

بررسی تاثیر حذف ستون بر وقوع خرابی پیش‌رونده در قاب‌های بتن مسلح

مهسا تعاونی طارم‌سری، علی معصومی*، سید حسین حسینی لواسانی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۴ آبان ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۶ آذر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۹ آذر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

خرابی پیش‌رونده
قاب خمشی
عملکرد زنجیره‌ای
مسیر بار جایگزین

چکیده: خرابی پیش‌رونده به دنبال حوادث ناگهانی که باعث آسیب جزئی و موضعی سازه می‌شود، اتفاق می‌افتد. عدم توانایی اعضای مجاور عضو آسیب‌دیده در بازتوزیع اضافه بار ناشی از حذف عضو باعث می‌شود خرابی به صورت زنجیروار در جهت عمودی و افقی گسترش یابد تا این که به خرابی موضعی گسترده یا کلی سازه منتج شود. وجود مسیرهای بار جایگزین برای انتقال اضافه بار ناشی از حذف عضو اهمیت ویژه‌ای دارد بنابراین از جمله روش‌های متداول آیین نامه‌ای در تحلیل خرابی پیش‌رونده روش مسیر بار جایگزین است؛ در این پژوهش چگونگی وقوع خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی بتن مسلح با استفاده از روش تحلیل مسیر بار جایگزین و نحوه شکل‌گیری عملکرد زنجیره‌ای به منظور انتقال اضافه بار ایجاد شده بر اثر حذف عضو کلیدی، بررسی شده است. با بررسی جابه‌جایی قائم در محل عضو محذوف تحت سناریوهای متفاوت حذف عضو و دوران انتهای تیرهای مجاور عضو آسیب‌دیده ملاحظه شد که پتانسیل خرابی پیش‌رونده در قاب‌ها وابسته به محل قرارگیری ستون یا عضو محذوف است. پتانسیل خرابی بر اثر حذف ستون گوشه چه در طبقات بالا و چه در طبقات پایینی زیاد است و جابه‌جایی بیشتری ایجاد میکند؛ همچنین اگر ستون یا عضو کلیدی در طبقات بالاتر حذف شود مقدار جابه‌جایی بیشتر خواهد بود که دلیل آن وجود مسیرهای بار جایگزین کمتر است به عبارت دیگر اعضای کمتری در جذب انرژی جنبشی ناشی از حذف عضو دخیل می‌شوند. وجود نامنظمی در ساختار سازه باعث توزیع غیریکنواخت نیرو در اعضای باقیمانده و پاسخ‌های سازه‌های شدیدتر نسبت به حذف عضو کلیدی می‌شود.

۱- مقدمه

خرابی پیش‌رونده به دنبال یک آسیب جزئی و موضعی ناشی از وقوع یک بار ناگهانی تشکیل می‌شود. هنگامیکه آسیب دیدگی فراتر از آن است که پیوستگی و قابلیت شکل‌پذیری سازه تحمل کند؛ خرابی به صورت زنجیروار در جهت عمودی و افقی گسترش می‌یابد تا این که به خرابی موضعی گسترده یا کلی سازه منتج شود این گونه است که خرابی تناسبی با آسیب موضعی اولیه نخواهد داشت. بررسی و مطالعه عملکرد سازه در برابر خرابی پیش‌رونده و همچنین دیدگاه آیین‌نامه‌های طراحی با وقوع حادثه ۱۱ سپتامبر برج‌های تجارت جهانی دچار تحولات زیادی شد [۱]. در بحث طراحی سازه توجه به افزایش درجه نامعینی برای ایجاد مسیرهای بار متعدد جهت مقابله با خرابی پیش‌رونده از اهمیت بالایی برخوردار است. سازه‌های با مشخصه افزونگی^۱ بالا که ناشی از درجه نامعینی بالای این سازه‌ها است خرابی جزئی اولیه را به خوبی تحمل می‌کنند در مقابل سازه‌ها با دهانه‌های بزرگ، دیوارهای باربر یا دال‌های بتنی پیش‌ساخته و کف‌های فولادی متکی بر دیوارهای بتنی در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب پذیرند چرا که از شکل‌پذیری و پیوستگی کافی برخوردار نیستند. یکی از مکانیزم‌های کلیدی برای به تعادل رسیدن

سازه آسیب‌دیده عملکرد زنجیره‌ای است. این روش توصیف کننده توسعه نیروی کششی در دال و تیرها به علت تغییر شکل ناشی از آسیب دیدن عضو تکیه‌گاهی است. ظرفیت دورانی اتصالات و همچنین ظرفیت کششی بالا در عملکرد زنجیره‌ای حائز اهمیت است [۲].

با توجه به موارد ذکر شده آیین‌نامه‌ها برای بررسی وقوع خرابی و طراحی سازه‌ها در برابر خرابی پیش‌رونده روش تحلیل مسیر بار جایگزین^۲ را پیشنهاد می‌کنند. در این روش عضو کلیدی (ستون یا دیوار باربر) به صورت ناگهانی حذف می‌شود. تمامی ساختمان‌ها با درجات متفاوتی از خطر در معرض وقوع خرابی پیش‌رونده قرار دارند به همین جهت در سال‌های اخیر توجه به این مسئله در آیین‌نامه‌های طراحی و جامعه مهندسين به چشم می‌خورد. از جمله پژوهش‌هایی که در زمینه خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتنی صورت گرفته است میتوان به مواردی که در ادامه می‌آید، اشاره کرد: در سال ۲۰۱۱ با استفاده از سازه‌هایی با ابعاد واقعی و مدلسازی عددی، در زمینه خرابی پیش‌رونده سازه‌های بتنی پیش ساخته آزمایش‌هایی انجام شده است [۳]. در سال ۲۰۱۳ با مدلسازی عددی، آسیب‌پذیری سازه‌های بتنی در برابر خرابی پیش‌رونده ارزیابی شده است. همچنین در بررسی سناریوهای متفاوت حذف ستون و تاثیر آن بر خرابی پیش‌رونده سازه‌های

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: massumi@khu.ac.ir

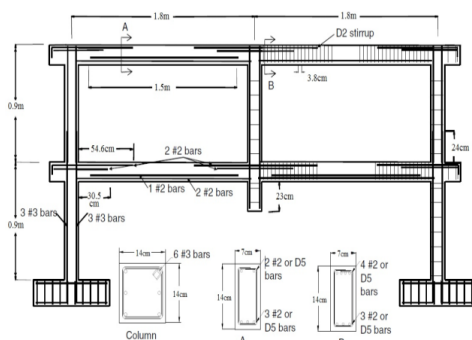
۲- صحت سنجی نرم افزار

به منظور صحت سنجی روش تحلیل یک مدل آزمایشگاهی که با مقیاس ۴:۱ ساخته شده، استفاده شده است [۷ و ۸]. شکل ۱ نمای کلی این مدل و جزئیات آرماتورگذاری را نشان می دهد. قاب انتخابی از یک ساختمان ۶ طبقه با ابعاد دهانه ۶×۳ متر است. طبق آزمایش استاتیکی انجام شده روی این مدل، قاب دو بعدی به دلیل عدم وجود رفتار غشایی دال در توزیع نیروی کششی توانایی تحمل کل بار ثقلی پیشنهادی آیین نامه را ندارد، بنابراین درصدی از این بار به صورت افزایشی به قاب اعمال میشود. ترکیب بار ثقلی پیشنهادی آیین نامه های طراحی خرابی پیش رونده در رابطه ۱ آمده است [۱۹].

$$G=1.2DL+0.5LL \quad (1)$$

DL: بار مرده

LL: بار زنده



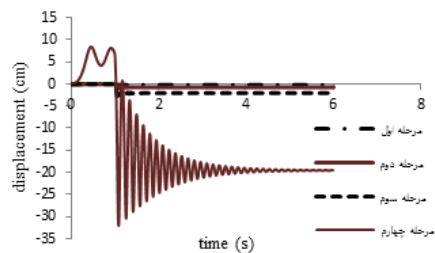
شکل ۱: مدل آزمایشگاهی قاب خمشی بتن مسلح [۱۸]

Fig. 1. Reinforcement design of test specimens

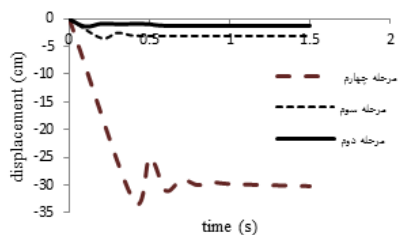
زمان حذف ستون برابر ۰/۱ پرید ارتعاش سازه مربوط به مود حرکت قائم دهانه بالای ستون یا دیوار باربر حذف شده، در نظر گرفته شده است [۱۹ و ۲۰]. همچنین مطابق نمونه آزمایشگاهی در اتمام هر مرحله قاب به موقعیت اولیه بازگردانده و خرابی های حاصل از مرحله قبل به صورت پیش فرض در هر مرحله بارگذاری اعمال شده است. طبق مشاهدات تجربی بار توسط ظرفیت خمشی قاب تحمل می شود تا زمانی که مفاصل پلاستیک در تیرهای متصل به ستون محذوف تشکیل شوند، سپس آرماتورها دچار شکست شده و ظرفیت باربری قاب از بین می رود در این حالت عملکرد زنجیره ای از تخریب آنی قاب جلوگیری می کند. در تحلیل نرم افزاری خرابی حاصل از مرحله قبل بارگذاری به صورت تشکیل مفاصل پلاستیک به تیرهای قاب اعمال شده است. برای قاب نسبت میرایی ۰/۵ لحاظ شده است. مقدار بار اعمالی به قاب در هر مرحله و خصوصیات مصالح به ترتیب در جدول ۲ و جدول ۱ آمده است.

بتنی پژوهش هایی صورت گرفته است [۴ و ۵]. با مدلسازی آزمایشگاهی قاب خمشی بتن مسلح، نحوه پیشروی خرابی در جریان حذف ستون و شکل گیری مکانیزم های مقابله کننده با خرابی از جمله عملکرد خمشی، فشاری و زنجیره ای بررسی شده است [۶-۹]. از بین پژوهش های آزمایشگاهی انجام شده در سال ۲۰۱۷ میتوان به مدلسازی دو قاب بتن مسلح ویژه و معمولی با مقیاس ۱:۴ اشاره کرد. در پژوهش یادشده، اثر جزئیات تسلیح بتن بر رفتار قاب در برابر خرابی، بررسی شده است. مطابق نتایج این پژوهش مقدار نیرویی که باعث خرابی قاب خمشی بتن مسلح ویژه می شود، ۱۸٪ بیشتر از قاب معمولی است و قاب ویژه ۱/۳ برابر جذب انرژی بیشتری دارد. پیوستگی آرماتورها در محل اتصال، توزیع تنش در میلگردهای دال را بهبود میبخشد. همچنین فواصل کم خاموت ها در قاب ویژه، تغییر شکل برشی را کاهش داده و مشارکت مؤثر میلگردهای پایینی تیر را به همراه خواهد داشت. خرابی قاب با شکل گیری مفاصل پلاستیک آغاز میشود و با مکانیزم زنجیری پایان می یابد [۱۰]. پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۷، با مدلسازی قاب های دو بعدی، روش جدیدی معرفی میکند که برخلاف روش های سنتی، مانند پوشدان، اثرات و خرابی حاصل از بار سرویس پیش از حذف ستون را لحاظ می کند. در این پژوهش ضمن ارائه معیارهای خرابی خمشی، برشی و محوری، الگوریتمی تعریف می شود که با ترکیب معیارهای فوق، حذف المان و نحوه خرابی مستقیم یا چرخشی را تشخیص می دهد؛ همچنین این روش ضربه ناشی از تخریب اعضای فوقانی را در نظر میگیرد. پژوهش یادشده، در نهایت با ذکر مثال های عددی متعدد، نشان داده است که روش معرفی شده در تشخیص توالی خرابی اعضا و خرابی قاب دو بعدی، تحت سناریوهای متفاوت حذف ستون، کاربردی است. در این تحقیق نیز با ذکر مثال عددی، پیشروی خرابی در قاب بتنی ویژه و معمولی و نحوه خرابی اعضای دهانه متصل به ستون حذف شده، بررسی شده است [۱۱ و ۱۲]. علاوه بر موارد فوق تاثیر طرح لرزه ای سازه ها بر عملکرد مناسب آنها در برابر خرابی پیش رونده و معرفی شاخص هایی جهت ارزیابی وقوع یا عدم وقوع خرابی در جریان حذف عضو کلیدی سازه ها، در مطالعات اخیر به چشم می خورد [۱۳-۱۸].

در پژوهش حاضر سعی شده است که چگونگی وقوع خرابی پیش رونده در قاب های خمشی بتن مسلح با استفاده از روش تحلیل مسیر بار جایگزین و نحوه شکل گیری عملکرد زنجیره ای به منظور انتقال اضافه بار ایجاد شده بر اثر حذف عضو کلیدی، مورد بررسی قرار گیرد. جابه جایی قائم در محل عضو محذوف تحت سناریوهای متفاوت حذفی و دوران انتهای تیرهای مجاور عضو آسیب دیده بررسی شده است. به منظور صحت سنجی روش تحلیل مورد استفاده یک نمونه قاب خمشی که قبلا در آزمایشگاه مورد ارزیابی خرابی پیش رونده قرار گرفته است در نرم افزار سپ^۱ مدل شده و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی روش مسیر بار جایگزین، روی آن انجام شده است.



الف - تحلیل نرم افزاری



ب - آزمایشگاه

شکل ۲: تاریخچه زمانی جابه‌جایی قائم گره عضو محذوف

Fig. 2. Time-vertical displacement diagram of joint above the removed column

مقادیر بزرگ جابه‌جایی در گام ۴ تحلیل و آزمایش دینامیکی، نشان دهنده وارد شدن قاب به فاز عملکرد زنجیره‌ای است. یکی از مکانیزم‌های کلیدی و متعادل کننده در مقابله با خرابی پیش‌رونده عملکرد زنجیره‌ای است که به توانایی تیرها در مقابله با نیروهای قائم و شکل‌پذیری قاب بستگی دارد تا یکپارچگی لازم برای توسعه نیروهای زنجیره‌ای تامین شود. هنگامی که ظرفیت خمشی تیرها توانایی مقابله با جابه‌جایی‌های قائم بزرگ را نداشته باشد عملکرد زنجیره‌ای شکل می‌گیرد. طبق مشاهدات آزمایشگاهی نقطه عطفی^۱ وجود دارد که با افزایش اندک نیرو مکانیزم قوسی فشاری به مکانیزم زنجیره‌ای با جابه‌جایی‌های بزرگ تبدیل می‌شود. مقایسه نتایج در جدول ۳ نشان می‌دهد که اختلاف روش تحلیلی و آزمایشگاهی در جابه‌جایی دینامیکی بیشینه و استاتیکی باقیمانده، اندک است. جابه‌جایی قائم به‌عنوان یکی از نشانه‌ها و معیارهای اصلی تشخیص شروع و گسترش خرابی پیش‌رونده مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۱: مراحل بارگذاری دینامیکی

Table. 1. Applied dynamic load

مقدار بار (kN)	مرحله بارگذاری
۱۴/۴	۱
۱۴/۴	۲
۲۱/۴	۳
۲۴/۶	۴

مشاهده‌های تجربی و تحلیل نرم‌افزاری نشان می‌دهد که در گام ۱، ۲ و ۳ بارگذاری قاب در فاز فشاری - خمشی باقی می‌ماند، به عبارتی قیدهای پیرامونی و اتصالات خمشی اضافه بار ناشی از حذف عضو میانی را توزیع می‌کنند و با تشکیل مفاصل پلاستیک قاب دچار خرابی پیش‌رونده نمی‌شود اما در گام ۴ بارگذاری، افزایش ناگهانی در جابه‌جایی قائم گره اتصال ستون محذوف مشاهده می‌شود.

جدول ۲: مقاومت مصالح مورد استفاده در نمونه آزمایشگاهی (MPa)

Table. 2. Experimental materials properties

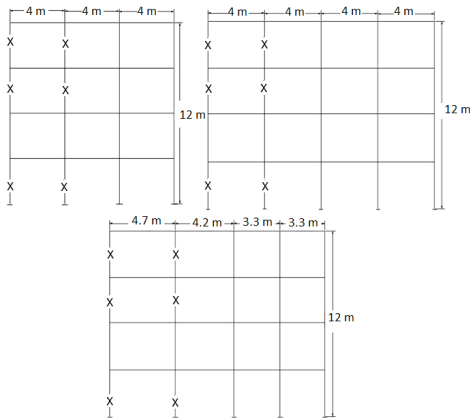
بتن	مقاومت فشاری
۴۳/۲	میلگرد #۳
۳۹۹	مقاومت تسلیم
۶۴۸	مقاومت نهایی
میلگرد #۲	مقاومت تسلیم
۵۶۵	مقاومت نهایی
۶۵۵	

تاریخچه زمانی جابه‌جایی قائم گره عضو محذوف در تحلیل نرم‌افزاری و آزمایش تجربی در شکل ۲ نمایش داده شده است.

1 Tipping point

۳- مشخصات مدل‌های انتخابی

دو قاب منظم دو بعدی ۳ و ۴ دهانه ۴ طبقه با دهانه‌های به طول ۴ متر و ارتفاع طبقات ۳ متر و یک قاب نامنظم دو بعدی ۴ دهانه بتن مسلح با همان تعداد طبقات مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است؛ دلیل به کارگیری قاب دو بعدی در تحلیل بررسی معیارهای شروع خرابی و گسترش و انتقال آن به سایر المان‌ها است. نمای سازه‌های مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمای قاب‌های مطالعاتی و محل ستون‌های محذوف

Fig. 4. Studied frames & position of removed columns

۳-۱- جزئیات طراحی

طراحی قاب‌های مطالعاتی طبق آیین نامه بتن آمریکا^۱ انجام شده است. بار مرده و زنده و پارتیشن اعمال شده به سازه طبق استاندارد ملی ساختمان ایران (مبحث ششم مقررات ملی ساختمان) برای تمام طبقات و بام به ترتیب ۵/۲، ۱/۹۶ و ۱/۴۷ کیلونیوتن بر متر مربع است. مقاطع اعضا و نحوه قرارگیری آنها در شکل ۵ و جدول ۴ آمده است:

جدول ۴: نحوه قرارگیری اعضا در طبقات

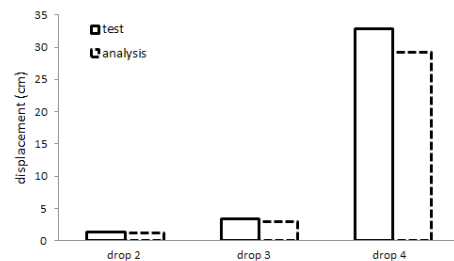
Table. 4. Beams and columns arrangement

عضو	طبقه	اول و دوم	سوم و چهارم
تیر	B ₁	B ₁	B ₂
ستون	C ₁	C ₁	C ₂

جدول ۳: جابه‌جایی قائم‌گره عضو محذوف

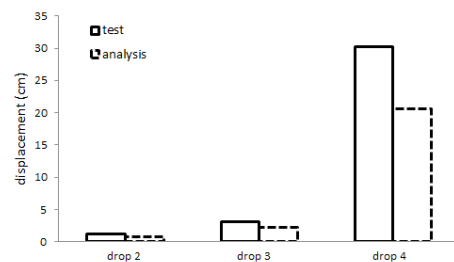
Table. 3. Vertical displacement of joint above the removed columns

جابه‌جایی گره عضو محذوف (cm)	دینامیکی پیشینه	استاتیکی باقیمانده
گام ۱	آزمایشگاهی	-
تحلیلی	۰/۵۶	۰/۳۶
گام ۲	آزمایشگاهی	۱/۳۷
تحلیلی	۱/۲۲	۰/۷۰
گام ۳	آزمایشگاهی	۳/۴۰
تحلیلی	۲/۹۵	۲/۱۸
گام ۴	آزمایشگاهی	۳۲/۸۲
تحلیلی	۲۹/۱۸	۲۰/۵۷



الف - جابه‌جایی قائم پیشینه

a) Maximum vertical displacement



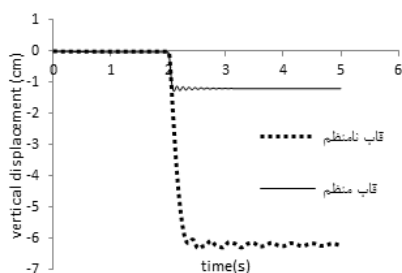
ب- جابه‌جایی قائم استاتیکی باقیمانده

b) Residual static vertical displacement

شکل ۳: مقایسه تاریخیچه زمانی جابه‌جایی قائم‌گره عضو محذوف

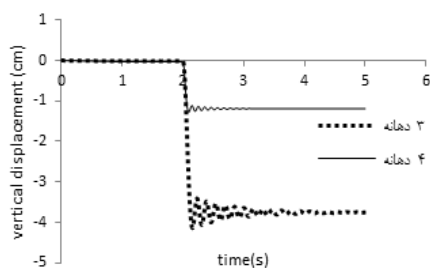
Fig. 3. Time-displacement diagrams of joint above the removed column

نمایش می‌دهد؛ با مقایسه جابه‌جایی قائم در محل حذف ستون گوشه قاب ۴ دهانه منظم و نامنظم میتوان دریافت که نامنظمی پاسخ دینامیکی سازه را بر اثر حذف ناگهانی عضو کلیدی افزایش می‌دهد همچنین با توجه به شکل ۶-ب حذف ستون گوشه در قاب ۴ دهانه جابه‌جایی قائم کمتری نسبت به قاب ۳ دهانه ایجاد می‌کند.



الف) قاب منظم و نامنظم ۴ دهانه

a) Regular and irregular 4 bay frame



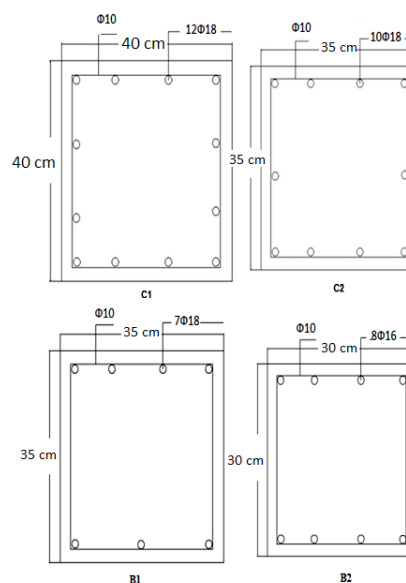
ب) قاب منظم ۳ و ۴ دهانه

b) Regular 3 and 4 bay frames

شکل ۶: جابه‌جایی قائم - زمان در گره اتصال ستون گوشه

Fig. 6. Time-displacement diagram of joint above the removed corner column

در شکل ۷، ۸ و شکل ۹ به ترتیب جابه‌جایی گره ستون محذوف طبقه اول، سوم و زیرین بام برای حالت حذف ستون گوشه و میانی هر سه قاب مقایسه خواهد شد. با توجه به شکل‌ها میتوان دریافت که حذف ستون گوشه چه در طبقات بالا و چه در طبقات پایین حالت بحرانی‌تری نسبت به حذف ستون میانی است. با مقایسه جابه‌جایی قائم گره ستون محذوف قاب ۳ و ۴ دهانه منظم ملاحظه می‌شود افزایش تعداد دهانه‌ها مقدار واکنش سازه به حذف عضو کلیدی را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد به عبارت دیگر مسیرهای جایگزین انتقال اضافه بار ناشی از حذف عضو افزایش می‌یابد. همچنین در قاب ۴ دهانه نامنظم مشاهده می‌شود که اختلاف میان جابه‌جایی قائم گره در حالت حذف ستون میانی و گوشه برخلاف دو قاب دیگر زیاد است. حذف ستون گوشه در طبقات بالا (طبقه زیرین بام) به دلیل عدم وجود مسیر جایگزین برای انتقال بار ستون محذوف، واکنش سازه‌ای شدیدتری در پی خواهد داشت این پدیده در شکل ۹-ب مشهود است.



شکل ۵: مقاطع تیر و ستون

Fig. 5. Beam and columns section

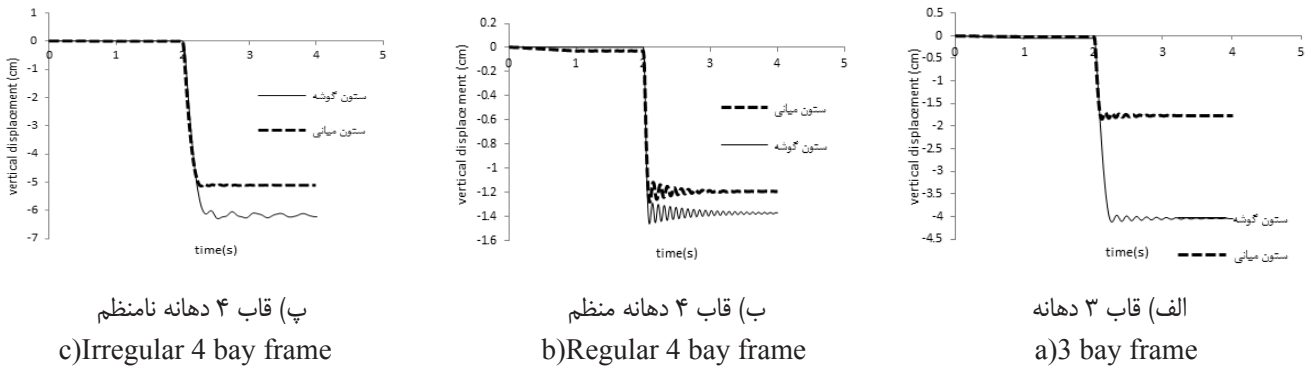
به دلیل عدم در نظرگیری اثر دال‌ها در طراحی قاب‌های دو بعدی مقدار ۴۰٪ ترکیب بار آیین‌نامه طراحی خرابی پیش‌رونده به قاب‌ها اعمال می‌شود تا نتایج حاصل از صحت کافی برخوردار باشند؛ معیار انتخاب باقی ماندن قاب در سطح عملکرد ایمنی جانی است. نسبت میرایی سازه برابر ۰.۵٪ است. از آنجا که مدت زمان خارج شدن ستون از تحلیل بر پاسخ دینامیکی سازه تأثیرگذار خواهد بود؛ این مدت ۰/۱ پرپود پاسخ سازه مربوط به مود حرکت قائم دهانه بالای ستون حذف شده لحاظ شده است. بارگذاری ثقلی پیشنهادی آیین‌نامه رابطه ۱ به صورت خطی از مقدار صفر شروع و در ثانیه اول به مقدار بیشینه رسیده و ثابت شده است. نیروی محوری داخلی ستون محذوف نیز به همین صورت و جهت مخالف نیروی ثقلی به گره اتصال وارد، در ثانیه دوم تحلیل حذف و مقدار آن صفر شده است.

۴- حذف ستون‌های کلیدی و تحلیل دینامیکی سازه

در آیین‌نامه پیشنهاد شده است که حذف ستون در نواحی زیر انجام شود [۲۰].

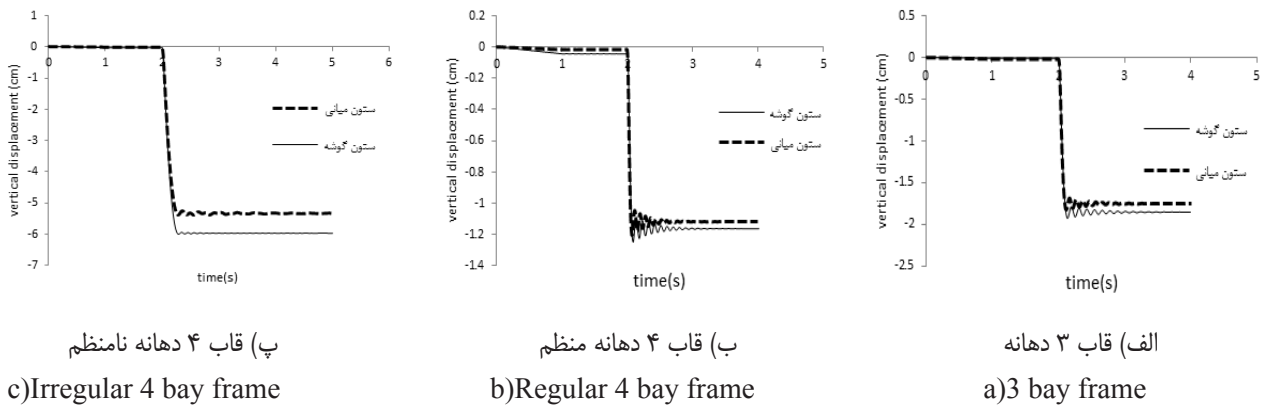
۱. اولین طبقه بالای تراز زمین
۲. طبقه زیرین بام
۳. طبقه میانی در ارتفاع
۴. طبقه بالایی محلی که ستون جوش خورده یا ابعاد آن تغییر کرده است.

بنابراین در پژوهش حاضر ستون‌های گوشه و میانی در طبقه اول، سوم و چهارم در هر سه قاب حذف شده و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی انجام شده است. شکل ۶ جابه‌جایی قائم در محل ستون محذوف را



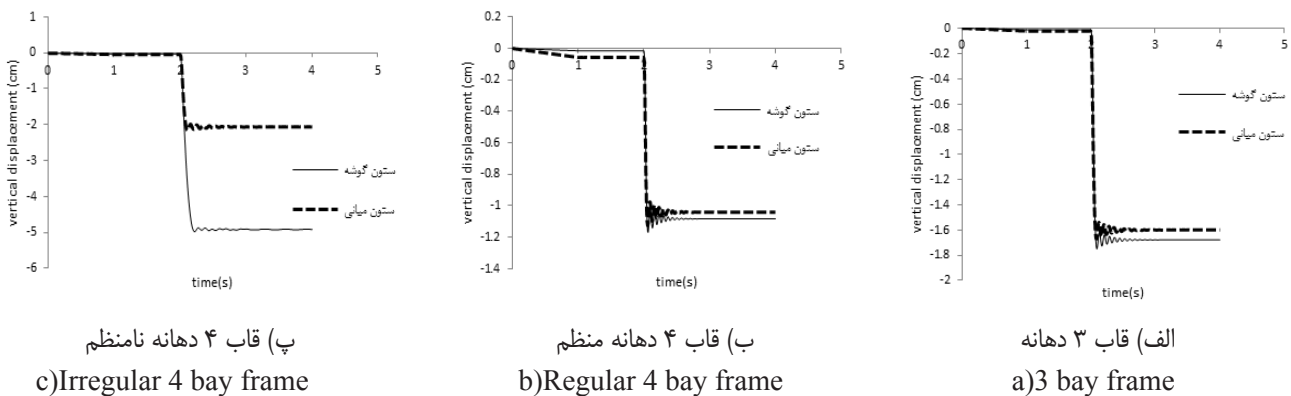
شکل ۷: جابه‌جایی قائم در گره محل حذف ستون، طبقه اول

Fig. 7. Vertical displacement time history diagrams of joint above the 1st story removed column



شکل ۸: جابه‌جایی قائم در گره محل حذف ستون، طبقه سوم

Fig. 8. Vertical displacement time history diagrams of joint above the 3rd story removed column

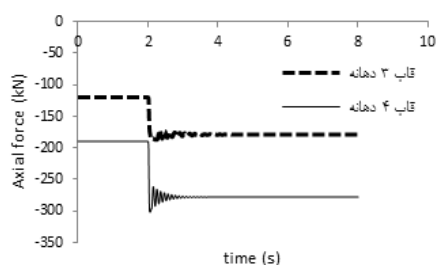


شکل ۹: جابه‌جایی قائم در گره محل حذف ستون، طبقه زیرین بام

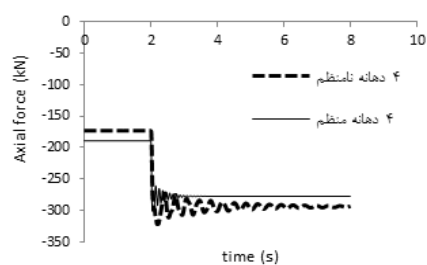
Fig. 9. Vertical displacement time history diagrams of joint above the 4th story removed column

و نامنظم به ترتیب ۱/۶ و ۱/۸۶ است. در جدول ۵ نسبت بیشینه نیروی محوری به نیروی محوری عضو مجاور ستون محذوف قبل از حذف عضو و دوران تیر متصل به ستون محذوف برای هر سه قاب و دو حالت حذف ستون گوشه و میانی نشان داده شده است [۱۸]. همانطور که نتایج نشان می‌دهند؛ ستون میانی سهم نیروی محوری بیشتری نسبت به گوشه می‌برد بنابراین با حذف اعضای میانی نسبت نیروی محوری بزرگتر خواهد بود. حذف ستون گوشه به دلیل کمتر بودن مسیرهای جایگزین انتقال بار حالت بحرانی‌تری از خرابی محسوب می‌شود.

در صورتی که اندازه دهانه‌ها یکسان باشد تفاوت چندانی در واکنش سازه به حذف ستون گوشه و میانی وجود ندارد اما زمانی که دهانه‌ای بزرگتر از دیگری باشد با حذف ستون آن دهانه، واکنش سازه‌ای شدیدتر خواهد بود. حذف ستون در دهانه‌های کوچکتر جابه‌جایی قائم کمتری ایجاد میکند. شکل ۱۰ تاریخچه زمانی نیروی محوری ستون مجاور عضو محذوف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۰ میزان افزایش نیروی محوری ستون مجاور عضو محذوف با افزایش تعداد دهانه‌ها و بالا رفتن افزودنی سازه افزایش می‌یابد در قاب ۳ دهانه نسبت نیروی محوری بیشینه به نیروی محوری قبل از حذف ستون گوشه برابر ۱/۴۵ و برای دو قاب ۴ دهانه منظم



ب) قاب منظم ۳ و ۴ دهانه



الف) قاب منظم و نامنظم ۴ دهانه

شکل ۱۰: نیروی محوری ستون مجاور ستون گوشه طبقه اول

Fig. 10. Axial force of next column of the corner column at 1st story

جدول ۵: نسبت بیشینه نیروی محوری عضو مجاور بعد از حذف ستون به نیروی محوری قبل از حذف ستون و دوران تیر متصل به ستون محذوف

Table. 5. Peak axial force after column removal to axial force before column removal ratio and connected beam rotation

قاب	پارامتر محاسباتی	گوشه طبقه اول	میانی طبقه اول	گوشه طبقه سوم	میانی طبقه سوم	گوشه طبقه چهارم	میانی طبقه چهارم
۳ دهانه	نسبت نیروی محوری	۱/۴۵	۲/۳۰	۱/۵۰	۲/۱۳	۱/۶۶	۱/۶۰
	دوران تیر متصل	۰/۰۱۰۳	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۴۵	۰/۰۰۴۳
۴ دهانه منظم	نسبت نیروی محوری	۱/۶۰	۱/۷۲	۱/۶۶	۱/۶۶	۱/۶۰	۱/۷۳
	دوران تیر متصل	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۲۳
۴ دهانه نامنظم	نسبت نیروی محوری	۱/۸۶	۲/۱۰	۱/۶۴	۱/۶۴	۱/۶۳	۱/۷۵
	دوران تیر متصل	۰/۰۱۳۴	۰/۰۱۲۲	۰/۰۱۱۰	۰/۰۱۴۰	۰/۰۱۰۶	۰/۰۰۴۸

- [4] J.-L. Le, B. Xue, Probabilistic analysis of vulnerability of reinforced concrete buildings against progressive collapse, in: Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession, 2013, pp. 20-31.
- [5] H. Jian, S. Li, L.J.J.o.P.o.C.F. Huanhuan, Testing and Analysis on Progressive Collapse-Resistance Behavior of RC Frame Substructures under a Side Column Removal Scenario, 30(5) (2016) 04016022.
- [6] Y. Xiao, Y. Zhao, F. Li, S. Kunnath, H. Lew, Collapse test of a 3-story half-scale RC frame structure, in: Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession, 2013, pp. 11-19.
- [7] S. Orton, S. Stinger, J. Kirby, Static and dynamic disproportionate collapse testing of a reinforced concrete frame, in: Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession, 2013, pp. 67-77.
- [8] S.L. Orton, J.E.J.J.o.P.o.C.F. Kirby, Dynamic response of a RC frame under column removal, 28(4) (2013) 04014010
- [9] J. Weigand, T. Francisco, E. Johnson, L. Fahnestock, J. Liu, J. Berman, Large-scale experimental evaluation of steel gravity framing structural integrity, in: Structures Congress 2013: Bridging Your Passion with Your Profession, 2013, pp. 32-42.
- [10] T. Almusallam, Y. Al-Salloum, T. Ngo, P. Mendis, H.J.M. Abbas, Structures, Experimental investigation of progressive collapse potential of ordinary and special moment-resisting reinforced concrete frames, 50(2) (2017) 137.
- [11] J. Weng, C.K. Lee, K.H. Tan, N.S.J.E.S. Lim, Damage assessment for reinforced concrete frames subject to progressive collapse, 149 (2017) 147-160.
- [12] J. Weng, K. Tan, C.J.E.S. Lee, Modeling progressive collapse of 2D reinforced concrete frames subject to column removal scenario, 141 (2017) 126-143.
- [13] Y. Li, X. Lu, H. Guan, P. Ren, L.J.A.i.S.E. Qian, Probability-based progressive collapse-resistant assessment for reinforced concrete frame structures, 19(11) (2016) 1723-1735.
- [14] B. Kordbagh, M.J.T.S.D.o.T. Mohammadi, S. Buildings, Influence of seismicity level and height of the building on progressive collapse resistance of steel frames, 26(2) (2017) e1305.
- [15] K. Lin, Y. Li, X. Lu, H.J.J.o.P.o.C.F. Guan, Effects of seismic and progressive collapse designs on the vulnerability of RC frame structures, 31(1) (2016) 04016079.

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سه قاب خمشی بتن مسلح با استفاده از روش مسیر بار جایگزین و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی مورد ارزیابی قرار گرفتند، روش تحلیل با مدل‌سازی یک قاب خمشی آزمایشگاهی در نرم‌افزار صحت‌سنجی شد نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری و نتایج آزمایش دینامیکی تطابق دارند. نتایج تحلیل قاب‌های ۳ دهانه، ۴ دهانه منظم و ۴ دهانه نامنظم جدول ۵ حاکی از آن است که حذف ستون گوشه در تمام طبقات حالتی بحرانی از خرابی پیش‌رونده است چرا که مسیرهای جایگزین برای انتقال اضافه بار ناشی از حذف عضو نسبت به حذف اعضای میانی کمتر است؛ دوران تیرهای متصل به عضو محذوف در حالت حذف ستون گوشه بیشتر از حالت حذف ستون میانی است. در صورتی که حذف ستون میانی در تمام طبقات نسبت نیروی محوری بزرگتری نسبت به حذف ستون گوشه ایجاد می‌کند.

با مقایسه قاب ۳ و ۴ دهانه با آرایش پلان منظم میتوان دریافت که قاب ۳ دهانه در برابر خرابی پیش‌رونده آسیب‌پذیرتر است. در نتیجه با افزایش تعداد دهانه‌ها و درجه نامعینی، سازه در برابر خرابی مقاوم می‌شود. بررسی جابه‌جایی و دوران قاب نامنظم نشان می‌دهد که وجود ناهماهنگی در توزیع اضافه بار ناشی از حذف عضو مقاومت سازه در برابر خرابی را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین حذف ستون در دهانه‌های کوچکتر خسارت کمتری به سازه وارد میکند. بنابراین در بحث خرابی پیش‌رونده ابعاد دهانه‌ها از اهمیت بالایی برخوردارند.

با توجه به نتایج پژوهش حاضر افزایش تعداد دهانه‌ها یا به عبارتی مسیرهای جایگزین انتقال بار، منظم بودن هندسه سازه و مقاوم‌سازی اعضای کلیدی قاب به خصوص ستون‌های گوشه می‌تواند از جمله راهکارهای کاهش خطر وقوع خرابی پیش‌رونده در قاب‌های خمشی بتن مسلح باشد. با استفاده از نمونه قاب‌های با تعداد طبقات و دهانه‌های متفاوت و بررسی سناریوهای بیشتری از حذف ستون میتوان بحرانی‌ترین حالت‌های خرابی اولیه و مستعدترین اعضا برای گسترش خرابی را مشخص کرد؛ همچنین با ارائه شاخص‌های خرابی، ارزیابی رفتار سازه در برابر بارهای غیرعادی ساده‌تر خواهد بود.

مراجع

- [1] Saedi Darian, A., Bahrapour, H., Ziaei, M., Bashiri, M., Theory and application of progressive collapse, Angize publication, 1398.
- [2] M. Byfield, W. Mudalige, C. Morison, E.J.P.o.t.I.-S. Stoddart, Buildings, A review of progressive collapse research and regulations, 167(8) (2014) 447-456.
- [3] K.A. Marchand, D.J.J.J.o.P.o.C.F. Stevens, Progressive Collapse Criteria and Design Approaches Improvement, 29(5) (2015) B4015004.

- [19] GSA, Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance, in, GSA Washington, DC, 2013.
- [20] K. Marchand, D. J. Stevens, B. Crowder, T. Campbell, UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, 2005.
- [16] J. Weng, C.K. Lee, K.H. Tan, N.S.J.E.S. Lim, Damage assessment for reinforced concrete frames subject to progressive collapse, 149 (2017) 147-160.
- [17] M.M. Liu, A.J.E.S. Pirmoz, Energy-based pulldown analysis for assessing the progressive collapse potential of steel frame buildings, 123 (2016) 372-378.
- [18] M. Ghahremannejad, Y.J.E.S. Park, Impact on the number of floors of a reinforced concrete building subjected to sudden column removal, 111 (2016) 11-23.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Taavoni Taromsari, A. Massumi, H. Hoseini Lavasani, Progressive collapse induced by column removal in reinforced concrete frames, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(6) (2019) 1061-1070.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12421.5211



