ای افزایش پیدا میکند. این نوع سیستم نیز از لحاظ جذب انرژی لرزه ای مانند دیوار باربر بوده و بیشتر حرکت زمین را بخود انتقال میدهد و با توجه به کاهش تعداد اتصالات، جذب انرژی اتصالات نیز کاهش پیدا میکنند [۱].



شکل ۲ - سیستم جعبه ای پیش ساخته

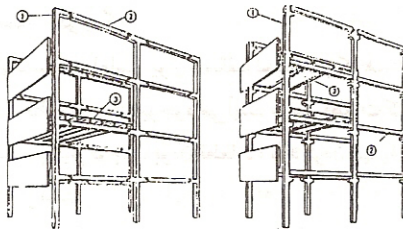
سیستم تیر و ستون

در این ساختمانها، اعضا باربر اصلی قطعات تیر، ستون و سقف هستند. دیوارها اغلب بعنوان نما یا جداکننده مورد استفاده قرار میگیرند. این گروه خود به چند دسته تقسیم می شود [۱]:

ستون یکپارچه

در این دسته از ساختمانها، ستونها بصورت یکپارچه بوده و تیرها به طول دهانه ها ساخته شده و با اتصال صلب یا مفصلی به ستونها وصل میشوند [شکل ۳]. سقفها میتوانند به صورتهای مختلف تخت یا ریبدار باشند. برای اتصال تیر و ستون، یکی از محلهای مناسب جایی است که لنگر خمشی بر روی تیر صفر و یا حداقل باشد. یعنی قسمتی از تیر تا محلی که لنگر خمشی به صفر میرسد، با ستون یکپارچه ساخته میشود. این روش به روش "لامپدا" معروف است و دیوارها نقش سازه ای ندارند و بعنوان نما یا جداکننده عمل میکنند. بطور کلی اجرای ساختمانهای پیش ساخته با ستونهای یکپارچه تا ارتفاع ۳۰ متر مشکل

خاصی ندارد، ولی برای ارتفاع بیشتر از این، وزن ستون و همچنین نیروهای داخلی در هنگام حمل و نصب آن زیاد میشود. این روش برای ساختمانهای ۴ و ۵ طبقه خیلی مفید میباشد، زیرا وزن و طول ستونها در حد معقول است و بلند کردن، حمل و نصب آنها مشکل زیادی ندارد. اگر اندازه دهانه ها بزرگ باشد، وزن قطعات تیر و ستون تقریباً مساوی میشوند و این ویژگی یک امتیاز برای اجرای این نوع ساختمان پیش ساخته محسوب میشود. در صورتی که ارتفاع ساختمان از ۴ تا ۵ طبقه بیشتر میشود، یا طول دهانه های تیرها کوچک میشود، این روش کارایی خود را از دست میدهد.



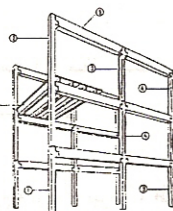
ب

الف

شکل ۳- الف - سیستم ستون یکپارچه پیش ساخته ب - روش لامبدا (۱- ستون ۲- تیر ۳- سقف)

ستون مجزا

در این سیستم، ارتفاع ستونها برابر ارتفاع یک یا دو طبقه ساختمان در نظر گرفته میشود. بنابراین در هر طبقه یا هر دو طبقه اتصال ستون به ستون وجود دارد [شکل ۴]. در این دسته، سقف، دیوار و تیر همانند بخش قبل بوده و این روش برای ساختمانهای به ارتفاع ۱۰ تا ۶۰ متر مناسب است. قطعات اغلب سبک و ابعاد آنها نسبتاً کوچک است. همچنین وزن و ابعاد قطعات تیر و ستون اختلاف زیادی با یکدیگر ندارد که در مجموع بلند کردن و حمل و نصب این قطعات به راحتی انجام میگردد. بلحاظ کوچک بودن طول قطعات، تعداد زیادی از قطعات در ساختمان بکار برده میشود که خود به خود زیاد شدن تعداد اتصالات و افزایش زمان نصب و افزایش هزینه و نیروی انسانی لازم را نیز بدنبال دارد. اتصال تیر به ستون که از مهمترین اتصالات این سیستم میباشد میتواند صلب یا مفصلی باشد. کاربرد اتصال مفصلی به مقدار زیادی سهولت اجرایی بهمراه دارد. اما یک سیستم مقاوم جانبی لازم است.



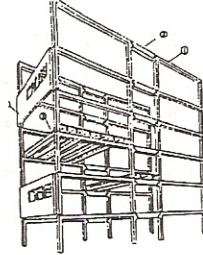
شکل ۴- سیستم ستون مجزا پیش ساخته با اتصال مفصلی

(۱- ستون خارجی یک طبقه ۲- ستون دو طبقه خارجی ۳- ستون داخلی یک طبقه ۴- ستون داخلی دو طبقه ۵- تیر ۶- سقف)

قاب پرتال

در این سیستم از قطعات یکپارچه L، T، و TT و ... استفاده میشود. در ساختمانهای صنعتی و سوله ها نیز از قطعات به شکل Y و ... استفاده میشود [شکل ۵]. این روش برای ساختمانهای بلندتر از ۴ و ۵ طبقه نسبت به سیستمهای قبلی از جهت

آنکه تعداد قطعات و در نتیجه تعداد اتصال کمتر است، برتری دارد. البته قطعات از دو سیستم قبلی سنگین تر هستند و بلند کردن و حمل آنها نیز مشکلتر است، زیرا قطعات به صورت مستقیم در یک امتداد نیستند ولی یکپارچگی سازه ای اسکلت ساختمان بیشتر و مطمئن تر است. در این روش نیز میتوان قطعات را طوری طراحی کرد که اتصالات در تیر و ستون در محل لنگر خمشی صفر قرار گیرد. با توجه به اینکه اتصال تیر به ستون بصورت یکپارچه است، و در موقع نصب هیچگونه اتصال تیر به ستون اجرا نمیشود، اطمینان سازه ای در این سیستم بیشتر است.



شکل ۵- سیستم قاب پرتال پیش ساخته (۱- قاب پرتال ۲- تیر ۳- سقف ۴- دیوارهای پیش ساخته با پنجره)

سیستم دال ستون

در این گروه از ساختمانهای پیش ساخته، از تیر استفاده نمیشود و دالهای سقف روی ستون تکیه میکنند. این گروه از نظر اتصال دال و ستون نیز به دو گروه تقسیم بندی میشود. در گروه اول ستونها بصورت یکپارچه و ممتد ساخته میشوند و قطعات سقف یکپارچه روی ستونها تکیه میکنند. ابعاد سقف در هر طرف حداقل به اندازه دهانه همان طرف است. از مشکلات این دسته سنگینی و ابعاد بزرگ سقفها است که بلند کردن و حمل و نصب آنها را دشوار میکند. در حالی که در گروه دوم سقف و ستون بصورت یکپارچه ساخته میشوند و با کنار هم قرار گرفتن این قطعات، دهانه های مورد نظر پوشیده میشود. بتن ریزی و حمل این قطعات از سایر انواع قطعات پیش ساخته مشکل تر است. همچنین قطعات سنگین هستند و بیشتر برای ساختمانهای یک طبقه مناسب هستند و سرعت نصب آنها زیاد است. یک راه برای سبک تر کردن قطعات، کوچکتر کردن دال یکپارچه با ستون و اضافه کردن دالهای میانی است. برای دهانه های بزرگ این کار اجتناب ناپذیر است. اما تعداد اتصالات بیشتر شده و در نتیجه یکپارچگی ساختمان کمتر میشود.

اتصال تیر به ستون

در سیستم تیر و ستون اتصالات به سه دسته کلی تقسیم میشوند: صلب، نیمه صلب و مفصلی. اتصالات صلب در قابهایی بکار میروند که به منظور تحمل بار جانبی ناشی از زلزله و یا باد، طراحی میشوند. اتصالات نیمه صلب و مفصلی بیشتر برای تحمل بارهای ثقلی و یا قائم استفاده میشوند. با توجه به اهمیت بارهای جانبی در مناطق لرزه خیز، سازه های پیش ساخته بتنی در این مناطق نیاز به اتصالات صلب دارند. و این اتصالات باید از مقاومت و شکل پذیری مناسبی برخوردار باشند. به همین منظور باید شرایط زیر برای اتصالات صلب تیر به ستون در قابهای شکل پذیر در برابر زلزله

برقرار باشد:

- در هر امتداد باید مقاومت خمشی ستونها از مقاومت خمشی تیرها بیشتر باشد. این ویژگی باعث میشود که گسیختگی در تیرها قبل از ستونها رخ دهد.

- ظرفیت برشی اتصال باید بیشتر از ظرفیت خمشی تیر باشد تا مفصل پلاستیک قبل از شکست برشی ایجاد شود.

- ظرفیت شکل پذیری خمشی اتصال باید برای رفتار غیرالاستیک سازه کافی باشد. برای قابهای بتنی مسطح شکل پذیر، ضروری است که میزان شکل پذیری خمشی اتصال سه برابر شکل پذیری تغییر مکان سازه باشد [۴ و ۳].

اتصالات صلب می‌تواند به دو صورت خشک یا تر اجرا شوند. تا زمانی که آزمایشهای دقیقی بر روی اتصالات خشک صلب (جوش یا پیچ و مهره) در قابهای شکل پذیر خمشی انجام نشده، بیشتر اتصالات از نوع بتن درجا (تر) ساخته میشوند. با توجه به اینکه اتصالات تر زمان اجرا را افزایش میدهد، لذا در صورتی که اتصال خشکی از دقت و مقاومت کافی برخوردار باشد و در بررسی‌های تحلیلی و تجربی با موفقیت ظاهر شود در ساختمانهای بتنی پیش ساخته از اولویت خاصی برخوردار خواهد بود. در طراحی اتصالات تیر به ستون در ساختمانهای بتنی پیش ساخته، معیارهای طراحی و اجرایی حائز اهمیت هستند. در ذیل به تعدادی از معیارهای اصلی اشاره شده است:

- مقاومت، یک اتصال باید بتواند کلیه نیروهایی را که در طول مدت عمرش بر آن وارد میشود، تحمل کند.

- شکل پذیری، شکل پذیری معمولاً بعنوان قابلیت پذیرش تغییر شکلهای بزرگ بدون کاهش عمده در باربری و بدون گسیختگی تعریف میشود. در قابهای ساختمانی، شکل پذیری به مقاومت خمشی وابسته است.

- هماهنگی با تغییرات حجم، اگر اتصالات قطعات پیش ساخته بگونه‌ای باشد که از حرکت و تغییر حجم قطعه جلوگیری کند. کوتاه شدن طول قطعه در اثر خزش، انقباض و درجه حرارت باعث ایجاد تنشهای بزرگ در تکیه گاههای قطعات میشود. بنابر این باید این تنشها در طراحی آنها منظور گردد. البته بهتر است اتصال طوری طرح شود که امکان مقداری جابجایی را فراهم کند تا اینکه مقداری از این تنشها کاهش یابد. اینگونه اتصالات در مواردی که اتصال بصورت مفصلی و یا حتی غلتکی است مطرح میشود. در اتصالات ممانگیر، با پخش لنگر این اثر در کل المانهای قاب توزیع شده و از حساسیت کمتری برخوردار است.

- دوام، دوام قطعات بتنی پیش ساخته معمولاً با قابلیت خوردگی اجزاء فولادی بدون پوشش و ترک خوردگی و پوسته شدن بتن ارزیابی میشود. اتصالاتی که در معرض هوا قرار دارند، باید اجزای فولادی آنها به اندازه کافی با بتن پوشش داده شوند و یا رنگ و گالوانیزه شوند.

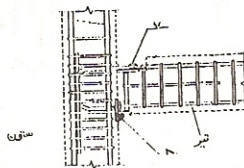
- سهولت ساخت، بیشترین صرفه اقتصادی ساختمانهای پیش ساخته و پیش تنیده وقتی حاصل میشود که اتصالات آنها ساده بوده و اجرا و نصب آنها پراحتی صورت گیرد. بعلاوه کنترل اتصالات پیچیده مشکل است و از نظر جفت شدن با قسمتهای دیگر سازه‌ای در کارگاه مشکلات اجرایی را به همراه دارد. بهمین منظور نکات لازم جهت بهبود بخشیدن به سهولت ساخت یک اتصال بتنی پیش ساخته ضروری میباشد [۲].

با توجه به اهمیت قابهای خمشی پیش ساخته در کاربرد سازه های بتنی در نواحی با لرزه خیزی بالا، اتصالات صلب تیر به ستون در میزان شکل پذیری و جذب انرژی این نوع سازه ها نقش به سزایی دارد. به همین منظور و در ادامه به بررسی چند اتصال صلب تیر به ستون می‌پردازیم.

اتصال صلب تیر به ستون

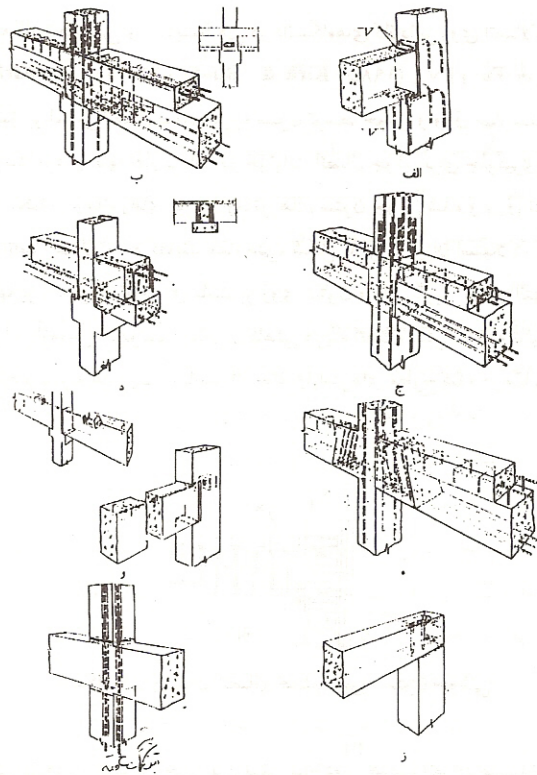
با توجه به ضرورت تهیه دستورالعمل طراحی مدون برای سازه های پیش ساخته بتنی یک پروژه تحقیقاتی کاربردی توسط آئین نامه^(۱) ATC بر روی طراحی ساختمانهای بتنی پیش ساخته تحت بارهای ناشی از زمین لرزه در سال ۱۹۸۱ برای تعیین

طی دهه ۹۰ میلادی سه کار تحقیقاتی و آزمایشگاهی در دانشگاه‌های کانادا بر روی اتصالات بتنی پیش ساخته جوشی به ترتیب توسط Kirk & Pillai (۱۹۸۱) [۶] و Kirk & Bhatt (۱۹۸۵) [۷] و Sekin & Fu (۱۹۹۰) [۸] صورت پذیرفت. اصول کار سه تحقیق بر اساس اتصال صلب تیر به ستون توسط جوش و ورق مهار شده در بتن میباشد [شکل ۶]. دو مطالعه اول و دوم در یک راستا بوده و تنها تفاوت آنها در جزئیات اتصال جوش برای جلوگیری از شکست جوش در مطالعات بوده است. بطوریکه در این مطالعه آرماتورهای تیر به آرماتورهای ستون جوش شده و ورق تیر به ورق انتهایی ستون جوش میشوند. در این مطالعات، اتصالات از لحاظ کفایت مقاومتی، شکل پذیری، میزان استهلاک انرژی و پیوستگی اتصال مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایشها بر اساس بار محوری ثابت بر روی ستون و بار تناوبی در دو انتهای تیر صورت پذیر است. بر اساس نتایج بدست آمده از این آزمایش سهولت اجرایی و کاهش هزینه اتصال پیش ساخته تاثیر کافی بر روی مقاومت اتصال در برابر بار تناوبی جانبی دارد و نمونه های پیش ساخته از لحاظ پارامترهای مطرح شده در مقایسه با نمونه یکپارچه بهتر رفتار می کنند.



شکل ۶- جزئیات اتصال خمشی تیر به ستون جوشی

طی یک برنامه تحقیقاتی پر هزینه توسط انجمن بتن پیش ساخته^(۱) هشت اتصال صلب تیر به ستون توسط Stanton همکارانش در دانشگاه واشنگتن تا سال ۱۹۸۶ مورد مطالعه و آزمایش قرار گرفت [۹]. هدف از این برنامه تحقیقاتی گسترده ارزیابی روشهای مختلف اتصال تیر به ستون پیش ساخته بر اساس ملاحظات اقتصادی و طراحی بوده است. جزئیات هشت اتصال صلب در شکل ۷ نشان داده شده است. اتصال شکل (۷-د) امکان اجرای ستون بطور یکپارچه وجود داشته و ستونها در محل اتصال دارای کرپلهای بتنی مسلح بوده و تیرها از طریق صفحات زیرسری به نبشی هایی که در لبه زیانه نصب شده، جوش میشوند. فولادهای لنگر منفی تیرها با استفاده از غلافها و میلگردهای انتظاری که در ستون از پیش تعیین شده است، عبور داده میشود. از مزایای این سیستم میتوان به اجرای یکپارچه چند طبقه ستون با یکدیگر و اقتصادی بودن آن اشاره نمود که نمونه عملی از میزان مصالح مصرفی سازه پیش ساخته با این نوع اتصال در مقایسه با سازه بتنی یکپارچه در بخش بعدی مورد بررسی قرار میگردد. بر اساس نتایج بدست آمده بر روی رفتار این نوع اتصال تحت بارگذاری تناوبی میتوان به ظرفیت خمشی مثبت و منفی اتصال و میزان شکل پذیری و جذب انرژی خوب آن در مقایسه با سیستم یکپارچه اشاره نمود.



شکل (۷) - هشت اتصال صلب تیر به ستون ارائه شده توسط انجمن بتن پیش ساخته (PCI)

اتصالاتی صلب مورد بررسی در کمیته PCI نشان می‌دهد که از نظر رفتار سازه‌ای در مناطق با لرزه خیزی بالا به خوبی می‌تواند انرژی ناشی از حرکت زمین را در خود مستهلک نماید. لیکن با توجه به این که بیشتر اتصالات صلب ارائه شده از نوع اتصال تر می‌باشد، همین موضوع کاهش سرعت اجرایی ساختمان پیش ساخته را به همراه دارد که باید در ملاحظات اقتصادی پروژه‌های پیش ساخته به آن توجه شود.

تحلیل اقتصادی سیستم تیر و ستون

به منظور مقایسه اقتصادی سیستم تیر و ستون با اتصال صلب و مفصلی در مقایسه با سیستم سازه‌ای یکپارچه، یک ساختمان پنج طبقه مطابق پلان محور بندی نشان داده شده در شکل ۸ تحت سه سیستم سازه‌ای مذکور مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات ساختمان از لحاظ نوع کاربری، مسکونی بوده و محل احداث در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی بالا در نظر گرفته شده است. طی بررسی‌های صورت گرفته، میزان مصالح مصرفی این سه سیستم از نظر مقدار فولاد و بتن مصرفی در هر متر مربع زیربنا در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در سیستم مفصلی پیش ساخته، مهار جانبی سازه توسط باد بند فلزی تأمین می‌شود.

- [1] Martin L.D., and Korosz W.J., "Connections for Precast Prestressed Concrete Building Including Earthquake Resistance "PCI Technical Report No. 2, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, March 1988
- [2] "PCI Design Handbook, Precast and Prestressed Concrete " Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1992
- [3] Clough D.P., "Design of Connections for Precast Prestressed Concrete Building for the Effects of Earthquake "PCI Technical Report No. 5, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, March 1985
- [4] Bull D.K., and Park R., "Seismic Resistance of Frames incorporating Precast Prestressed Concrete Beam Sheels" PCI Journal, V. 31, NO. 4, July - August 1986
- [5] Applied Technology Council "Design of Prefabricated Concrete Building for Earthquake Loads" Berkely, CA 1981
- [6] Pillai, S.U, Kirk, D.W., "Ductile Beam - Column Connection in Precast Concrete" ACI Journal, V. 78, No. 6, November - December 1981, PP. 480 - 487
- [7] Bhatt, P. and Kirk, D.W "Test on Improved Beam - Column Connection for Precast Concrete", ACI Journal, V .82, No. 6, November - December 1985, PP. 834 - 843
- [8] Seckin, M. and Fu, H.C. "Beam - Column Connections in Precast Reinforced Concrete Construction, " ACI Structural Journal, V. 87, No. 3, May - June 1990, PP. 252 - 261
- [9] Stanton, J.F., Anderson, R.G, Dolan, C.W., and Mceleary, D.E. "Moment Resistant Connections and Simple Connections," Research Project No. 1/4 Prestressed Concrete Institute, Chicago, Illinois, 1986